

№ 6 (108) ▪ 2021

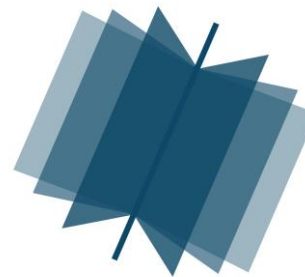
Часть 1 ▪ Июнь

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЖУРНАЛ**

INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL

ISSN 2227-6017 ONLINE

Екатеринбург
2021



Периодический теоретический и научно-практический журнал.
Выходит 12 раз в год.
Учредитель журнала: Соколова М.В.
Главный редактор: Меньшаков А.И.
Адрес издателя и редакции: 620137, г. Екатеринбург, ул.
Академическая, д. 11, корп. А, оф. 4.
Электронная почта: editors@research-journal.org
Сайт: www.research-journal.org
16+

**№ 6 (108) 2021
Часть 1
Июнь**

Дата выхода 17.06.2021
Цена: бесплатно.

Журнал имеет свободный доступ, это означает, что статьи можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии CC, поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Актуальная информация об индексации журнала в библиографических базах данных <https://research-journal.org/indexing/>.

Номер свидетельства о регистрации в Федеральной Службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: **ЭЛ № ФС 77 - 80772**.

Члены редколлегии:

Филологические науки:

Растягаев А.В. д-р филол. наук, Московский Городской Университет (Москва, Россия);
Сложеникина Ю.В. д-р филол. наук, Московский Городской Университет (Москва, Россия);
Штрекер Н.Ю. к. филол. н., Калужский Государственный Университет имени К.Э. Циолковского (Калуга, Россия);
Вербицкая О.М. к. филол. н., Иркутский Государственный Университет (Иркутск, Россия).

Технические науки:

Пачурин Г.В. д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия);
Федорова Е.А. д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (Нижний Новгород, Россия);
Герасимова Л.Г. д-р техн. наук, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева (Апатиты, Россия);
Курасов В.С. д-р техн. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);
Оськин С.В. д-р техн. наук, проф. Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия).

Педагогические науки:

Куликовская И.Э. д-р пед. наук, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия);
Сайкина Е.Г. д-р пед. наук, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена (Санкт-Петербург, Россия);
Лукиянова М.И. д-р пед. наук, Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова (Ульяновск, Россия);
Ходакова Н.П. д-р пед. наук, проф., Московский городской педагогический университет (Москва, Россия).

Психологические науки:

Розенова М.И. д-р психол. наук, проф., Московский государственный психолого-педагогический университет (Москва, Россия);
Ивков Н.Н. д-р психол. наук, Российская академия образования (Москва, Россия);
Каменская В.Г. д-р психол. наук, к. биол. наук, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина (Елец, Россия).

Физико-математические науки:

Шамолин М.В. д-р физ.-мат. наук, МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва, Россия);
Глезер А.М. д-р физ.-мат. наук, Государственный Научный Центр ЦНИИчермет им. И.П. Бардина (Москва, Россия);
Свиштунов Ю.А. д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

Географические науки:

Умывакин В.М. д-р геогр. наук, к. техн. н. проф., Военный авиационный инженерный университет (Воронеж, Россия);
Брылеев В.А. д-р геогр. наук, проф., Волгоградский государственный социально-педагогический университет (Волгоград, Россия);
Огуреева Г.Н. д-р геогр. наук, проф., МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

Биологические науки:

Буланый Ю.П. д-р биол. наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия);
Аникин В.В., д-р биол. наук, проф., Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского (Саратов, Россия);
Еськов Е.К. д-р биол. наук, проф., Российский государственный аграрный заочный университет (Балашиха, Россия);
Ларионов М.В., д-р биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия).

Архитектура:

Янковская Ю.С. д-р архитектуры, проф., Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия).

Ветеринарные науки:

Алиев А.С. д-р ветеринар. наук, проф., Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины (Санкт-Петербург, Россия);
Татарникова Н.А. д-р ветеринар. наук, проф., Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова (Пермь, Россия).

Медицинские науки:

Никольский В.И. д-р мед. наук, проф., Пензенский государственный университет (Пенза, Россия);
Ураков А.Л. д-р мед. наук, Ижевская Государственная Медицинская Академия (Ижевск, Россия).

Исторические науки:

Меерович М.Г. д-р ист. наук, к. архитектуры, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия);
Бакулин В.И. д-р ист. наук, проф., Вятский государственный университет (Киров, Россия);
Бердинских В.А. д-р ист. наук, Вятский государственный гуманитарный университет (Киров, Россия);
Лёвочкина Н.А. к. ист. наук, к. экон. н. ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия);
Блейх Н.О. д-р ист. наук, Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова (Владикавказ, Россия).

Культурология:

Куценков П.А. д-р культурологии, к. искусствоведения, Институт востоковедения РАН (Москва, Россия).

Искусствоведение:

Куценков П.А. д-р культурологии, к. искусствоведения, Институт востоковедения РАН (Москва, Россия).

Философские науки:

Петров М.А. д-р филос. наук, Института философии РАН (Москва, Россия);
Бессонов А.В. д-р филос. наук, проф., Институт философии и права СО РАН (Новосибирск, Россия);
Цыганков П.А. д-р филос. наук., МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия);
Лойко О.Т. д-р филос. наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия).

Юридические науки:

Костенко Р.В. д-р юрид. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);
Мазуренко А.П. д-р юрид. наук, Северо-Кавказский федеральный университет в г. Пятигорске (Пятигорск, Россия);
Мещерякова О.М. д-р юрид. наук, Всероссийская академия внешней торговли (Москва, Россия);
Ерғашев Е.Р. д-р юрид. наук, проф., Уральский государственный юридический университет (Екатеринбург, Россия).

Сельскохозяйственные науки:

Важов В.М. д-р с.-х. наук, проф., Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина (Бийск, Россия);
Раков А.Ю. д-р с.-х. наук, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр (Михайловск, Россия);
Комлацкий В.И. д-р с.-х. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);
Никитин В.В. д-р с.-х. наук, Белгородский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (Белгород, Россия);
Наумкин В.П. д-р с.-х. наук, проф., Орловский государственный аграрный университет.

Социологические науки:

Замараева З.П. д-р социол. наук, проф., Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, Россия);
Солодова Г.С. д-р социол. наук, проф., Институт философии и права СО РАН (Новосибирск, Россия);
Кораблева Г.Б. д-р социол. наук, Уральский Федеральный Университет (Екатеринбург, Россия).

Химические науки:

Абдиев К.Ж. д-р хим. наук, проф., Казахстанско-Британский технический университет (Алма-Аты, Казахстан);
Мельдешов А. д-р хим. наук, Казахстанско-Британский технический университет (Алма-Аты, Казахстан);
Скачилова С.Я. д-р хим. наук, Всероссийский Научный Центр По Безопасности Биологически Активных Веществ (Купавна Старая, Россия).

Науки о Земле:

Горяинов П.М. д-р геол.-минерал. наук, проф., Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Россия).

Экономические науки:

Лёвочкина Н.А. д-р экон. наук, к. ист. н., ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия);
Ламоттке М.Н. к. экон. н., Нижегородский институт управления (Нижний Новгород, Россия);
Акбулаев Н. к. экон. н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан);
Кулиев О. к. экон. н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан).

Политические науки:

Завершинский К.Ф. д-р полит. наук, проф. Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

Фармацевтические науки:

Тринеева О.В. к. фарм. н., Воронежский государственный университет (Воронеж, Россия);
Кайшева Н.Ш. д-р фарм. наук, Волгоградский государственный медицинский университет (Волгоград, Россия);
Ерофеева Л.Н. д-р фарм. наук, проф., Курский государственный медицинский университет (Курс, Россия);
Папанов С.И. д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);
Петкова Е.Г. д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);
Скачилова С.Я. д-р хим. наук, Всероссийский Научный Центр По Безопасности Биологически Активных Веществ (Купавна Старая, Россия); Ураков А.Л., д-р мед. наук, Государственная Медицинская Академия (Ижевск, Россия).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Гараев Т.К., Егоров Г.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ.....	6
Гончарова А.Б., Мазова А.В., Колпак Е.П. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКНЕ	12
Сдвижков О.А. ФУНКЦИИ VBA EXCEL ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ СИСТЕМЫ ОДУ 1-ГО ПОРЯДКА .	18
Тазмеев Г.Х., Тазмеев Х.К., Тазмеева Р.Н., Талипова И.П., Тазмеев Б.Х. ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОТОКА ПАРОВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ	25
Тихомиров А.А. СКИН-ЭФФЕКТ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПРОВОДЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЕ ИМПУЛЬСА ТОКА	29

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Александров А.Е., Аждер Т.Б., Степанова И.В., Яшников Д.А., Ливинская Л.Б. КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РАСЧЕТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АНАЛИЗА РИСКОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ	36
Бегункова Н.О. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДА РАДИАЛЬНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ	44
Буренко Е.А. АППРОКСИМАЦИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СИНТЕЗ ПО НИМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМОВ ЛЕЖАНДРА, ГЕГЕНБАУЭРА И ЯКОБИ.....	49
Глушаков В.Е. РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОДНОЙ СТАНЦИЕЙ В СЕТИ WI-FI	64
Дворянкин А.М., Жан Макс Хабиб Тапе АЛГОРИТМ ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОДНОМЕРНОЙ УПАКОВКИ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЕНИЕМ ВЕСА	72
Гаврилова А.А., Салов А.Г., Денисова И.Ю., Соловьев А.И. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СИСТЕМНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ПРИМЕРЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ТЭЦ -2	76
Рожков Г.А., Перекопский А.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН БОБОВЫХ ТРАВ.....	86
Pyichev V.Yu. NUMERICAL IMPLEMENTATION OF POINCARÉ RECURRENCE THEORY USING ARNOLD MAPPINGS	90
Пашков Е.И., Пермьяков М.Б., Краснова Т.В.	95
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФУТЕРОВКИ ГАЗОХОДОВ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ ОГНЕУПОРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ	95
Магомадов В.С. ПЛАТФОРМЫ LOW-CODE И NO-CODE КАК СПОСОБ СДЕЛАТЬ ПРОГРАММИРОВАНИЕ БОЛЕЕ ДОСТУПНЫМ ДЛЯ ШИРОКОЙ ОБЩЕСТВЕННОСТИ	100
Медведев П.В., Федотов В.А., Соловых С.Ю., Лукьянова Е.С. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА.....	104
Леденева Т.М., Решетников А.Д. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В НЕЧЕТКИХ СИСТЕМАХ	107
Леденев М.Ю., Сергиенко М.А. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НЕЧЕТКИХ И ИНТЕРВАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТА	118
Немченко А.В., Короткий Р.П., Ханин Ю.И., Лихолетов Е.А. ОСОБЕННОСТИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....	129

Новикова Д.А., Шумская И.Ю., Андреева А.Н., Грибут Е.А., Колесникова Т.А., Куликова М.А. ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАГЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ СВИНОКОМПЛЕКСОВ КАК СПОСОБА СОКРАЩЕНИЯ ДОБЫЧИ КАЛИЙНЫХ РУД	132
Орехов В.В., Аббасов И.Б. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН ВАГОНА ТРАМВАЯ «ЧАЙКА»	137
Петроченко С.В., Бисерикан М.И. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПАЗОВ ДЕТАЛИ «ДИСК» МАЛОГАБАРИТНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ	146
Попова М.В., Переверзев А.А. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА	152
Serikova Yu.I., Knyazev V.N. MULTIFUNCTIONAL MOBILE BIOMETRICS USING HUMAN FINGERPRINT AND DYNAMICS OF HANDWRITTEN SIGNATURE	157
Слепцов А.А., Рожин И.И. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ Г. ЯКУТСКА	163
Hamidi Hamed, Niazmand Milad Ahmad, Asrar Kanishka, Okolnikova G.E. PURIFICATION OF WATER CONTAMINATED WITH PETROLEUM HYDROCARBONS BY USING THE SOLAR PHOTOCATALYTIC METHOD	172
Хомяков А.В. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКГ	178
Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	184
Цупикова Л.С., Лазарева Т.Л., Кормилицына Л.В., Каменчуков А.В. ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО С УЛУЧШЕННЫМИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)	190
Чалдаева Е.И. ОЦЕНКА САМОВОЗГОРАНИЯ ЛЕСОВ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ...	195
Шабалин А.А., Катышева Е.Г. АНАЛИЗ ТЕКУЩИХ ПРОБЛЕМ НЕФТЕСЕРВИСНОЙ ОТРАСЛИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФОНДА НЕЗАКОНЧЕННЫХ СКВАЖИН В РОССИИ	199

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.002>

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Научная статья

Гараев Т.К.¹, Егоров Г.И.^{2,*}¹ ORCID: 0000-0001-5142-4661;^{1,2} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

* Корреспондирующий автор (egorovvelizary[at]yandex.ru)

Аннотация

В работе исследуются математические модели процесса нагрева диэлектрической среды при воздействии сверхвысокочастотной электромагнитной энергии. На основе рассматриваемых математических моделей, описывающих физический процесс – нагрева диэлектрической среды с помощью облучения сверхвысокочастотной (СВЧ) энергией, получены разные аналитические решения [1], [2]. Разработан программный продукт электронно-вычислительной машины на языке Python 3.9., получено авторское свидетельство. Разработанные программы позволили получить распределение температуры в глубине диэлектрической среды, в зависимости от параметров воздействующей волны в виде наглядных графиков и получить результаты позволяющие сравнить полученные аналитические решения.

Ключевые слова: математика, моделирование, программа, исследование, нагрев.

A SIMULATION OF HEATING A DIELECTRIC MEDIUM

Research article

Garaev T.K.¹, Egorov G.I.^{2,*}¹ ORCID: 0000-0001-5142-4661;^{1,2} A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

* Corresponding author (egorovvelizary[at]yandex.ru)

Abstract

The study explores the mathematical models of the process of heating a dielectric medium under the influence of ultrahigh-frequency electromagnetic energy. On the basis of the examined mathematical models describing the physical process of heating a dielectric medium by irradiation with ultrahigh-frequency (microwave) energy, the study obtains various analytical solutions [1], [2]. The authors introduce an original Python 3.9 based software and present an authorship certificate. The developed software allows the authors to obtain the temperature distribution in the depth of the dielectric medium depending on the parameters of the acting wave in the form of visual graphs and to obtain results that allow comparing the obtained analytical solutions.

Keywords: mathematics, modeling, program, research, heating.

Введение

В последние годы широко развиваются и используются технологические процессы, основанные на использовании эффекта воздействия электромагнитной энергии СВЧ. Области использования энергии СВЧ возрастает с каждым годом, к ним относится обеззараживание отходов, сушка различных материалов, приготовление пищи и переработка сельскохозяйственной продукции, размораживание пищевых продуктов, в том числе кормов, утилизация пищевых и животноводческих отходов, производство строительных материалов, производство и переработка продуктов нефтехимической промышленности и т.д.

Интерес к научным исследованиям и внедрению их в промышленность объясняется рядом неоспоримых преимуществ СВЧ технологий, некоторые из которых невозможно реализовать, применяя традиционные способы обработки материала. СВЧ технологии реализуют процессы практически мгновенно, экологически чистые, экономичные, предоставляют возможность избранного воздействия на материал. Поэтому разработка программных продуктов, проектирование и создание устройств СВЧ обработки является актуальной научно-технической задачей.

Несмотря на целесообразность развития устройств, основные вопросы, такие как определение требуемых режимов обработки, формирование необходимого распределения температуры в обрабатываемой среде, а самое важное управление процессом не рассмотрены в должной мере. Для автоматизированного процесса управления с обратной связью эффективным способом является разработка программных продуктов, основанных на математических моделях.

Анализ возможных схем управления показал, что управление комплексом, основанное на принципах адаптивной организации, является наиболее эффективным с точки зрения достижения требуемых показателей качества.

На рис. 1 представлен один из разрабатываемых комплексов [3] обработки водонефтяной эмульсии (ВНЭ) из нескольких СВЧ модулей с автоматизированной системой управления, реализующей на разработанном в настоящей работе программном продукте.

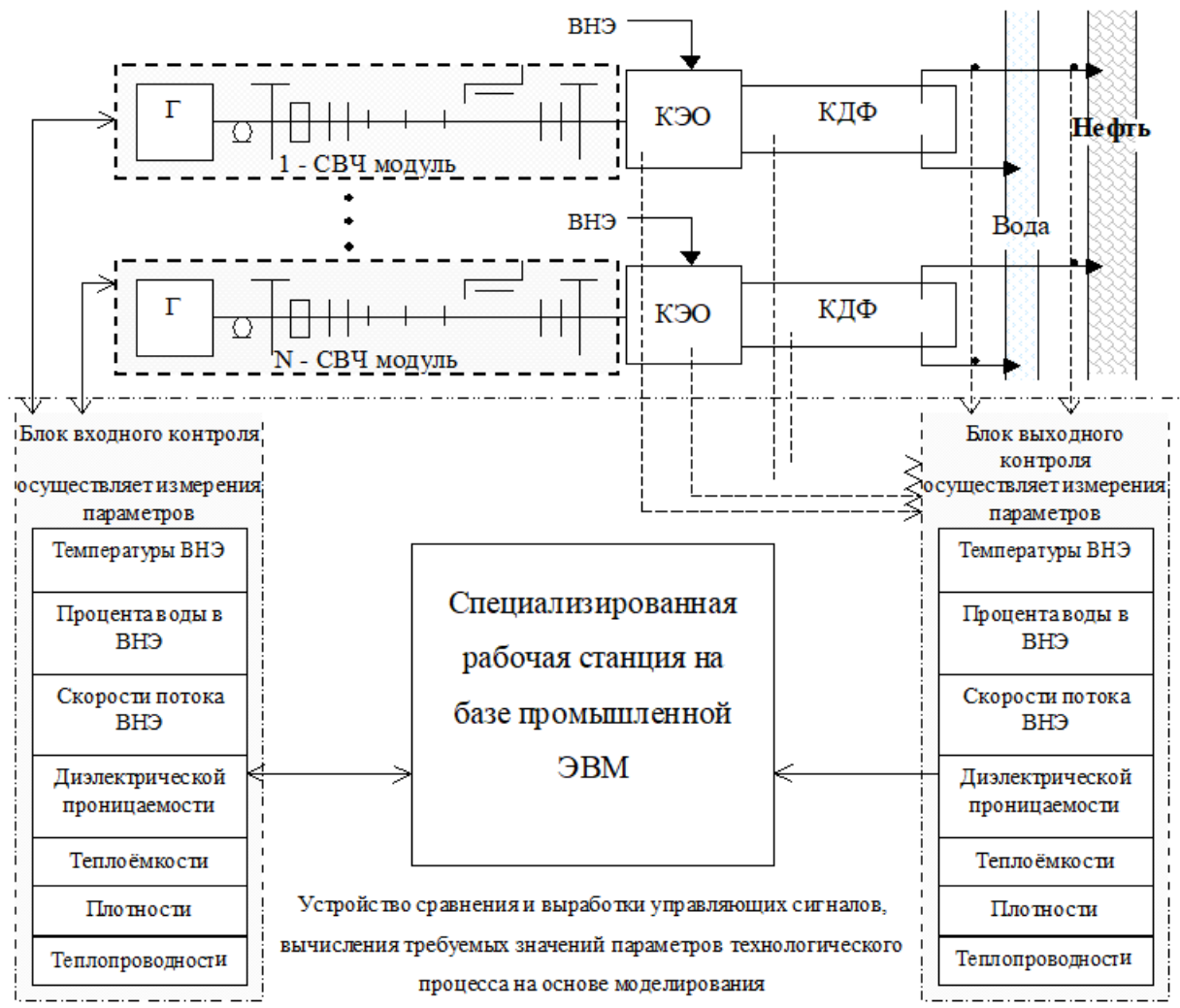


Рис. 1 – Устройство СВЧ обработки водонефтяной эмульсии

Необходимыми этапами для реализации такой схемы являются физическое исследование режимов обработки, математическое моделирование физического процесса воздействия СВЧ волны и управление им.

Решение задач управления значительно упрощается, применяя разработанный программный продукт, позволяющий открывать широкие возможности нахождения управляющих параметров, обеспечивающих эффективные режимы работы устройств и улучшение технико-экономических и эксплуатационных характеристик устройств.

С помощью исследования нагрева диэлектрических сред СВЧ энергией, представляется возможным получать полную картину исследуемого процесса, добиваться оптимальных результатов нагрева, а также анализировать точность полученных решений различными способами, в том числе с помощью разных математических моделей [1], [2]. На основе полученных аналитических решений [1], [2] разработаны программные средства, позволяющие исследовать физические процессы. Подобные программные средства, такие как [4], [5], ранее применялись при разработке микроволновых устройств [6].

Методы и принципы исследования

На рис. 2 изображена схема исследуемого процесса. На диэлектрическую среду воздействуют СВЧ волнами, в связи с чем происходит нагрев облучаемой среды [7].

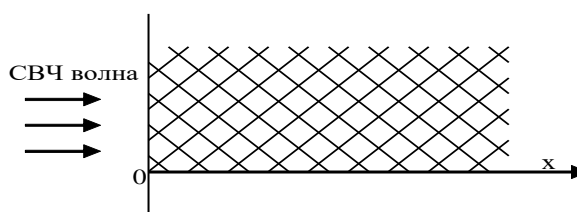


Рис. 2 – Изображение исследуемой модели облучения СВЧ волной

В работах [1], [2] получены аналитические решения рассматриваемой математической модели, однако в разных приближениях.

В [1] получена формула, для этой модели, с адиабатическим приближением

$$T(x, t) = t_0 + F_e \frac{S_0}{c \cdot \rho} \exp(-2\alpha x) t \quad (1)$$

В работе [2] формула имеет вид

$$T(x, t) = t_0 + F_e \frac{S_0}{c \cdot \rho} \exp(-2\alpha x) \exp(4\alpha^2 a^2 t) - 1 \quad (2)$$

где x – глубина проникновения электромагнитной волны в среде, метр,

t_0 – начальная температура среды, °C, t – время нагрева среды, сек,

F_e – коэффициент энергетического прохождения:

$$F_e = \frac{4 \cdot \frac{\sqrt{e' + e}}{2}}{1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{e' + e}{2} + e}} \quad (3)$$

где e – модуль диэлектрической проницаемости: $e = \sqrt{e'^2 + e''^2}$,

e' – действительная часть диэлектрической проницаемости, e'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости, α

и k_0 – коэффициенты определяются из выражений:

$$k_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c_0}$$

где f – частота излучения электромагнитной волны, МГц, c_0 – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме, м/с, α – коэффициент, определяется из соотношения:

$$\alpha^2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_0}$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м.К), t_0 – плотность среды, кг/(м.К), C – коэффициент теплоёмкости среды, Дж/(кг.К). S_0 – коэффициент, определяется из выражения:

$$S_0 = \frac{A_0}{2 \cdot 120 \cdot \pi}$$

Где A_0 – мощность источника электромагнитной волны, Вт.

Заметим, что при малом времени нагрева формула (1) совпадает с формулой (2), полученной для случая линейной зависимости коэффициента затухания от температуры, опять-таки при упрощающем предположении адиабатического приближения.

Заключение

На основе этих и подобных математических моделях разрабатываются программные средства [8], позволяющие анализировать узкоспециализированные направления исследований, а также могут разрабатываться способы обработки, например нефтяной среды [9]. В работе разработано программное средство на основе полученной математической модели, позволяющие в облегченном варианте моделировать процессы и реализовать устройство СВЧ обработки водонефтяной эмульсии, рис. 1. На программное средство получено Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019615201, 22.04.2019. Заявка № 2019611780 от 25.02.2019 [10]. На устройство, рис. 1 получен Патент на изобретение RU 2433575 C1 [3].

Программа ЭВМ разработана на языке Python 3.9, позволяет моделировать процессы нагрева диэлектрической среды в зависимости от параметров СВЧ электромагнитной энергии. Результаты программы, можно наблюдать в том числе в виде графиков (рис. 3), позволяют так же сравнить полученные результаты решений моделирования нагрева среды. Так, например, на рис. 3 представлены температурные характеристики нагрева среды.

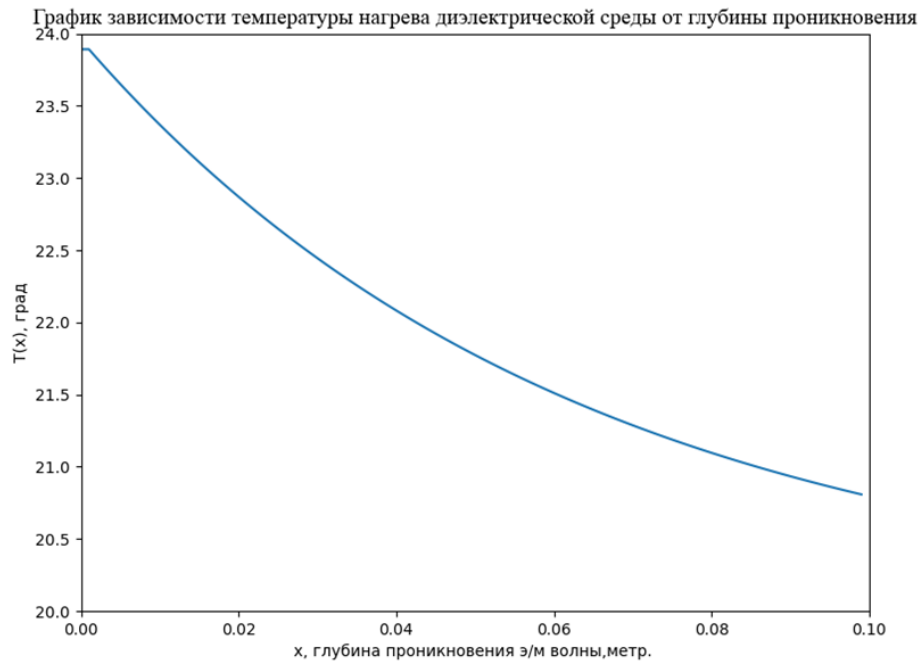


Рис. 3 – Моделирование нагрева среды с помощью программы Python 3.9.

В качестве языка программирования применялся язык Python, версии 3.9. Python, будучи полнофункциональным языком программирования, подходит для реализации алгоритмов с их последующим практическим использованием. Также Python обладает большим количеством библиотек, позволяющих работать с данными, математическими функциями, а также строить визуализацию этих данных при помощи графиков.

Для математических функций применена библиотека math, а для построения графиков модуль matplotlib.

На рис. 4 и 5 изображено сравнение температур нагрева среды смоделированные с помощью разные решений (1 и 2), где пунктирной линией показано распределение рассчитанной по формуле (1), сплошной линией показано распределение температуры по формуле (2).

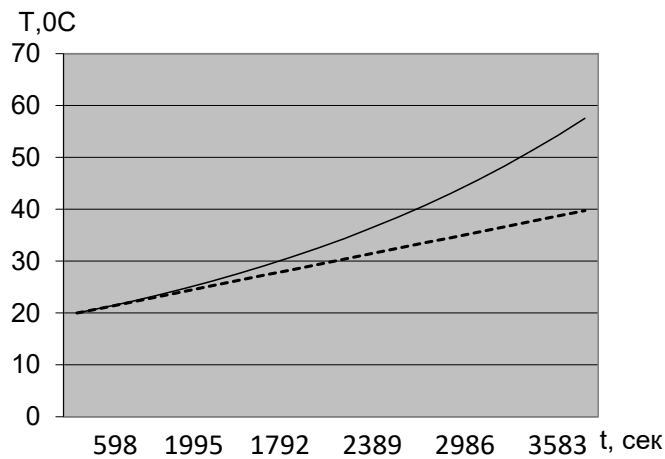


Рис. 4 – Температура нагрева в зависимости от времени нагрева

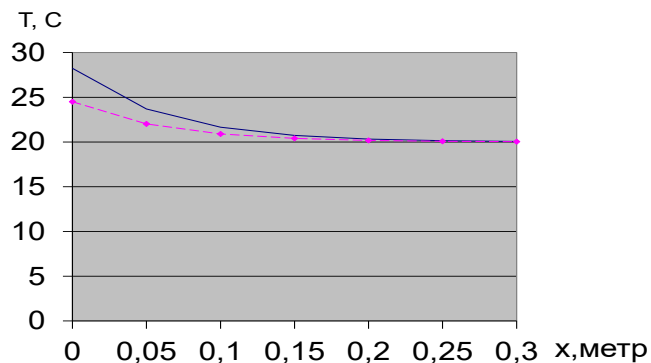


Рис. 5 – Распределение температуры нагрева среды в зависимости от глубины

Сравнивая результаты, полученные по формулам (1) и (2), видно, что температурные поля в диэлектрике неодинаковые. Это хорошо заметно на рис. 4 и 5, особенно если процесс нагрева продолжается длительное время. В этом случае отличия температуры значительны. В верхних слоях диэлектрика эти отличия более выражены (рис. 5). Из рис. 3 и формулы (2) видно, что температура изменяется во времени по экспоненциальному закону, что не описывает формула (1), в которой зависимость температуры от времени носит линейный характер.

Однако, если времени нагрева мало, то разницы нагрева практически не заметно. При увеличении время нагрева постепенно наблюдается расхождение температур, особенно в верхних слоях среды.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Рикенглаз Л.Э. К теории нагрева диэлектриков мощными электромагнитными полями / Л.Э. Рикенглаз // Инж.-физ. журн., 1974, Т. 27, № 6. С. 1061-1068.
2. Анфиногентов В.И. Микроволновый нагрев диэлектриков в рабочей камере с ограниченным объёмом / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Электронное приборостроение. Научно-практический сборник. Выпуск 1(22). Казань: КГТУ (КАИ), НИО «САН». 2002г. 108с.
3. Гараев Т.К. Автоматизированный способ микроволновой обработки жидкой водонефтяной смеси и устройство для его осуществления / Т.К. Гараев, Г.А. Морозов, А.С. Шакиров и др. Патент на изобретение RU 2433575 C1, 10.11.2011. Заявка № 2010130501/07 от 20.07.2010.
4. Гараев Т.К. Программа моделирования СВЧ сушки древесины больших длин с различной мощностью облучения / Т.К. Гараев. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019615403, 26.04.2019. Заявка № 2019611787 от 25.02.2019.
5. Гараев Т.К. Программа моделирования воздействия электромагнитных волн разных частот на бетонные конструкции / Т.К. Гараев. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019615982, 15.05.2019. Заявка № 2019614851 от 30.04.2019.
6. Гараев Т.К. Устройство МВЧ плавления и трамбования снега / Т.К. Гараев. Патент на полезную модель RU 189265 U1, 17.05.2019. Заявка № 2019105337 от 25.02.2019.
7. Гараев Т.К. Методы и устройства повышения эффективности СВЧ комплексов обработки нефтепродуктов / Т.К. Гараев. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Казань, 2004.
8. Гараев Т.К. Программа моделирования режимов нагрева при разных мощностях воздействия электромагнитной волны на битумные слои / Т.К. Гараев. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019615983, 15.05.2019. Заявка № 2019614848 от 30.04.2019.
9. Гараев Т.К. Способ микроволновой обработки жидкой водонефтяной смеси и устройство для его осуществления / Т.К. Гараев, В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов. Патент на изобретение RU 2327865 C1, 27.06.2008. Заявка № 2006140772/03 от 17.11.2006.
10. Гараев Т.К. Программа моделирования воздействия электромагнитных волн с поворотом плоскости поляризации на диэлектрик конечной толщины / Т.К. Гараев. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019615201, 22.04.2019. Заявка № 2019611780 от 25.02.2019.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Rikenglaz L. E. K teorii nagreva dielektrikov moshhnymi ehlektromagnitnymi poljami [On the Theory of Heating Dielectrics by Powerful Electromagnetic Fields] / L. E. Rikenglaz // Inzh.- fiz. zhurn. [Engineering and Physics Journal], 1974, vol. 27, No. 6, pp. 1061-1068 [in Russian]
2. Anfinogentov V. I. Mikrovolnovyy nagrev dielektrikov v rabochej kamere s ogranichenym ob'jomom [Microwave heating of dielectrics in a working chamber with a limited volume] / V. I. Anfinogentov, T. K. Garaev, G. A. Morozov // Ehlektronnoe priborostroenie. Nauchno-prakticheskij sbornik [Electronic Instrumentation. Scientific and Practical Collection]. Issue 1 (22). Kazan: KSTU(KAI), NIO "SAN". 2002. 108 p. [in Russian]
3. Garaev T. K. Avtomatizirovannyj sposob mikrovolnovoj obrabotki zhidkoj vodoneftjanoj smesi i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [Automated Method of Microwave Processing of Liquid Water-Oil Mixture and a Device for Its Implementation] / T. K. Garaev, G. A. Morozov, A. S. Shakirov et al. Patent for the invention RU 2433575 C1, 10.11.2011. Application no. 2010130501/07 dated 20.07.2010 [in Russian]
4. Garaev T. K. Programma modelirovanija SVCh sushki drevesiny bol'shikh dlin s razlichnoj moshhnost'ju obluchenija [Program for Modeling Microwave Drying of Wood of Large Lengths With Different Irradiation Power] / T. K. Garaev. Certificate of registration of the computer program RU 2019615403, 26.04.2019. Application no. 2019611787 dated 25.02.2019 [in Russian]
5. Garaev T. K. Programma modelirovanija vozdejstvija ehlektromagnitnykh voln raznykh chastot na betonnye konstrukcii [Program for Modeling the Impact of Electromagnetic Waves of Different Frequencies on Concrete Structures] / T. K. Garaev. Certificate of registration of the computer program RU 2019615982, 15.05.2019. Application no. 2019614851 dated 30.04.2019 [in Russian]
6. Garaev T. K. Ustrojstvo MVCh plavlenija i trambovanija snega [The Device of Microwave Melting and Ramming of Snow] / T. K. Garaev. Utility model patent RU 189265 U1, 17.05.2019. Application no. 2019105337 dated 25.02.2019 [in Russian]
7. Garaev T. K. Metody i ustrojstva povyshenija ehffektivnosti SVCh kompleksov obrabotki nefteproduktov [Methods and Devices for Improving the Efficiency of Microwave Complexes for Processing Petroleum Products] / T. K. Garaev. Candidate's Thesis. Technical Sciences / Kazan, 2004 [in Russian]

8. Garaev T. K. Programma modelirovanija rezhimov nagreva pri raznykh moshhnostjakh vozdejstvija ehlektromagnitnoj volny na bitumnye sloi [Program for Modeling Heating Modes at Different Capacities of the Electromagnetic Wave Effect on Bituminous Layers] / T. K. Garaev. Certificate of registration of the computer program RU 2019615983, 15.05.2019. Application no. 2019614848 dated 30.04.2019 [in Russian]
9. Garaev T. K. Sposob mikrovolnovoj obrabotki zhidkoj vodoneftjanoj smesi i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [A Method for the Microwave Treatment of a Liquid Water-Oil Mixture and a Device for Its Implementation] / T. K. Garaev, V. I. Anfinogentov, G. A. Morozov. Patent for the invention RU 2327865 C1, 27.06.2008. Application no. 2006140772/03 dated 17.11.2006 [in Russian]
10. Garaev T. K. Programma modelirovanija vozdejstvija ehlektromagnitnykh voln s povorotom ploskosti poljarizacii na dielektrik konechnoj tolshhiny [Program for Modeling the Effect of Electromagnetic Waves With the Rotation of the Polarization Plane on a Dielectric of Finite Thickness] / T. K. Garaev. Certificate of registration of the computer program RU 2019615201, 22.04.2019. Application no. 2019611780 dated 25.02.2019 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.003>**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКНЕ**

Научная статья

Гончарова А.Б.^{1,*}, Мазова А.В.², Колпак Е.П.³^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (a.goncharova[at]spbu.ru)

Аннотация

В работе разработана математическая модель заболевания кожи – акне. В модели учитываются особенности возникновения, созревания и распространения пустул на системе потовых желез кожи. Процесс роста популяции бактерий описывается системой уравнений с дискретным временем. В модели лечения предполагается непосредственное влияние химических препаратов на пустулы. Статистико-вероятностный подход применен в модели распределения условных больных по времени наступления стадий заболевания и в моделях распределения по продолжительности лечения. Параметры, характеризующие кинетику роста пустул, скорость их распространения по поверхности определяются исходя из клинических данных. В модели лечения предполагается, что препараты воздействуют на все пустулы одновременно.

Ключевые слова: акне, псориаз, математическое моделирование, числовая последовательность, модель лечения, статистические методы.

A MATHEMATICAL MODEL OF ACNE

Research article

Goncharova A.B.^{1,*}, Mazova A.V.², Kolpak E.P.³^{1, 2, 3} Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

* Corresponding author (a.goncharova[at]spbu.ru)

Abstract

The current study develops a mathematical model of acne. The model takes into account the characteristics of the appearance, maturation, and spread of pustules on the system of sweat glands of the skin. The process of bacterial population growth is described by a system of discrete-time equations. The treatment model assumes the direct effect of chemicals on the pustules. The statistical-probabilistic approach is applied in the model of the distribution of patients by the time of the onset of the stages of the condition and in the models of the distribution by the duration of treatment. The parameters that characterize the kinetics of pustule growth and the rate of their spread over the surface are determined based on clinical data. The treatment model assumes that the drugs affect all the pustules simultaneously.

Keywords: acne, psoriasis, mathematical modeling, numerical sequence, treatment model, statistical methods.

Введение

Из многочисленных заболеваний кожи акне не является заболеванием, приводящим к необратимым изменениям в организме [1]. Наибольшую когорту пациентов этой болезни образуют лица в возрасте до 30 лет. Акне по данным рандомизированных исследований наблюдается у 50-90% лиц подросткового возраста [2]. Болезнь поражает поверхность кожи, изменяет у молодежи представление о собственной непривлекательности, вызывает психические нарушения, пагубно влияет на психику, приводит к депрессии, снижает самооценку и качество жизни. Значимыми экспосом-факторами в молодежной популяции являются стресс, нарушение диеты, изменение климатических условий в местах постоянного проживания, связь с менструальным циклом. В целом заболевание рассматривается как медико-социальная проблема. Запоздалое обращение за медицинской поддержкой или самолечение могут привести к длительной процедуре лечения, а в отдельных случаях и к тяжелым последствиям. Акне может стать хроническим рецидивирующим воспалительным заболеванием продолжительностью в нескольких лет, с длительными и частыми рецидивами, трудно поддающихся терапии [3].

Возникновение заболевания

Кожа представляет собой многослойное образование, поверхность которого покрыта порами. В корне волоса кожного покрова находится волосяной фолликул с прилегающими к нему сальными железами. Секрет, который образуется в сальной железе, выходит на поверхность кожи. При заболевании акне пора закупоривается, и секрет остаётся и накапливается в волосяном фолликуле, сальной железе, создавая питательную среду для размножения бактерий. Причинами закупорки пор может быть нарушение процесса отшелушения верхнего слоя кожи, изменение состава секрета. В результате медленнорастущая бактерия *Propionibacterium acne* получает избыточное питание и начинает быстро размножаться.

Заболевание сопровождается открытыми и закрытыми воспалительными поражениями кожи в виде папул, пустул, угрей. Повреждение сальной железы сопровождается проникновением секрета и бактерий в межклеточное пространство. Это может привести не только к повторному возникновению заболевания, но и к более тяжелым последствиям. Заболевание условно разделяется на четыре стадии. К первой стадии заболевания относят поражение кожи 1-10 пустулами, к второй - 10-20, к третьей – 20-30, к четвертой – более 40 [4], [5].

Основным методом лечения акне является медикаментозное лечение. При лечении папуло-пустулезных акне легкой и средней степени тяжести используются препараты, подавляющие путем ингибирования биохимические реакции, поддерживающие воспалительный процесс [6].

Лечение может представлять определенные трудности, несмотря на широкий арсенал препаратов, и различных схем лечения, при этом ни одна из них не может считаться терапией выбора. Возможен и кратковременный терапевтический эффект, обусловленный отсутствием воздействия препаратов на иммуногенез заболевания.

Модель образования пустулы

Математические модели кожных заболеваний, за исключением меланомы, практически отсутствуют, несмотря на наличие биохимических моделей [7]. В большинстве математических моделей различных процессов в распределенных в пространстве тканях используется аппарат интегрального и дифференциального исчисления. Акне распространяется в виде точечной системы пустул и папул, случайным образом распределенных по поверхности кожи. Поэтому более естественна модель акне как процесса роста отдельной пустулы, по мере «созревания» которой могут зарождаться новые пустулы на некотором удалении от «созревшей» [8].

Пусть размножение бактерий в волосяном фолликуле происходит в режиме дискретного времени с временным интервалом τ . Пусть количество бактерий W_k на каждом временном интервале $(k\tau, (k+1)\tau)$ увеличивается на величину

$$W_{k+1} - W_k = \tau\mu W_k \left(1 - \frac{W_{k+1}}{K}\right) \quad (1)$$

где μ - параметр, K - максимальное количество бактерий, которое может находиться в фолликуле. На первом такте размножения бактерий считается, что $W_1 = \varepsilon \ll K$.

Параметр μ определяется исходя из данных по кинетике размножения бактерий. В уравнении (1) можно принять, что $K = 1$. То есть за единицу измерения при такой нормировке количества бактерий принимается максимальное количество бактерий, которые могут содержаться в фолликуле.

В модели (1) считается, что прирост численности бактерий пропорционален их количеству (множитель $\tau\mu W_k$ в правой части уравнения (1)) и доле незаполненного бактериями их функционального пространства K (множитель $1 - W_{k+1}/K$ в (1)). Считается также, что размножение бактерий происходит на неограниченном пищевом ресурсе.

Из уравнения (1) следует, что количество бактерий на $k+1$ такте размножения подсчитывается по формуле

$$W_{k+1} = \frac{(1 + \tau\mu)W_k}{1 + \tau\mu W_k / K}, \quad (k = 2, 3, \dots, n, \dots). \quad (2)$$

Поскольку $W_1 < K$, то для любого $k = 2, 3, \dots, n, \dots$ выполняется неравенство

$$\frac{(1 + \tau\mu)W_k / K}{1 + \tau\mu W_k / K} < 1.$$

Поэтому последовательность (2) будет сходиться к неподвижной точке: $\lim_{k \rightarrow \infty} W_k = K$.

Лечение акне осуществляется непосредственным воздействием на бактерии. Одним из вариантов является применение химических препаратов. Химические препараты вводятся в модель (1) следующим образом

$$W_{k+1} - W_k = \tau\mu W_k \left(1 - \frac{W_{k+1}}{K}\right) - \tau Drug W_{k+1} \quad (3)$$

где $Drug$ - количество химических препаратов, уничтожающих бактерии в фолликуле на временном интервале τ .

В клинической практике диагноз ставится на момент обращения пациента за медицинской помощью. При этом от начала заболевания может пройти m тактов в процессе образования пустул. Тогда согласно (2) и (3) до такта m рост численности бактерий описывается соотношением (2), а начиная с такта $m+1$ соотношением

$$W_{k+1} = \frac{(1 + \tau\mu)W_k}{1 + \tau Drug + \tau\mu W_k / K} \quad (k = m+1, m+2, \dots) \quad (4)$$

Последовательность (4) будет сходиться к стационарной точке $W = K(1 - Drug/\tau\mu)$, если $\tau\mu > Drug$, и к стационарной точке $W = 0$, если выполняется неравенство $\tau\mu < Drug$. Последнее неравенство является условием полного уничтожения бактерий.

Модель распространения пустул

Пусть область, в которой распространяется заболевание, представляет собой прямоугольник с $n_1 \times n_2$ фолликулами, находящимися друг от друга на равном расстоянии. Пусть W_{ij} ($i=1,2,\dots,n_1; j=1,2,\dots,n_2$) количество бактерий в пораженных фолликулах.

Тогда согласно (2) изменение количества бактерий в фолликуле ij на k -ом временном такте деления описывается уравнением

$$W_{ij}^{k+1} = \frac{(1 + \tau\mu_{ij})W_{ij}^k}{1 + \tau\mu_{ij}W_{ij}^k / K_{ij}} \cdot k = 2, 3, \dots, n, \dots \quad (5)$$

где μ_{ij} - параметр, характеризующий скорость размножения бактерий в фолликуле ij , а K_{ij} емкость этого фолликула.

На первом такте (при $k=1$) считается пораженным фолликул $m_1 m_2$. То есть

$$W_{ij}^1 = 0 \text{ для } i=1, 2, \dots, m_1 - 1, m_1 + 1, \dots, n_1 \quad j=1, 2, \dots, m_2 - 1, m_2 + 1, \dots, n_2,$$

$$\text{а } W_{m_1 m_2}^1 = \varepsilon \ll 1.$$

Распространение пустул происходит случайным перемещением части бактерий от одного фолликула к другому при условии, что в материнском фолликуле количество бактерий превысило некоторое «пороговое» значение γ ($0 \ll \gamma < 1$) на временном такте k . То есть, с четом (5), часть бактерий из фолликула с номером ij случайным образом «переселяется» в фолликул с номером ml :

$$\text{если } W_{ij}^k = \frac{(1 + \tau\mu_{ij})W_{ij}^k}{1 + \tau\mu_{ij}W_{ij}^k / K_{ij}} > \gamma, \text{ то}$$

$$\begin{aligned} W_{ij}^{k+1} &= (1 - \delta) \frac{(1 + \tau\mu_{ij})W_{ij}^k}{1 + \tau\mu_{ij}W_{ij}^k / K_{ij}}, \\ W_{ml}^{k+1} &= \frac{(1 + \tau\mu_{ml})W_{ml}^k}{1 + \tau\mu_{ml}W_{ml}^k / K_{ml}} + \delta \cdot W_{ij}^{k+1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\delta < 1$ - доля бактерий фолликула ij , переместившихся в фолликул ml . Количество бактерий в пустулах в момент $k\tau$ подсчитывается по формуле: $S^k = \sum_{i,j} W_{ij}^k$.

Модель статистики заболевания

Параметр μ в (1) выбирается исходя из скорости появления новых пустул. Носитель пустул обращается за медицинской помощью на первой или второй стадии заболевания. Поэтому оценить дату начала заболевания сложно. Отслеживание кинетики роста пустул невозможно, поскольку пациента необходимо лечить. Оценку значения параметра μ можно сделать по повторному проявлению заболевания после окончания лечения [9]. По данным клинических исследований после лечения рецидив может наступить через 40-50 дней. Если принять, что повторное развитие заболевания фиксируется при появлении 2-3 пустул, то в этом случае из (6) находится значение параметра $\mu = 0.2$ 1/день. Параметр τ в этом случае соответствует дискретному времени длительностью в 1 день, т.е. $\tau = 1$.

На рис. 1 отражено изменение числа пустул во времени. Расчетный инкубационный период созревания одной пустулы – 10 дней. Время появления новой пустулы на первой стадии заболевания - 2-4 дня, а со временем может появляться ежедневно несколько пустул. Третья стадия заболевания при значении $\mu = 0.2$ наступает на 60-й день [3], [4].

На рис.2 приведен вариант распределения пустул на поверхности вначале третьей стадии заболевания.

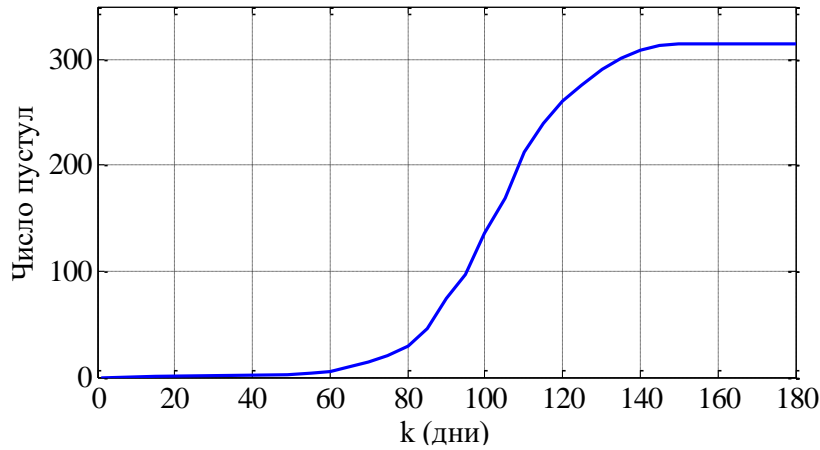


Рис. 1 – Динамика изменения числа пустул

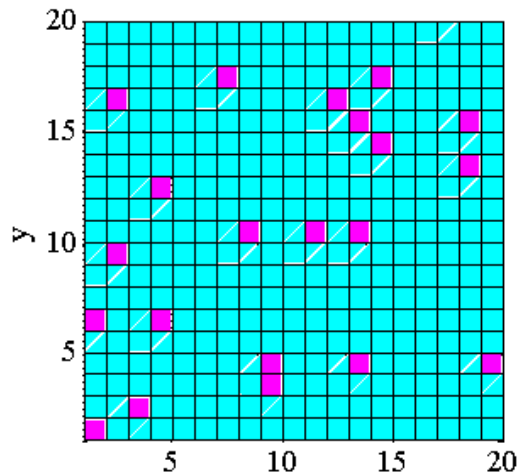


Рис. 2 – Распределение пустул на поверхности в начале третьей стадии «заболевания»

Последовательностям S^k ($k=1,2,\dots$) при различных значениях параметров μ_{ij} соответствует динамика роста числа пустул у разных «больных». Поэтому, выбирая параметры μ_{ij} случайным образом из заданного диапазона, можно оценить распределение больных по времени достижения заданного количества пустул. На рис. 3 отражено распределение 30 000 условных «больных» по времени наступления третьей стадии заболевания (образование 20 пустул) для выбранных случайным образом параметров $\mu_{ij} \in [0.2, 0.3]$.

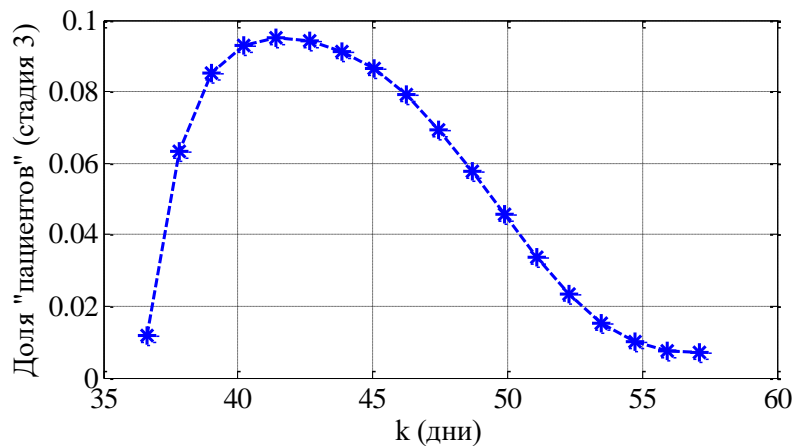


Рис. 3 – Распределение 30 000 «пациентов» по времени наступления третьей стадии (20 пустул) «заболевания»

На рис. 4 отражено распределение больных по времени лечения. В модели влияния препаратов на количество бактерий (4) предполагалось, что препараты воздействует на все пустулы одновременно. Лечение считалось законченным, если для всех W_{ij}^k при некотором значении k выполнялось неравенство $W_{ij}^k < \varepsilon$ для $i=1,2,\dots,n_1; j=1,2,\dots,n_2$. Параметр Drug=0.3 выбирался исходя из клинических данных, приведенных в [10], [11], согласно которым среднее время лечения составляло около 60 дней.

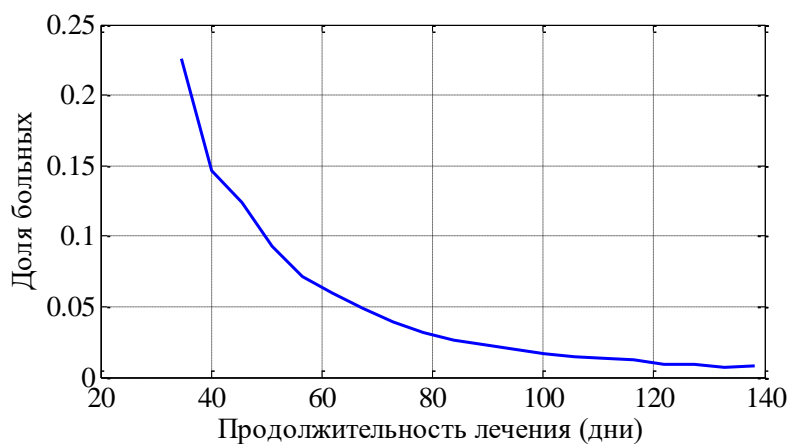


Рис. 4 – Распределение «больных» по продолжительности «лечения»

Заключение

Предложенная модель акне и его лечения, основанная только на кинетике собственного роста популяции бактерий, согласуется с клиническими данными по времени наступления стадий заболевания и продолжительности лечения. Теоретические зависимости по этим характеристикам дают возможность определить специалистам временные интервалы принятия решений, схемы лечения и оценить их эффективность.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Самцов А. В. Акне и акнеформные дерматозы / А. В. Самцов. М: Из-во Фармтека. 2014. 352.
2. Дрождина М.Б. Возрастные корреляции вульгарных акне. Сравнительное исследование микробиома и экспосома акне у студентов Кировского ГМУ. Анализ результатов терапии применительно к показателям качества жизни / М.Б. Дрождина, Е.П. Колеватых, М.А. Трубникова и др. // Вестник дерматологии и венерологии. - 2020. - Т. 96. - № 4. - С. 32-42.
3. Сорокина Е.В. Комбинированная терапия инверсных акне с учетом особенностей иммунного ответа и микробиоты кожи / Е.В. Сорокина, С.А. Масюкова, Э.А. Ахматова и др. // Дерматология в России. – 2018. - (Прил. 1). - С. 151-153.
4. Круглова Л.С. Актуальные вопросы терапии больных акне / Л.С. Круглова, Н.В. Грязева, Э.М. Гешева // Кремлевская медицина. Клинический вестник. - 2019. - №1. - С. 122-128.
5. Проценко Т.В. Акне: от теории к практическим рекомендациям // Научно-практический журнал по дерматологии, венерологии, косметологии «Торсуевские чтения». – 2019. - №4 (26). - С. 62-67.
6. Самцов А.В. Новые технологии в комбинированной топической терапии акне / А.В. Самцов // Вестник дерматологии и венерологии. – 2020. - 96 (3): - 75-79.
7. Gilmore, S. Modelling skin disease: Lessons from the worlds of mathematics, physics and computer science (Review) / S. Gilmore // Australasian Journal of Dermatology. – 2005. – V. 46. - № 2. – P. 61-69. DOI:0.1111/j.1440-0960.2005.00143.x. PubMed: 15842395.
8. Frederick Frisch H.F. Application of numerical methods for diffusion-based modeling of skin permeation / H.F. Frederick Frisch, A.M. Barbero // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2013. - V. 65. – P. 208-220. DOI: 10.1016/j.addr.2012.01.001.
9. Тонеева Д.В. Алгоритм построения экспертной системы диагностики заболеваний на основе дифференциально-диагностических признаков / Д.В. Тонеева, А.Б. Гончарова, Е.И. Сергеева // Технические науки - от теории к практике. - 2016. - № 11 (59). - С. 37-43.
10. Zhang, Y. An herbal cream reduces erythema of sensitive skin / Y. Zhang, Y. Jin, P. Humbert et al. // Journal of Cosmetic Dermatology. 2021. – V. 20. – №3. – P. 792-797. DOI: 10.1111/jocd.13610. PubMed: 32710585.
11. Фйзуллина Е.В. Лечение акне, осложненного сопутствующей микобиотой / Е.В. Фйзуллина, И.М. Хисматулина, А.М. Гордеева // Проблемы медицинской микологии. – 2019. - Т.21. - №4. - С. 30-33.

Сисок литературы на английском языке / References in English

1. A. Samtsov. V. Akne i akneformnye dermatozy [Acne and Acneform Dermatoses] / V. Samtsov. M: Farmteka. 2014. 352 [in Russian]
2. Drozhkina M. B. Vozrastnye korrelyatsii vul'garnykh akne. Sravnitel'noe issledovanie mikrobioma i ehksposoma akne u studentov Kirovskogo GМУ. Analiz rezul'tatov terapii primenitel'no k pokazatel'jam kachestva zhizni [Age-Related Correlations of Vulgar Acne. Comparative Study of the Microbiome and Exposome of Acne in Students of the Kirov State Medical University. Analysis of the Results of Therapy in Relation to Quality of Life Indicators] / M. B. Drozhkina, E. P. Kolevatykh, M. A. Trubnikova et al. // Vestnik dermatologii i venerologii [Bulletin of Dermatology and Venereology]. - 2020. - Vol. 96. - No. 4. - pp. 32-42. [in Russian]
3. Sorokina E. V. Kombinirovannaja terapija inversnykh akne s uchetoм osobennostej immunnogo otveta i mikrobioty kozhi [Combination Therapy of Inverse Acne, Taking Into Account the Characteristics of the Immune Response and the Microbiota of the Skin] / E. V. Sorokina, S. A. Masyukova, E. A. Akhmatova et al. // Dermatologija v Rossii [Dermatology in Russia]. - 2018. - (Appendix 1). - pp. 151-153 [in Russian]

4. Kruglova L. S. Aktual'nye voprosy terapii bol'nykh akne [Actual Issues of Therapy of Patients With Acne] / L. S. Kruglova, N. V. Gryazeva, E. M. Gesheva // Kremlevskaja medicina. Klinicheskij vestnik [Kremlin Medicine Journal]. - 2019. - No. 1. - p. 122-128 [in Russian]
5. Protsenko T. V. Akne: ot teorii k prakticheskim rekomendacijam [Acne: From Theory to Practical Recommendations] / T. V. Protsenko // Nauchno-prakticheskij zhurnal po dermatologii, venerologii, kosmetologii «Torsuevskie chtenija» [Scientific and Practical Journal of Dermatology, Venereology, Cosmetology "Torsuev Readings"]. - 2019. - №4 (26). - pp. 62-67 [in Russian]
6. Samtsov A.V. Novye tekhnologii v kombinirovannojj topicheskoy terapii akne [New Technologies in Combined Topical Therapy of Acne] / A. V. Samtsov // Vestnik dermatologii i venerologii [Bulletin of Dermatology and Venereology]. - 2020. - 96 (3): - 75-79. [in Russian]
7. Gilmore, S. Modelling skin disease: Lessons from the worlds of mathematics, physics and computer science (Review) / S. Gilmore // Australasian Journal of Dermatology. - 2005. - V. 46. - № 2. - P. 61-69. DOI:0.1111/j.1440-0960.2005.00143.x. PubMed: 15842395.
8. Frederick Frasch H.F. Application of numerical methods for diffusion-based modeling of skin permeation / H.F. Frederick Frasch, A.M. Barbero // Advanced Drug Delivery Reviews. - 2013. - V. 65. - P. 208-220. DOI: 10.1016/j.addr.2012.01.001.
9. Toneeva D. V. Algoritm postroenija ehkspertnoj sistemy diagnostiki zabolevanij na osnove differencial'no-dиагностических признаков [Algorithm for Constructing an Expert System for Diagnosing Diseases Based on Differential Diagnostic Signs] / D. V. Toneeva, A. B. Goncharova, E. I. Sergeeva // Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike [Technical Sciences: From Theory to Practice]. - 2016. - № 11 (59), pp. 37-43 [in Russian]
10. Zhang, Y. An herbal cream reduces erythema of sensitive skin / Y. Zhang, Y. Jin, P. Humbert et al. // Journal of Cosmetic Dermatology. 2021. - V. 20. - №3. - P. 792-797. DOI: 10.1111/jocd.13610. PubMed: 32710585.
11. Fizullina E. V. Lechenie akne, oslozhnennogo sopushtvujushhejj mikrobiotojj [Treatment of Acne Complicated by Concomitant Mycobiota] / E. V. Faizullina / I. M. Khismatulina, A. M. Gordeeva // Problemy medicinskojj mikologii [Problems of Medical Mycology]. - 2019. - Vol. 21. - No. 4, pp. 30-33 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.004>**ФУНКЦИИ VBA EXCEL ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ СИСТЕМЫ ОДУ 1-ГО ПОРЯДКА**

Научная статья

Сдвижков О.А.*

Российский государственный университет туризма и сервиса, Пушкино МО, Россия

* Корреспондирующий автор (oasdv[at]yandex.ru)

Аннотация

Приведены программные коды пользовательских функций VBA Excel, реализующих численные методы решения задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка методами Эйлера и Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Параметрами функций являются начальное и конечное значения независимой переменной, массив начальных значений зависимых переменных и число шагов, в программных кодах применяются динамические массивы. Пользовательские функции можно применять к задаче Коши и одного дифференциальных уравнений 1-го порядка. Все пользовательские функции имеют описания, поясняющие их назначения. Применение пользовательских функций показано на конкретных примерах численного решения задачи Коши системы дифференциальных уравнений 1-го порядка и отдельных дифференциальных уравнений 1-го порядка.

Ключевые слова: система дифференциальных уравнений, задача Коши, численные методы, код, диалоговое окно.

EXCEL VBA FUNCTIONS FOR NUMERICAL SOLUTION OF A CAUCHY PROBLEM OF THE FIRST-ORDER ODE SYSTEM

Research article

Sdvizhkov O.A.*

Russian State University of Tourism and Service, Pushkino, Moscow Oblast, Russia

* Corresponding author (oasdv[at]yandex.ru)

Abstract

The current study presents program codes of custom VBA Excel functions that implement numerical methods for solving the Cauchy problem for a system of 1st order ordinary differential equations using the Euler and Runge-Kutta 4th order methods. The parameters of the functions are the initial and final values of the independent variable, an array of initial values of the dependent variables, and the number of steps. Program codes use dynamic arrays. Custom functions can be applied to the Cauchy problem and one of the 1st order differential equations. All of the custom functions have descriptions that explain their purpose. The article demonstrates the use of custom functions using specific examples of numerical solutions to the Cauchy problem of 1st order differential equations system and individual 1st-order differential equations.

Keywords: system of differential equations, Cauchy problem, numerical methods, code, dialog box.

Введение

Системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка имеют большое прикладное значение [9]. Однако численные методы решения задачи Коши системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка отличаются большой трудоемкостью [1], [2], [6]. Поэтому задача информатизации этих методов, доступной самому широкому кругу пользователей ПК, каким является круг пользователей Microsoft Office, несомненно, является актуальной.

Цель данного исследования – разработка на языке программирования VBA Excel [3], [4], [7] программных кодов пользовательских функций [10], которыми численно решается задача Коши системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка методами Эйлера и Рунге-Кутты.

Программный код функции VBA Excel для решения методом Рунге-Кутты системы двух дифференциальных уравнений приведен в [5]. Пользовательские функции VBA Excel для численного решения задачи Коши обыкновенного дифференциального уравнения 1-го порядка приведены в [9].

1. Пользовательская функция ЭЙЛЕР

В методе Эйлера численного решения задачи Коши системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \frac{dy_2}{dx} = f_2(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dy_m}{dx} = f_m(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \end{cases} \quad (1.1)$$

$$y_1(x_0) = y_1^0, y_2(x_0) = y_2^0, \dots, y_m(x_0) = y_m^0 \quad (1.2)$$

на отрезке $[x_0, x_0 + n \cdot h]$ применяется формула:

$$y_{ji} = y_{ji-1} + h \cdot f_j(x_0 + (i-1)h, y_{1i-1}, y_{2i-1}, \dots, y_{mi-1}) \quad (1.3)$$

$j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n.$

Правые части системы (1.1) в VBA Excel можно задать пользовательской функцией СИСТЕМ, листинг которой имеет вид:

```
Function СИСТЕМ (Массив As Variant)
'массив состоит из значений: i – номера уравнения, x, y1, y2, ..., ym
Select Case Массив(1)
Case 1
СИСТЕМ = f1(Массив(2), Массив(3), ..., Массив(m))
Case 2
СИСТЕМ = f2(Массив(2), Массив(3), ..., Массив(m))
.....
Case m
СИСТЕМ = fn(Массив(2), Массив(3), ..., Массив(m))
End Select
End Function
```

Пусть система (1.1) задана пользовательской функцией СИСТЕМ. Тогда пользовательская функция ЭЙЛЕР, код VBA Excel которой приведен в листинге 1, выполняет вычисления по формуле (1.3).

Листинг 1. Код функции ЭЙЛЕР и ее описания

```
Function ЭЙЛЕР(Нач_х0, Конеч_х, Нач_y0(), Шагов) As Variant
Dim n As Integer, m As Integer, x(), y(), z(), c()
n = Шагов: m = UBound(Нач_y0)
ReDim z(1 To m, 0 To n): ReDim x(0 To n)
ReDim y(1 To m + 2): ReDim c(1 To m)
x(0) = Нач_х0: h = (Конеч_х - x(0)) / n
For i = 1 To m
z(i, 0) = Нач_y0(i)
Next
For j = 1 To n
For i = 1 To m
y(1) = i: y(2) = x(0) + h * (j - 1)
For r = 3 To m + 2
y(r) = z(r - 2, j - 1)
Next
Массив = y
z(i, j) = z(i, j - 1) + h * СИСТЕМ(Массив)
Next
Next
For i = 1 To m
c(i) = z(i, n)
Next
ЭЙЛЕР = c
End Function
Sub InstallFunc2()
Application.MacroOptions Macro:="ЭЙЛЕР", Description:= _
"Возвращает значения yi, полученные методом Эйлера"
End Sub
```

В листинг 1 входят массивы:

$z(1 \text{ To } m, 0 \text{ To } n)$ – двумерный массив значений функций y_1, y_2, \dots, y_m в точках $x_0, x_0+h, \dots, x_0+n \cdot h$;

$x(0 \text{ To } n)$ – массив значений $x_0, x_0+h, \dots, x_0+n \cdot h$;

$y(1 \text{ To } m + 2)$ – массив значений $(i, x, y_1, y_2, \dots, y_m)$, где i – номер уравнения системы;

$c(1 \text{ To } m)$ – массив итоговых значений массива z .

Пример 1.1. Найти приближенные значения решения системы

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = y_2 \\ \frac{dy_2}{dx} = y_1 \end{cases}$$

с начальными условиями $y_1(0) = 0, y_2(0) = 1$. Вычислить значения решения при $x=0,1; 0,2; 0,3; 0,4$.

1. В стандартный модуль вводится листинг функции СИСТЕМ:
Function СИСТЕМ(Массив As Variant)
Select Case Массив (1)
Case 1
СИСТЕМ = Массив (4)
Case 2
СИСТЕМ = Массив (3)
End Select
End Function
2. В диапазон A1:A5 вводятся значения, принимаемые переменной x: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4.
3. В диапазон B1:C1 вводятся начальные значения, принимаемые u_1 и u_2 : 0 и 1.
4. Выделяется диапазон B2:C2, вызывается функция ЭЙЛЕР и вводятся данные:

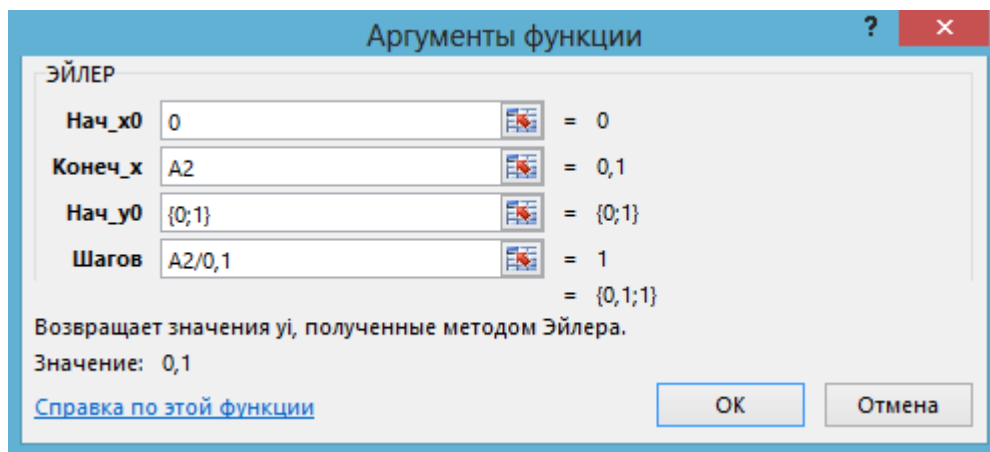


Рис. 1.1 – Применение функции ЭЙЛЕР в примере 1.1

5. Команда Ctrl+Shift +Enter возвращает в диапазоне B2:C2 результаты.
6. Копирование данных диапазона B2:C2 в диапазон B3:C5 завершает решение задачи (рис. 1.2).

B2		:	f_x		{=ЭЙЛЕР(0;A2;{0;1};A2/0,1)}		
	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0	1				
2	0,1	0,1	1				
3	0,2	0,2	1,01				
4	0,3	0,301	1,03				
5	0,4	0,404	1,0601				

Рис. 1.2 – Вид решения примера 1.1 функцией ЭЙЛЕР

Пример 1.2. Найти приближенные значения решения системы

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = y_2 + y_3 \\ \frac{dy_2}{dx} = y_1 + y_3 \\ \frac{dy_3}{dx} = y_1 + y_2 \end{cases}$$

с начальными условиями $y_1(0) = 1, y_2(0) = 2, y_3(0) = 3$. Вычислить значения решения при $x=0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$.

1. В стандартный модуль вводится листинг функции СИСТЕМ:
- ```
Function СИСТЕМ(Массив As Variant)
Select Case Массив(1)
Case 1
СИСТЕМ = Массив(4) + Массив(5)
Case 2
СИСТЕМ = Массив(3) + Массив(5)
Case 3
СИСТЕМ = Массив(3) + Массив(4)
```



End Select

End Function

2. В диапазон A1:A6 вводятся значения, принимаемые  $x$ : 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5.

3. В диапазон B1:D1 вводятся начальные значения, принимаемые  $y_1, y_2, y_3$ : 1, 2, 3.

4. Выделяется диапазон B2:D2, вызывается функция ЭЙЛЕР и вводятся данные:

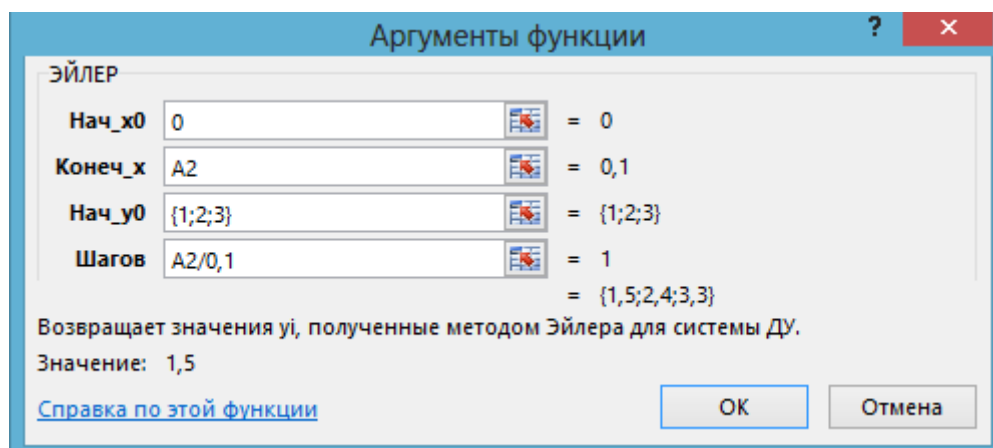


Рис. 1.3 – Применение функции ЭЙЛЕР в примере 1.2

5. Команда Ctrl+Shift +Enter возвращает в диапазоне B2:D2 результаты.

6. Копирование данных диапазона B2:D2 в диапазон B3:D6 завершает решение задачи (рис. 1.4).

| B2 |     | :       | X       | ✓       | $f_x$ | {=ЭЙЛЕР(0;A2;{1;2;3};A2/0,1)} |   |
|----|-----|---------|---------|---------|-------|-------------------------------|---|
|    | A   | B       | C       | D       | E     | F                             | G |
| 1  | 0   | 1       | 2       | 3       |       |                               |   |
| 2  | 0,1 | 1,5     | 2,4     | 3,3     |       |                               |   |
| 3  | 0,2 | 2,07    | 2,88    | 3,69    |       |                               |   |
| 4  | 0,3 | 2,727   | 3,456   | 4,185   |       |                               |   |
| 5  | 0,4 | 3,4911  | 4,1472  | 4,8033  |       |                               |   |
| 6  | 0,5 | 4,38615 | 4,97664 | 5,56713 |       |                               |   |

Рис. 1.4 – Вид решения примера 1.2 функцией ЭЙЛЕР

Функция Эйлер применима и к задаче Коши обыкновенного дифференциального уравнения 1-го порядка.

**Пример 1.3.** Найти приближенные значения решения задачи Коши

$$\frac{dy}{dx} = x + y, \quad y(0) = 1 \quad (1.4)$$

на отрезке  $[0, 1]$ , разбивая отрезок на 10 равных частей.

В этом случае код функции СИСТЕМ имеет вид:

Function СИСТЕМ(Массив As Variant)

СИСТЕМ = Массив(2) + Массив(3)

End Function

Применение функции ЭЙЛЕР приводит к результатам, показанным на рисунке 1.3.

|    |   |     |      |       |        |                         |          |          |          |          |          |
|----|---|-----|------|-------|--------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| B2 |   | :   |      |       | $f_x$  | =ЭЙЛЕР(0;B1;{1};B1/0,1) |          |          |          |          |          |
|    | A | B   | C    | D     | E      | F                       | G        | H        | I        | J        | K        |
| 1  | 0 | 0,1 | 0,2  | 0,3   | 0,4    | 0,5                     | 0,6      | 0,7      | 0,8      | 0,9      | 1        |
| 2  | 1 | 1,1 | 1,22 | 1,362 | 1,5282 | 1,72102                 | 1,943122 | 2,197434 | 2,487178 | 2,815895 | 3,187485 |

Рис. 1.5 – Вид решения примера 1.3 функцией ЭЙЛЕР

## 2. Пользовательская функция РУНГЕ

В методе Рунге-Кутты четвертого порядка точности, которым численно решается задача Коши (1.1, 1.2):

$$y_{ji+1} = y_{ji} + h \cdot k_{ji} \quad (2.1)$$

где

$$\begin{aligned}
 k_{ji} &= (k_{ji}^{(1)} + 2k_{ji}^{(2)} + 2k_{ji}^{(3)} + k_{ji}^{(4)}) / 6, \\
 k_{ji}^{(1)} &= f_j(x_i, y_{1i}, \dots, y_{ni}), \\
 k_{ji}^{(2)} &= f_j(x_i + h/2, y_{1i} + h \cdot k_{1i}^{(1)} / 2, \dots, y_{ni} + h \cdot k_{ni}^{(1)} / 2), \\
 k_{ji}^{(3)} &= f_j(x_i + h/2, y_{1i} + h \cdot k_{1i}^{(2)} / 2, \dots, y_{ni} + h \cdot k_{ni}^{(2)} / 2), \\
 k_{ji}^{(4)} &= f_j(x_i + h, y_{1i} + h \cdot k_{1i}^{(3)}, \dots, y_{ni} + h \cdot k_{ni}^{(3)}).
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Пусть система (1.1) задана пользовательской функцией СИСТЕМ. Тогда пользовательская функция РУНГЕ, программный код VBA Excel которой приведен в листинге 2, выполняет вычисления по формулам (2.1), (2.2).

**Листинг 2.** Код функции РУНГЕ и ее описания

```
Function РУНГЕ(Нач_х, Конеч_х, Нач_y() As Variant, Шагов) _
As Variant
```

```
Dim n As Integer, m As Integer, h As Single, x(), y(), z(), c()
```

```
n = Шагов:m = UBound(Нач_y)
```

```
ReDim z(1 To m, 0 To n):ReDim x(0 To n)
```

```
ReDim y(1 To m + 2):ReDim c(1 To m)
```

```
Dim K(1 To 4) As Double
```

```
x(0) = Нач_х:h = (Конеч_х - x(0)) / n
```

```
For i = 1 To m
```

```
z(i, 0) = Нач_y(i)
```

```
Next
```

```
For i = 1 To n
```

```
For j = 1 To m
```

```
y(1) = j: y(2) = x(0) + h * (i - 1)
```

```
For r = 3 To m + 2
```

```
y(r) = z(r - 2, i - 1)
```

```
Next
```

```
Массив = y:K(1) = h * СИСТЕМ(Массив)
```

```
y(1) = j: y(2) = x(0) + h * (i - 1) + h / 2
```

```
For r = 3 To m + 2
```

```
y(r) = z(r - 2, i - 1) + K(1) / 2
```

```
Next
```

```
Массив = y
```

```
K(2) = h * СИСТЕМ(Массив)
```

```
y(1) = j: y(2) = x(0) + h * (i - 1) + h / 2
```

```
For r = 3 To m + 2
```

```
y(r) = z(r - 2, i - 1) + K(2) / 2
```

```
Next
```

```
Массив = y
```

```
K(3) = h * СИСТЕМ(Массив):y(1) = j: y(2) = x(0) + h * i
```

```
For r = 3 To m + 2
```

```
y(r) = z(r - 2, i - 1) + K(3)
```

```
Next
```

```
Массив = y
```

```
K(4) = h * СИСТЕМ(Массив)
```

```
z(j, i) = z(j, i - 1) + (K(1) + 2 * K(2) + 2 * K(3) + K(4)) / 6
```

```
Next
```

```
Next
```

```
For i = 1 To m
```

```
c(i) = z(i, n)
```

```
Next
```

```
РУНГЕ = c
```

```
End Function
```

```
Sub InstallFunc3()
```

```
Application.MacroOptions Macro:="РУНГЕ", Description:=" _
```

```
"Возвращает значения yi, полученные методом Рунге-Кутта"
```

```
End Sub
```

В листинге 2 массивы аналогичные массивам листинга 1, только:

K(1 To 4) – массив значений, вычисляемых по формулам (2.2).

Решение примера 1.1 с помощью функции РУНГЕ показано на рисунке 2.1.

| B2 | :   | X        | ✓        | f <sub>x</sub> | {=ПУНГЕ(0;A2;{0;1};A2/0,1)} |   |   |
|----|-----|----------|----------|----------------|-----------------------------|---|---|
|    | A   | B        | C        | D              | E                           | F | G |
| 1  | 0   | 0        | 1        |                |                             |   |   |
| 2  | 0,1 | 0,105171 | 1        |                |                             |   |   |
| 3  | 0,2 | 0,210342 | 1,011061 |                |                             |   |   |
| 4  | 0,3 | 0,316676 | 1,033183 |                |                             |   |   |
| 5  | 0,4 | 0,425336 | 1,066488 |                |                             |   |   |

Рис. 2.1 – Вид решения примера 1.1 функцией ПУНГЕ

Решение примера 1.2 с помощью функции ПУНГЕ показано на рисунке 2.2.

| B2 | :   | X        | ✓        | f <sub>x</sub> | {=ПУНГЕ(0;A2;{1;2;3};A2/0,1)} |   |   |
|----|-----|----------|----------|----------------|-------------------------------|---|---|
|    | A   | B        | C        | D              | E                             | F | G |
| 1  | 0   | 1        | 2        | 3              |                               |   |   |
| 2  | 0,1 | 1,5535   | 2,4428   | 3,3321         |                               |   |   |
| 3  | 0,2 | 2,192781 | 2,983636 | 3,77449        |                               |   |   |
| 4  | 0,3 | 2,940906 | 3,644213 | 4,34752        |                               |   |   |
| 5  | 0,4 | 3,825591 | 4,451042 | 5,076493       |                               |   |   |
| 6  | 0,5 | 4,880289 | 5,436502 | 5,992716       |                               |   |   |

Рис. 2.2 – Вид решения примера 1.2 функцией ПУНГЕ

Решение примера 1.3 с помощью функции ПУНГЕ показано на рисунке 2.3.

| B2 | : | X        | ✓        | f <sub>x</sub> | =ПУНГЕ(0;B1;{1};B1/0,1) |          |          |          |          |          |         |
|----|---|----------|----------|----------------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
|    | A | B        | C        | D              | E                       | F        | G        | H        | I        | J        | K       |
| 1  | 0 | 0,1      | 0,2      | 0,3            | 0,4                     | 0,5      | 0,6      | 0,7      | 0,8      | 0,9      | 1       |
| 2  | 1 | 1,110342 | 1,242805 | 1,399717       | 1,583648                | 1,797441 | 2,044236 | 2,327503 | 2,651079 | 3,019203 | 3,43656 |

Рис. 2.3 – Вид решения примера 1.3 функцией ПУНГЕ

**Пример 2.1.** Построить с помощью функции ПУНГЕ графики численности популяций, описываемых системой Вольтерра – Лотка

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = (4 - 3x_2)x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = (-2 + x_1)x_2 \end{cases},$$

при начальных условиях  $x_1(0)=3$ ,  $x_2(0)=1$ ; параметр  $t$  принимает значения от 0 до 3.

Расчетная таблица строится по аналогии с таблицей примера 1.1, значения независимой переменной в диапазоне A1:A31, в ячейку B2 вводится формула =ПУНГЕ(0;A2;{3;1};A2/0,01). По таблице строятся графики численности популяций (рис. 2.4).

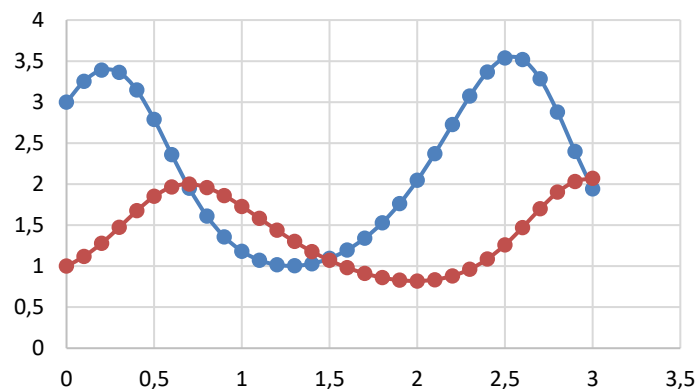


Рис. 2.4 – Графики численности популяций

**Заключение**

1. Программные коды пользовательских функций VBA Excel, реализующих численные методы решения задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка методами Эйлера и Рунге-Кутты четвертого порядка, публикуются впервые.

2. Как показывают примеры, применение рассматриваемых функций не вызывает трудностей, избавляет от больших объемов рутинных вычислений, позволяет получать результаты по такому сложному разделу, как численные методы решения систем дифференциальных уравнений, на современном (цифровом) уровне.

3. Рассматриваемые пользовательские функции будут полезны как в научных исследованиях, связанных с системами обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, так и в учебном процессе.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Бахвалов Н.С. Численные методы. / Н. С. Бахвалов – М: Наука, 1975. – 632 с.
2. Березин И.С. Методы вычислений, т. II. / И. С. Березин, Н. П. Жидков – М.: ГИФМЛ, 1959. – 620 с.
3. Гарнаев А.Ю. MS Excel 2002: разработка приложений. / А. Ю. Гарнаев – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 768 с.
4. Кузьменко В.Г. VBA 2003. / В. Г. Кузьменко – М: ООО «Бином-Пресс», 2004, 432 с.
5. Ларсен Р.У. Инженерные расчеты в Excel: Пер. с англ. / Р. У. Ларсен – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 544 с.
6. Самарский А.А. Задачи и упражнения по численным методам: Учебное пособие. / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич, Е. А. Самарская – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 208 с.
7. Сдвижков О.А. Excel – VBA. Словарь-справочник пользователя / О. А. Сдвижков. – М.: Эксмо, 2008. – 224 с.
8. Сдвижков О.А. Пользовательские функции VBA Excel для численного решения задачи Коши ОДУ 1-го порядка / Сдвижков О.А. // Международный научно-исследовательский журнал, № 4 (106), 2021, Часть 1, стр. 35 – 40.
9. Эрроусмит Д. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями: Пер. с англ. / Д. Эрроусмит, К. Плейс. – М.: Мир, 1986. – 243 с.
10. Сдвижков О.А. DEcode (пользовательские функции) [Электронный ресурс]. – URL: [https://oas.ucoz.com/load/odu\\_polzovatel'skie\\_funkcii/1-1-0-35](https://oas.ucoz.com/load/odu_polzovatel'skie_funkcii/1-1-0-35) (дата обращения: 20.01.2021)

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Bakhvalov N. S. Chislennyye metody [Numerical Methods] / N. S. Bakhvalov-M: Nauka, 1975 – 632 p. [in Russian]
2. Berezin I. S. Metody vychislenij, t. II. [Methods of Calculations, vol. 2] / I. S. Berezin, N. P. Zhidkov-M.: GIFML, 1959 – 620 p. [in Russian]
3. Garnaev A. Yu. MS Excel 2002: razrabotka prilozhenij [MS Excel 2002: Application Development] / A. Yu. Garnaev - St. Petersburg: BKhV-Petersburg, 2003 – 768 p. [in Russian]
4. Kuzmenko V. G. VBA 2003 / V. G. Kuzmenko-M: "Binom-Press" LLC, 2004, 432 p. [in Russian]
5. Larsen R. U. Inzhenernye raschety v Excel: Per. s angl. [Engineering Calculations in Excel: Translation from English] / R. U. Larsen-M.: Publishing house "Vilyams", 2002 – 544 p. [in Russian]
6. Samarsky A. A. Zadachi i uprazhneniya po chislennym metodam: Uchebnoe posobie [Problems and Exercises in Numerical Methods: A Textbook] / A. Samara, P. N. Vabishchevich, E. A. Samarskaya -M.: Ehditorial URSS, 2000 – 208 p. [in Russian]
7. Sdvizhkov O. A. Excel – VBA. Slovar'-spravochnik pol'zovatelja [Excel – VBA. Dictionary-User reference] / O. A. Sdvizhkov. - M.: Eksmo, 2008 – 224 p. [in Russian]
8. Sdvizhkov O. A. Pol'zovatel'skie funkcii VBA Excel dlja chislennogo resheniya zadachi Koshi ODU 1-go porjadka [Custom Excel VBA Functions For Numerical Solution of a First-Order Cauchy Ode] / O. A. Sdvizhkov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal], No. 4 (106), 2021, Part 1, pp. 35-40 [in Russian]
9. Arrowsmith D. Obyknoennye differencial'nye uravneniya. Kachestvennaya teoriya s prilozhenijami [Ordinary Differential Equations: A Qualitative Approach with Applications]: Translation from English / D. Arrowsmith, C. M. Place. - Moscow: Mir, 1986 – 243 p. [in Russian]
10. Sdvizhkov O. A. DEcode (pol'zovatel'skie funkcii) [DEcode (custom functions)] [Electronic resource]. – URL: [https://oas.ucoz.com/load/odu\\_polzovatel'skie\\_funkcii/1-1-0-35](https://oas.ucoz.com/load/odu_polzovatel'skie_funkcii/1-1-0-35) (accessed: 20.01.2021) [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.005>**ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ  
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОТОКА ПАРОВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ**

Научная статья

**Тазмеев Г.Х.<sup>1</sup>, Тазмеев Х.К.<sup>2,\*</sup>, Тазмеева Р.Н.<sup>3</sup>, Талипова И.П.<sup>4</sup>, Тазмеев Б.Х.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4</sup> Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия;<sup>5</sup> Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

\* Корреспондирующий автор (tazmeevh[at]mail.ru)

**Аннотация**

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования газового разряда с проточным жидким электролитным катодом в условиях горения внутри камеры со стенками из огнеупорного материала. Медный анод располагался над катодом. Межэлектродное расстояние составило 20 см. В качестве электролита были использованы водные растворы хлорида натрия с концентрацией 0,2-0,3 моль/л. Источником электрического питания служил трехфазный выпрямитель с напряжением на выходе 2100 В. Разряд горел устойчиво без балластного резистора в диапазоне мощности 25-30 кВт. Получен поток пароводяной плазмы с массовой скоростью 1,0-1,7 г/с. Суммарные тепловые потери через электроды не превышали 30 % от потребляемой мощности.

**Ключевые слова:** газовый разряд, электролитный катод, пароводяная плазма, тлеющий разряд с электролизом.

**GAS DISCHARGE WITH A LIQUID ELECTROLYTE CATHODE  
IN CREATING A FLOW OF STEAM WATER PLASMA**

Research article

**Tazmeev G.Kh.<sup>1</sup>, Tazmeev Kh.K.<sup>2,\*</sup>, Tazmeeva R.N.<sup>3</sup>, Talipova I.P.<sup>4</sup>, Tazmeev B.Kh.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4</sup> Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russia;<sup>5</sup> Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

\* Corresponding author (tazmeevh[at]mail.ru)

**Abstract**

The current article presents the results of an experimental study of a gas discharge with a flowing liquid electrolyte cathode under combustion conditions inside a chamber with walls made of refractory material. The copper anode was located above the cathode. The interelectrode distance was 20 cm. Aqueous solutions of sodium chloride with a concentration of 0.2-0.3 mol / l were used as an electrolyte. The electric power source was a three-phase rectifier with an output voltage of 2100 V. The discharge burned steadily without a ballast resistor in the power range of 25-30 kW. As a result, the researchers obtained a flow of steam water plasma with a mass velocity of 1.0-1.7 g/s. The total heat loss through the electrodes did not exceed 30% of the overall power consumption.

**Keywords:** gas discharge, electrolyte cathode, steam water plasma, glow discharge with electrolysis.

**Введение**

Жидкий электролит, используемый в качестве катода, подвергается интенсивному тепловому воздействию. Электролит испаряется, распыляется, частично поступает в разрядную область и участвует в образовании плазмы. Количество рабочего электролита убывает. Убыль электролита растет при повышении тока [1], [2], [3]. Массовая скорость убыли зависит от тепловыделения внутри электролита и условий отвода тепла от электролита [2]. На практике реализованы режимы горения разряда, при которых убыль электролита происходит с массовой скоростью до 1,5 г/с [3]. Плазменные потоки с такими массовыми расходами вполне приемлемы для энергоемких плазменных технологий. К примеру, в работах [4], [5], [6] показана возможность переработки отходов полимерных материалов. Разряд горел в небольшом вертикальном зазоре между жидким электролитом и металлическим электродом. Его высота была в пределах 3-4 мм. Такие небольшие размеры не позволяли ввод реагентов в разрядную область, где концентрация химически активных частиц наиболее высока. Реагенты подавались в плазменный поток на значительном удалении от разрядной области. Тем не менее был получен синтез-газ с достаточно хорошим химическим составом. Процесс протекал медленно и с большими затратами энергии. Снижение энергоемкости и ускорение процесса возможно при вводе реагентов непосредственно в разрядную область. Однако в этих условиях газовый разряд мало изучен. Имеются работы, в которых исследования проведены при небольших токах [7], [8]. При многократном увеличении тока физическая картина явлений может существенно меняться. В связи с этим целью данной работы явилось исследование газового разряда в сильноточных режимах горения для создания потока пароводяной плазмы в диапазонах мощности 25-30 кВт.

**Эксперимент**

На рис. 1 представлена схема газоразрядного устройства (генератора плазмы) с источником питания. Разряд зажигается между катодным узлом 1 и анодом 2 внутри камеры, состоящей из корпуса 3 и футеровки 4. Выходной канал разрядной камеры удлинен на 50 см и снабжен металлическим кожухом 5. Подробное описание катодного узла приводится в [3]. Стрелками указаны направления потоков электролита. Электролит циркулирует через катодный узел с фиксированной массовой скоростью  $m$ . Часть электролита распыляется с открытой поверхности и поступает в разрядную область. Межэлектродное расстояние  $l$  составляет 20 см. Анод представляет собой медный стержень с диаметром 25 мм. Он охлаждается водой. Корпус 3 разрядной камеры изготовлен из асбоцементных материалов, а футеровка 4 выполнена из огнеупорных кирпичей.

Электрическое питание подавалось от трехфазного двухполупериодного выпрямителя, подключенного к вторичным обмоткам повышающего трансформатора. Пульсации напряжения сглаживались C-L-C фильтром. Ток менялся ступенчатым варьированием балластного резистора  $R$ .

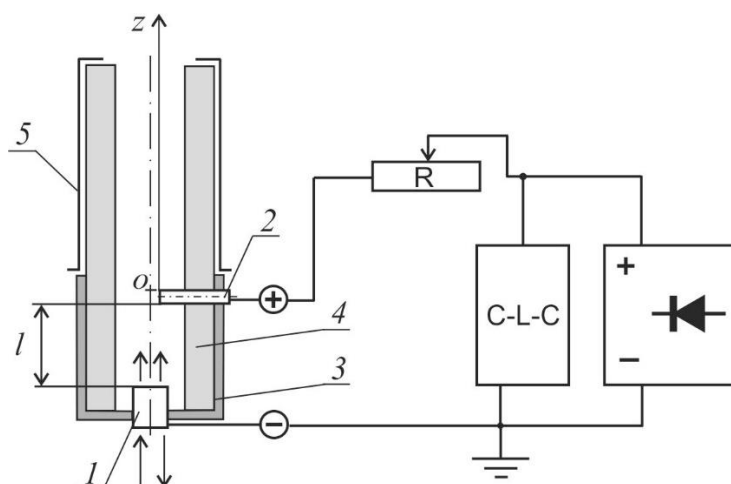


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки:

1 – катодный узел; 2 – анод; 3 – корпус камеры; 4 – футеровка;  
5 – металлический кожух выходного канала разрядной камеры

Жидким электролитным катодом служили водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью  $\sigma$  в пределах 10-15 мСм/см. При использовании таких растворов электролитов обеспечивается стабильное горение разряда на больших межэлектродных расстояниях [9].

В процессе горения разряда электролит расходуется на образование плазменного потока. Массовую скорость  $G$  убыли электролита можно считать численно равной массовому расходу потока плазмы. Убыль электролита компенсировалась добавлением дистиллированной воды во время работы генератора плазмы.

Для исследования тепловых и электрических характеристик применялись методики, описание которых даны в работах [2], [3]. Напряжение  $U$  и ток  $I$  регистрировались цифровым запоминающим осциллографом АКИП-15/1 с полосой пропускания 25 МГц. Удельная электрическая проводимость  $\sigma$  электролита определялась методом прямой кондуктометрии с помощью прибора «АНИОН 4150». Температура в плазменном потоке измерялась платинородиевой термопарой ПР-30/6 на разных расстояниях  $z$  от анода. Термопара перемещалась с помощью координатного устройства в трёх взаимно-перпендикулярных направлениях.

### Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 2 приведены осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$  на генераторе плазмы. Эти параметры подвержены пульсациям.

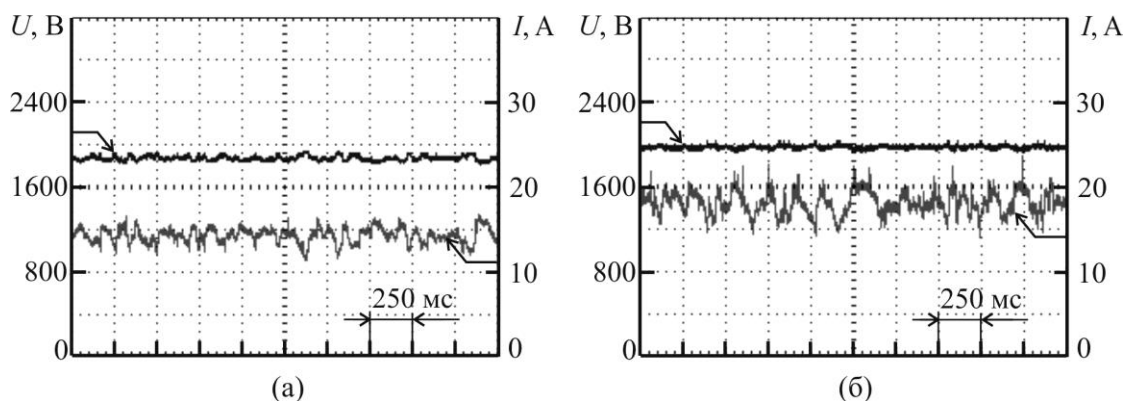


Рис. 2 – Осциллограммы тока и напряжения:

(а) –  $R = 14$  Ом; (б) – 0

Примечание:  $\sigma = 11$  мСм/см;  $m = 12$  г/с

Как видно из сравнения осциллограмм, при повышении тока амплитуда его пульсаций увеличивается. По-видимому, усиление пульсаций вызваны уменьшением сопротивления балластного резистора. Аналогичные закономерности наблюдаются и в разряде, который горит в открытом воздухе [3]. Наличие пульсаций тока и напряжения является характерной особенностью газового разряда между жидким электролитным катодом и металлическим анодом.

Еще одна характерная особенность разряда проявляется при изменении интенсивности течения электролита через зону привязки разряда к катоду. В условиях горения разряда в открытом воздухе происходит повышение тока при увеличении расхода электролита [3]. Такая закономерность выявлена и в данной работе. Полученные результаты представлены на рис. 3а.

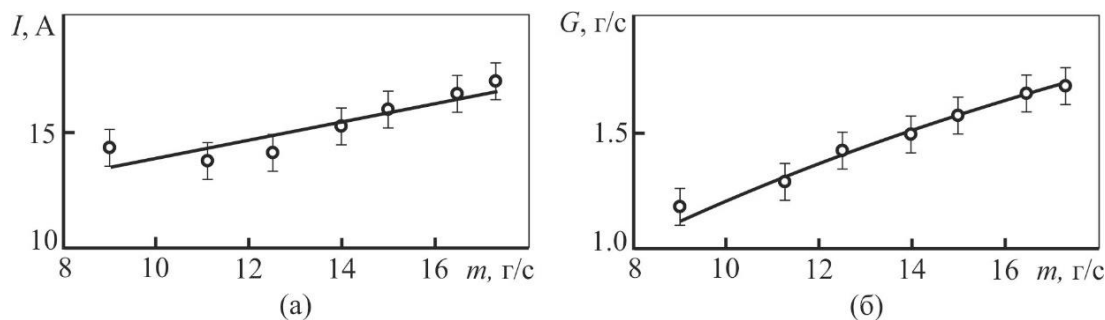


Рис. 3 – Зависимости тока (а) и массового расхода плазмы (б) от массовой скорости потока электролита, протекающего через катодный узел

Примечание:  $\sigma = 11 \text{ мСм/см}$ ;  $R = 0$

При увеличении массовой скорости потока электролита растет массовый расход потока плазмы (рис.3б). Закономерности изменения тока и массового расхода потока плазмы одинаковы. Такая корреляция между этими двумя параметрами свидетельствует о наличии значительного ионного тока. Ионы переносятся в плазму из катода в составе капелек раствора [10]. Чем больше капелек распыляется, тем больше ионов поступает в разрядную область и тем больше становится ток.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют режимы работы генератора плазмы при нулевом сопротивлении балластного резистора ( $R = 0$ ). В этом случае исключаются потери электрической энергии на нагрев балластного резистора. На рис. 4 представлены энергетические характеристики генератора плазмы, полученные в режимах работы без балластного резистора.

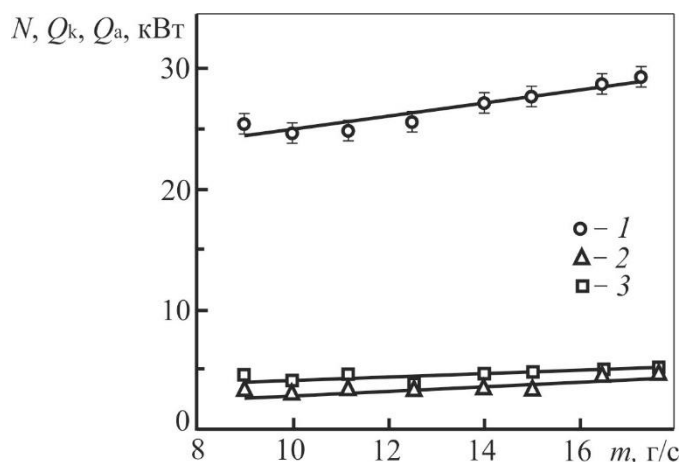


Рис. 4 – Мощности генератора плазмы ( $N$ ) и тепловых потерь через электроды ( $Q_k$  и  $Q_a$ ) в зависимости от массовой скорости потока электролита  $m$

Примечание:  $R = 0$ ;  $\sigma = 11 \text{ мСм/см}$ ; 1 –  $N$ ; 2 –  $Q_k$ ; 3 –  $Q_a$

Тепловые потери через электроды сравнительно малы. Мощности тепловых потерь через катод  $Q_k$  и анод  $Q_a$  отличаются незначительно. Повышение расхода электролита через катодный узел приводит к некоторому увеличению тепловых потерь  $Q_k$  и  $Q_a$ . При этом повышается мощность генератора плазмы  $N$ . Отношение суммы  $Q_k$  и  $Q_a$  к  $N$  меняется незначительно. Суммарные тепловые потери через электроды не превышают 30 % от потребляемой мощности.

В таблице 1 приведены результаты измерений температуры плазмы с помощью платинородиевой термопары.

Таблица 1 – Температура потока плазмы

| $z$ , см | 55             | 60             | 65             | 70             | 75            | 80            |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| $t$ , °C | $1400 \pm 100$ | $1350 \pm 100$ | $1250 \pm 100$ | $1150 \pm 100$ | $950 \pm 100$ | $800 \pm 100$ |

На выходе из генератора плазмы создается поток плазмы с достаточно большой температурой несмотря на значительное удаление от разрядной области. Как показывает термодинамический анализ, при таких температурах может быть осуществлена плазменная конверсия отходов полиэтилена и полиэтилентерефталата в синтез-газ [11].

### Заключение

Экспериментально показана возможность применения газового разряда с жидким электролитным катодом для получения потока пароводяной плазмы в диапазоне мощности 25-30 кВт. Основные параметры плазменного потока: массовый расход 1,1- 1,7 г/с; температура  $1400 \pm 100$  °C на удалении 0,5 м от разрядной области.

Из полученных результатов следует, что мощные газовые разряды с жидким электролитным катодом могут быть рассмотрены наряду с дуговыми плазмотронами как источники энергоносителей в плазмохимических процессах, в частности, в плазменной газификации.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Сироткин Н.А. Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока / Н.А. Сироткин, В.А. Титов // Прикладная физика. – 2016. – № 6. – С. 25-31.
2. Тазмеева Р.Н. Экспериментальное исследование массового уноса жидкого электролитного катода под воздействием газового разряда / Р.Н. Тазмеева, Б.Х. Тазмеев // Прикладная физика. – 2014. – № 1. – С. 35-37.
3. Tazmeev Kh.K. The influence of the mass flow rate of the electrolyte through the following cathode on the energy characteristics of the gas discharge / Kh.K. Tazmeev, I.M. Arslanov, G.Kh. Tazmeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – V. 567. – №1. – P. 012001.
4. Фридланд С.В. Получение синтез-газа плазмохимической переработкой отходов / С.В. Фридланд, А.Х. Тазмеев, М.Н. Мифтахов // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – №6. – С. 10-15.
5. Тазмеев А.Х. Содержание оксида углерода и углеводородов в синтез-газе при плазмохимической переработке полимерных отходов / А.Х. Тазмеев, С.В. Фридланд, М.Н. Мифтахов // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – №6. – С. 43-46.
6. Tazmeev A.K. The material balance of process of plasma-chemical conversion of polymer wastes into synthesis gas / A.K. Tazmeev, R.N. Tazmeeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 789. – №1. – P. 012058.
7. Tazmeev G.K. Study of gas discharge with a liquid cathode at maximum thermal load to the cathode / G.K. Tazmeev, B.A. Timerkaev, K.K. Tazmeev et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 789. – № 1. – P. 012060.
8. Тазмеев Б.Х. Электрический разряд с электролитным катодом и его электрические характеристики / Б.Х. Тазмеев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 1999. – № 4. – С. 71-76.
9. Тазмеев Х.К. Влияние локализации зоны привязки высокопоточного разряда к жидкому электролиту на формирование плазменного столба / Х.К. Тазмеев, И.М. Арсланов, Г.Х. Тазмеев // Прикладная физика. – 2013. – № 4. – С. 33-37.
10. Tazmeev G.K. About the mechanism of electric discharge between the electrolyte flow and the metallic anode / G.K. Tazmeev, B.A. Timerkaev, K.K. Tazmeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1328. – № 1. – P. 012075.
11. Tazmeev A.Kh. // Thermodynamic analysis of the plasma-chemical conversion of polymers into synthesis gas / A.Kh. Tazmeev, R.N. Tazmeeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. V. 1058. – № 1. – P. 012036.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Sirotkin N. A. Eksperimental'noe issledovanie nagreva zhidkogo katoda i perenosa ego komponentov v gazovuyu fazu pod dejstviem razrjada postojannogo toka [Experimental Study of the Heating of a Liquid Cathode and the Transfer of Its Components to the Gas Phase Under the Action of a DC Discharge] / N. A. Sirotkin, V. A. Titov // Prikladnaja fizika [Applied Physics]. - 2016. - No. 6, pp. 25-31 [in Russian]
2. Tazmeeva R.N. Eksperimental'noe issledovanie massovogo unosa zhidkogo ehlektrolitnogo katoda pod vozdejstviem gazovogo razrjada [Experimental Study of Mass Entrainment of a Liquid Electrolyte Cathode Under the Influence of a Gas Discharge] / R.N. Tazmeeva, B. Kh. Tazmeev // Prikladnaja fizika [Applied Physics]. - 2014. - No. 1, pp. 35-37 [in Russian]
3. Tazmeev Kh.K. The influence of the mass flow rate of the electrolyte through the following cathode on the energy characteristics of the gas discharge / Kh.K. Tazmeev, I.M. Arslanov, G.Kh. Tazmeev // Journal of Physics: Conference Series. - 2014. - V. 567. - No. 1. - P. 012001.
4. Fridland S. V. oluchenie sintez-gaza plazmokhimicheskoyj pererabotkojj otkhodov [Radiation of synthesis gas by plasma-chemical waste processing] / S. V. Fridland, A. H. Tazmeev, M. N. Miftakhov // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. - 2006. - No. 6, pp. 10-15 [in Russian]
5. Tazmeev A. Kh. SodVstavit' erzhanie oksida ugleroda i uglevodorodov v sintez-gaze pri plazmokhimicheskoyj pererabotke polimernykh otkhodov [Sodification of carbonmonoxide and hydrocarbons in synthesis gas during plasma-chemical processing of polymer waste] / A. Kh. Tazmeev, S. V. Fridland, M. N. Miftakhov // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. - 2006. - No. 6, pp. 43-46 [in Russian]
6. Tazmeev A.K. The material balance of process of plasma-chemical conversion of polymer wastes into synthesis gas / A.K. Tazmeev, R.N. Tazmeeva // Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - V. 789. - No. 1. - P. 012058.
7. Tazmeev G.K. Study of gas discharge with a liquid cathode at maximum thermal load to the cathode / G.K. Tazmeev, B.A. Timerkaev, K.K. Tazmeev et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 789. – № 1. – P. 012060.
8. Tazmeev B. Kh. Ehlektricheskij razrjad s ehlektrolitnym katodom i ego ehlektricheskie kharakteristiki [Electric Discharge With an Electrolyte Cathode and Its Electrical Characteristics] / B. Kh. Tazmeev // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva [Bulletin of the Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev]. - 1999. - No. 4, pp. 71-76 [in Russian]
9. Tazmeev Kh. K. Vlijanie lokalizacii zony privjazki sil'notochnogo razrjada k zhidkomu ehlektrolitu na formirovanie plazmennogo stolba [Influence of Localization of the Binding Zone of a High-Current Discharge to a Liquid Electrolyte on the Formation of a Plasma Column] / Kh. K. Tazmeev, I. M. Arslanov, G. Kh. Tazmeev // Prikladnaya fizika [Applied Physics]. - 2013. - No. 4, pp. 33-37 [in Russian]
10. Tazmeev G.K. About the mechanism of electric discharge between the electrolyte flow and the metallic anode / G.K. Tazmeev, B.A. Timerkaev, K.K. Tazmeev // Journal of Physics: Conference Series – 2019. - V. 1328. - No. 1. - P. 012075.
11. Tazmeev A.Kh. // Thermodynamic analysis of the plasma-chemical conversion of polymers into synthesis gas / A.Kh. Tazmeev, R.N. Tazmeeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. V. 1058 – No. 1. - p. 012036.



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.006>**СКИН-ЭФФЕКТ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПРОВОДЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ  
ПРИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЕ ИМПУЛЬСА ТОКА**

Научная статья

**Тихомиров А.А.\***

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

\* Корреспондирующий автор (sasha.82[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье рассматривается случай скин-эффекта в проводнике при прямоугольной форме импульса тока на основании уравнений Максвелла. В работе определена величина падения напряжения на цилиндрическом проводнике в случае резкого скин-эффекта. Также получено выражение для эффективной глубины проникновения тока для прямоугольного импульса заданной длительности. На основании полученных выражений, приведен конкретный пример резкого скин-эффекта для цилиндрического медного проводника. Показано, что в случае резкого скин-эффекта снижаются требования к выбору материала проводника, а также слабо сказывается изменение длительности импульса. Полученные выражения также могут быть применены к проводнику кольцевого сечения.

**Ключевые слова:** скин-эффект, прямоугольная форма, импульс тока, глубина проникновения.

**SKIN EFFECT IN A CYLINDRICAL CIRCULAR CONDUCTOR WITH A RECTANGULAR PULSE SHAPE**

Research article

**Tikhomirov A.A.\***

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

\* Corresponding author (sasha.82[at]mail.ru)

**Abstract**

The article deals with the case of the skin effect in a conductor with a rectangular shape of the current pulse based on the Maxwell's equations. The study determines the value of the voltage loss in a cylindrical conductor in the case of a sharp skin effect along with obtaining an expression for the effective depth of current penetration for a rectangular pulse of a given duration. Based on the obtained expressions, the study presents a specific example of a sharp skin effect for a cylindrical copper conductor. It is shown that in the case of a sharp skin effect, the requirements for the choice of the conductor material are reduced, while the change in the pulse duration has a low effect. The resulting expressions can also be applied to an annular conductor.

**Keywords:** Skin effect, rectangular shape, current pulse, penetration depth.

**Введение**

Расчет скин-эффекта зависит от формы проводника, а также способа возбуждения в нем тока [1], [2]. Переходный процесс изменения плотности тока рассмотрен в [3], где показано смещение максимума тока от поверхности проводника в направлении его оси. Диффузии электромагнитного поля в массивные проводящие тела с произвольной гладкой поверхностью показана в [4], где методами пограничного слоя построено асимптотическое решение. Изменение плотности тока по радиусу проводника определяет неравномерность выделения тепловой энергии, что может находить применение в технике, например для предотвращения образования гололеда на линиях электропередач за счет пропускания по линии высокочастотной составляющей тока. Наличие скин-эффекта также влияет на величину активного сопротивления проводника и, следовательно, на потери энергии.

Наличие скин-эффекта влияет на величину активного сопротивления проводника и, следовательно, на потери энергии.

Для синусоидальной формы тока и проводника круглого сечения решение задачи распределения плотности тока не представляет особой сложности [5]. Однако в промышленности используются аноды больших размеров с возбужденным в них импульсным током близким к прямоугольной форме.

Распределение поля в проводниках круглого сечения может быть выражено через функции Бесселя и использовано для вычисления распространения поля вдоль проводника. Такой подход позволяет упростить расчеты и проводить широкий спектр исследований. В [6] показано, что форма проводника существенно влияет на скин-эффект, что должно быть учтено при его расчете. В работах [7] рассмотрен метод пограничного слоя для расчета электромагнитного поля в массивных проводниках любой формы.

Исходя из этого, актуальной задачей является рассмотрение случая резкого скин-эффекта, когда глубина проникновения тока гораздо меньше радиуса цилиндра, при приложении прямоугольного импульса напряжения. Целью настоящей работы является рассмотрение скин-эффекта в цилиндрическом проводнике круглого сечения при приложении импульса прямоугольной формы методом, не связанным с необходимостью вычисления квадратур.

Так известно, что мощность джоулева тепла, выделяющаяся в цилиндре равна произведению площади поверхности цилиндра на величину вектора Пойтинга на этой поверхности (т.к. на боковой поверхности цилиндра вектор Пойтинга перпендикулярен к поверхности) [8].

$$P = \Pi S = E_0 H_0 S = \frac{S}{\sigma} \delta_0 H_0 \quad (1)$$

здесь  $\delta_0$  и  $H_0$  значения плотности тока и напряженности магнитного поля на поверхности цилиндра;  $\sigma$  – проводимость материала цилиндра.

Количество тепла, выделившееся в цилиндре за время  $t$  равно:

$$Q = \int_0^t P(t) dt = \frac{2\pi r_0 l}{\sigma} \int_0^t \delta_0 H_0 dt \quad (2)$$

Значение величины  $H_0$  определяется непосредственно:

$$H_0 = H(r_0, t) = \frac{J(t)}{2\pi r_0} \quad (3)$$

Для определения величины  $\delta_0$  рассмотрим уравнения Максвелла:

$$\text{rot} H = \delta, \quad \text{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad E = \frac{\delta}{\sigma}.$$

В цилиндрической системе координат при направлениях  $H$  и  $E$  как показано на рисунке 1 значения  $\text{rot} H$  и  $\text{rot} E$  будут следующие:

$$\text{rot} H = \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{H}{r}, \quad \text{rot} E = -\frac{\partial E}{\partial r}.$$

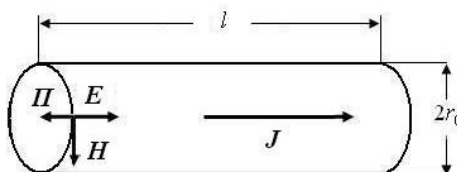


Рис. 1 – Направления магнитного и электрического полей в цилиндрическом проводнике

В случае малой глубины проникновения тока по сравнению с радиусом цилиндра  $\frac{H}{r} \ll \frac{\partial H}{\partial r}$  задачу можно считать одномерной. Введем новую ось  $x$  направленную от какой-либо точки поверхности внутрь цилиндра. Тогда уравнения Максвелла запишутся:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial x} &= -\delta, \\ \frac{\partial E}{\partial x} &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \\ E &= \frac{\delta}{\sigma}. \end{aligned}$$

Разделяя переменные, получим отдельные дифференциальные уравнения для плотности тока и напряженности магнитного поля:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} = \mu \sigma \frac{\partial \delta}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

Граничные и начальные условия будут следующие:

$$H(0, t) = \frac{J(t)}{2\pi r_0}, \quad 2\pi r_0 \int_0^\infty \delta(x, t) dx = J(t), \quad H(x, 0) = 0, \quad \delta(x, 0) = 0 \quad (5)$$

Так как более легкие граничные условия заданы для  $H$ , то удобнее сначала решать уравнение для  $H$ , а затем

$$\delta = -\frac{\partial H}{\partial x}.$$

определять  $\delta$  из выражения

Решение уравнения для  $H$  типа (4) с граничными условиями (5) будет иметь следующий вид [9]:

$$H(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\pi}{\mu\sigma}}} \int_0^t \frac{x}{(t-\tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(t-\tau)}\right) \frac{J(\tau)}{2\pi_0} d\tau \quad (6)$$

Для прямоугольного импульса  $J(t) = J_0 = \text{const}$ , тогда решение упрощается [10]:

$$H(x, t) = \frac{J_0}{2\pi_0} \left[ 1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{t}{\mu\sigma}}}\right) \right] \quad (7)$$

Здесь  $\Phi$  – интеграл ошибок, значения которого имеются в таблицах:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\alpha^2} d\alpha, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2}, \quad z = \frac{x}{2\sqrt{\frac{t}{\mu\sigma}}}.$$

Для плотности тока  $\delta$  получим следующее выражение:

$$\delta = -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{J_0}{2\pi_0} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{J_0}{2\pi_0 \sqrt{\frac{\pi t}{\mu\sigma}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4t/\mu\sigma}\right) \quad (8)$$

Проверка показывает, что решение (8) удовлетворяет уравнению (4) и граничному условию

$$2\pi_0 \int_0^\infty \delta(x, t) dx = J_0.$$

На поверхности цилиндра  $x=0$  и

$$\delta_0 = \frac{J_0}{2\pi_0 \sqrt{\frac{\pi t}{\mu\sigma}}} \quad (9)$$

### Основные результаты

Из выражения (9) видно, что для идеального прямоугольного импульса на переднем фронте плотность тока неограниченна на поверхности цилиндра. Однако это не приводит к расходящемуся интегралу для количества тепла:

$$Q = \frac{2\pi_0 l}{\sigma} \int_0^t \delta_0 H_0 dt = \frac{2\pi_0 l}{\sigma} \int_0^t \frac{J_0}{2\pi_0 \sqrt{\frac{\pi t}{\mu\sigma}}} \frac{J_0}{2\pi_0} dt = \frac{J_0^2 l t}{\sigma 2\pi_0 \sqrt{\frac{\pi t}{4\mu\sigma}}} \quad (10)$$

Таким образом, эффективная глубина проникновения тока для прямоугольного импульса длительностью  $\tau$  равна:

$$h = \sqrt{\frac{\pi\tau}{4\mu\sigma}} \approx 0,88 \sqrt{\frac{\tau}{\mu\sigma}} \quad (11)$$

Как известно, для синусоидальной формы тока эффективная глубина проникновения тока равна:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\tau}{\pi\mu\sigma}} \approx 0,8 \sqrt{\frac{\tau}{\mu\sigma}} \quad (12)$$

где  $\tau$  – длительность полупериода. Как видно из (11) и (12) форма фронтов импульса незначительно влияет на эффективную глубину проникновения тока, следовательно, и на выделение тепла за счет омических потерь, если в формулу (10) для тока подставлять его эффективное значение  $J_0^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau J^2(t) dt$ ,  $\tau$  – длительность импульса (для однополярного импульса).

Однако влияние фронтов импульса можно учесть точно, если подставить в выражение (6) соответствующее значение  $J(t)$ .

Для ферромагнитных материалов уравнения Максвелла (4) становятся нелинейными, т. к. магнитная проницаемость среды зависит от величины напряженности магнитного поля. Как показал Л.Р. Нейман [11], эффективная глубина проникновения синусоидального тока в этих условиях несколько уменьшается и с большой точностью выражается

следующей формулой  $h_\phi = \frac{1}{\sqrt{\omega\mu_e\sigma}}$ , где  $\mu_e$  – значение абсолютной магнитной проницаемости на поверхности проводника, определяемое действующим значением напряженности магнитного поля по кривой гистерезиса

$$H_{дейст} = \frac{J_{дейст}}{2\pi r_0}.$$

Эта формула весьма точна, если  $H_{дейст}$  больше значения, при котором  $\mu$  имеет максимум. При меньших значениях  $H_{дейст}$  формула может быть использована для ориентировочных расчетов. Для случая однополярного

импульса  $h_\phi = \sqrt{\frac{\tau}{\pi\mu_e\sigma}}.$

Определим величину падения напряжения на цилиндрическом проводнике длиной  $l$  при прямоугольной форме импульса при наличии резкого скин-эффекта.

$$\Delta U = \frac{P}{J} = \frac{2\pi r_0 l}{\sigma} \delta_0 H_0 = \frac{J_0 l}{2\pi r_0 \sigma \sqrt{\frac{\pi}{\mu\sigma}}} = \frac{Q(t)}{2J\sqrt{t\tau}} \quad (13)$$

$\tau$  – длительность импульса.

Как видно из формулы (13), падение напряжения на проводнике (без учета индуктивности) не постоянно и уменьшается во время импульса как  $\sqrt{t}$ . На переднем фронте идеального прямоугольного импульса оно становится бесконечным. При реальных импульсах по формуле (13) можно рассчитывать падение напряжения во время импульса, начиная с окончания переднего фронта.

Рассмотрим конкретный пример, приведенных выше теоретических расчетов. Рассмотрим скин-эффект в медном проводнике, в случае резкого скин-эффекта. Длительность импульса примем  $\tau = 1$  мкс, радиус проводника  $r_0 = 1$  см, длина проводника  $l = 1$  см, и токе  $J = 1$  кА. Тогда получим:

$$Q = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{с} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}, \Delta U = 0,014 \frac{1}{\sqrt{t}} \text{ В}.$$

При произвольных размерах и материале проводника и размерах импульса тока, получим:

$$h = 0,1k \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \text{ (мм)},$$

$$Q = 2,8 \cdot 10^{-5} k \frac{J_0 l}{r_0} \sqrt{\tau \mu} \text{ (Дж)}$$

$$\Delta U = 0,014 k \frac{J_0 l}{r_0} \sqrt{\frac{\mu}{t}} \text{ (В)}$$

здесь  $\tau$  – длительность импульса в мкс,

$J_0$  – амплитуда импульса тока в кА,

$l$  и  $r_0$  – длина и радиус проводника в см,

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества,

$$k = \sqrt{\frac{\sigma_m}{\sigma}}$$

Для различных материалов значения  $k$  будут следующие (Таблица 1):

Таблица 1 – Значения  $k$  для различных материалов

| Материал | Cu | W    | Mo   | Al   | Ni  | Сталь |
|----------|----|------|------|------|-----|-------|
| $k$      | 1  | 1,77 | 1,80 | 1,27 | 2,4 | 2,4   |

Приведем графические иллюстрации для сравнения соответствующих зависимостей при различных материалах проводника для условий рассмотренного примера. На рисунке 2 представлена зависимость глубины проникновения поля от длительности импульса.

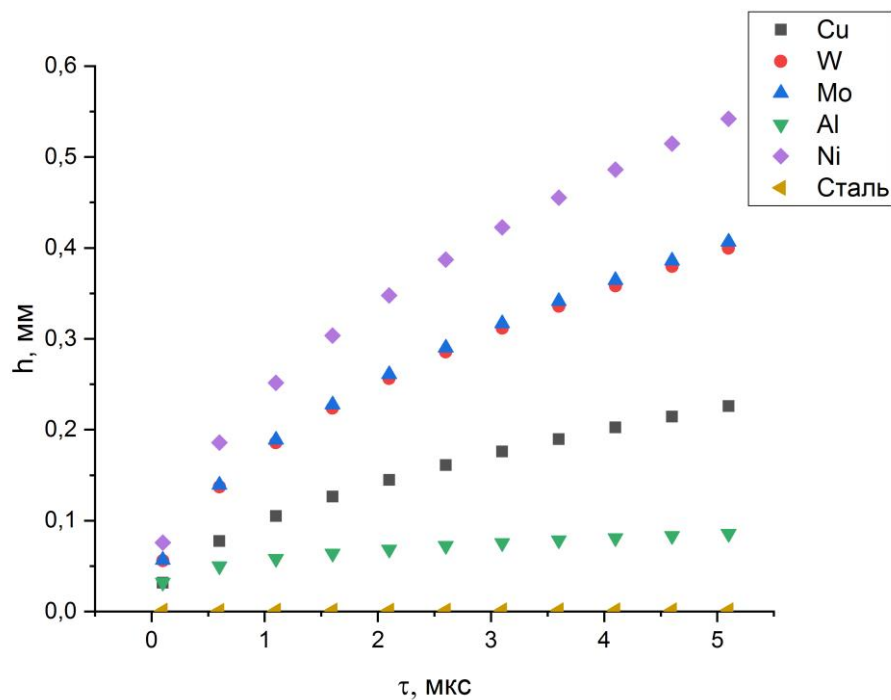


Рис. 2 – Зависимость проникновения поля от величины длительности импульса тока

На рисунке 3 представлена зависимость выделяемой энергии от длительности импульса.

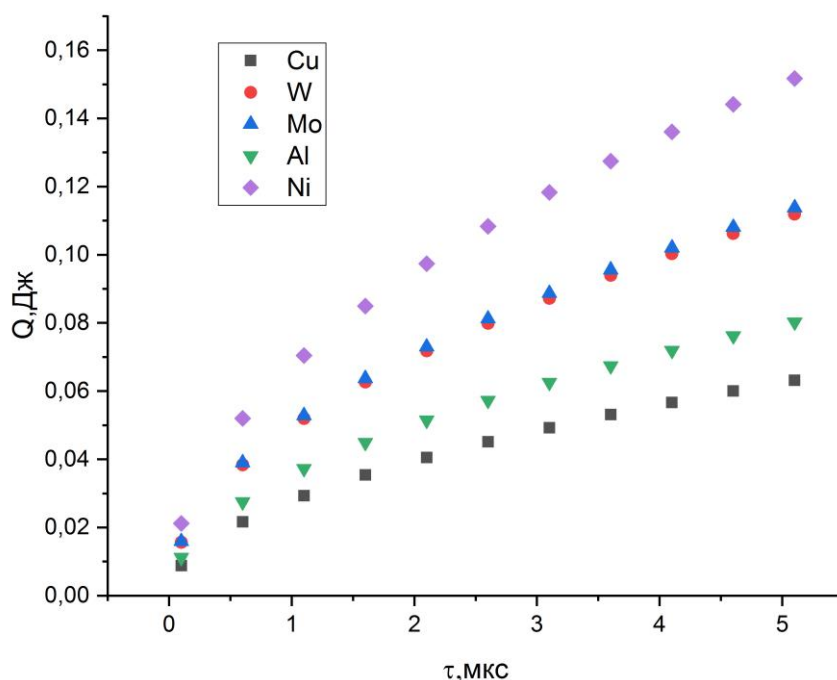


Рис. 3 – Зависимость выделяемой энергии от длительности импульса тока

На рисунке 4 представлена зависимость падения напряжения от длительности импульса.

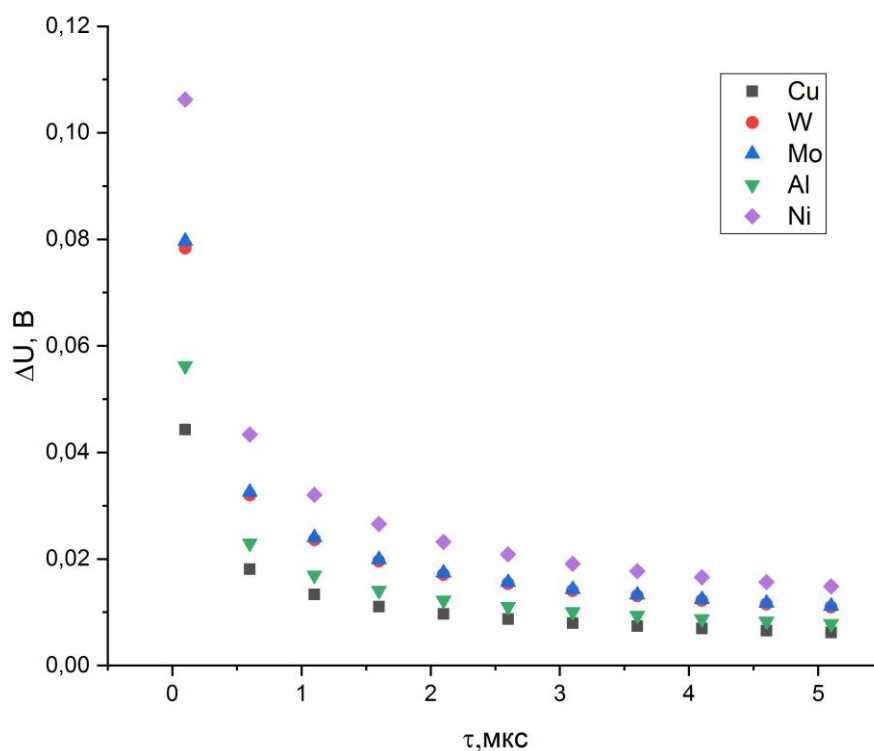


Рис. 4 – Зависимость падения напряжения от длительности импульса тока

Все сказанное выше относится и к проводнику кольцевого сечения, если глубина проникновения тока  $h$  меньше толщины кольца.

### Заключение

Интересным результатом полученных выражений (6), (11), (12) является то, что при резком скин-эффекте выделившееся тепло пропорционально величине  $\sqrt{\frac{t}{\sigma}}$ , а не  $\frac{t}{\sigma}$  как при отсутствии скин-эффекта. А это означает, что снижаются требования к выбору материала проводника, и слабо сказывается изменение длительности импульса.

Так как обычно диаметр анода больше диаметра соединительных проводов, то если анод не ферромагнитный, омические потери в нем будут значительно меньше, чем в подводящих проводах.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Ломан В. А. Исследование влияния формы проводника на скин-эффект / В. А. Ломан, А. В. Ридель // Труды XIX Всероссийской научно-технической конференции Наука промышленность оборона 2018. – С. 73-75.
2. Булгаков О. М. Учет скин-эффекта в проводниках с прямоугольным поперечным сечением / О. М. Булгаков, В. В. Лупандин, Б. К. Петров и др. // XV Международная научно-техническая конференция “Радиолокация, навигация, связь”. 2009 – С. 951-957.
3. Козлов В. И. Скин-эффект в цилиндрическом проводнике / В. И. Козлов Физическое образование в Вузах 2002. – № 3 (8) – С. 24-26.
4. Каган В. И. Переходный процесс плотности тока в проводниках при скин-эффекте / В. И. Каган // Электромагнитные волны и электронные системы 2009 – № 10 (14) – С. 62-64.
5. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Том VIII, Москва, «Наука», 1982.
6. Фридман Б. Э. Скин-эффект в массивных проводниках электроимпульсных установок. Электромагнитное поле массивных проводников / Б. Э. Фридман, В. И. Каган // Журнал технической физики 2002 – № 9 (72) – С. 44-51.
7. Мищенко Е. Н. Скин-эффект в обмотках индукторов силовых устройств / Е. Н. Мищенко, В. Ф. Лопатин // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике, 2018 – № 4-1(10) – С. 5-13.
8. Фридман Б. Э. Поверхностный эффект в коаксиальных кабелях импульсных установок / Б. Э. Фридман, М. В. Медведев // Известия Российской академии наук. Энергетика 2019 – № 5 – С. 66-79.
9. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. М. «Наука», 1960 г., 724 с.
10. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949, 376 с.
11. Нейман Л. Р. Теоретическая электротехника: Избранные труды / Л. Р. Нейман Л. «Наука», 1988, 334 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Loman V. A. Issledovanie vlijaniya formy provodnika na skin-ehffekt [Study of the Influence of the Shape of the Conductor on the Skin Effect] / V. A. Loman, A. V. Riedel // Trudy XIX Vserossiyskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Nauka promyshlennost' oborona 2018 [Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference Science Industry Defense 2018]. - pp. 73-75 [in Russian]
2. Bulgakov O. M. Uchet skin-ehffekta v provodnikakh s prjamougol'nym poperchennym secheniem [Accounting for the Skin Effect in Conductors With a Rectangular Peppered Cross-Section] / O. M. Bulgakov, V. V. Lupandin, B. K. Petrov et al. // Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija “Radiolokacija, navigacija, svjaz” [XV International Scientific and Technical Conference "Radar, Navigation, Communication". 2009]-pp. 951-957 [in Russian]
3. Kozlov V. I. Skin-ehffekt v cilindricheskom provodnike [Skin Effect in a Cylindrical Conductor] / V. I. Kozlov // Fizicheskoe obrazovanie v Vuzakh 2002 [Physical Education in Higher Education Institutions 2002]. - No. 3 (8), pp. 24-26 [in Russian]
4. Kagan V. I. Perekhodnyj process plotnosti toka v provodnikakh pri skin ehffekte [Transient Process of Current Density in Conductors Under the Skin Effect] / V. I. Kagan // Ehlektromagnitnye volny i ehlektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems] 2009-No. 10 (14), pp. 62-64 [in Russian]
5. Landau L. D. Ehlektrodinamika sploshnykh sred [Electrodynamics of Continuous Media Volume VIII] / L. D. Landau, E. M. Lifshitz, Moscow, Nauka, 1982 [in Russian]
6. Friedman B. E. Skin-ehffekt v massivnykh provodnikakh ehlektroimpul'snykh ustanovok. Ehlektromagnitnoe pole massivnykh provodnikov [Skin Effect in Massive Conductors of Electric Pulse Installations. Electromagnetic Field of Massive Conductors] / V. I. Kagan // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics] 2002-No. 9 (72), pp. 44-51 [in Russian]
7. Mishchenko E. N. Skin-ehffekt v obmotkakh induktorov silovykh ustrojstv [Skin-Effect in the Windings of Inductors of Power Devices] / E. N. Mishchenko, V. F. Lopatin // Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii, obrazovanii i ehkonomike [Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Education and Economics], 2018-No. 4-1 (10) - pp. 5-13 [in Russian]
8. Fridman B. E. Poverkhnostnyj ehffekt v koaksial'nykh kabel'nykh impul'snykh ustanovok [Surface Effect in Coaxial Cables of Pulsed Installations] / B. E. Fridman // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Economy] 2019-No. 5-pp. 66-79 [in Russian]
9. Tikhonov A. N. Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of Mathematical Physics] / A. N. Tikhonov, A. A. Samarsky. M. "Nauka", 1960, 724 p. [in Russian]
10. Neyman L. R. Poverkhnostnyj ehffekt v ferromagnitnykh telakh [Surface Effect in Ferromagnetic Bodies] / L. R. Neyman. M.; L.: Gosenergoizdat, 1949, 376 p. [in Russian]
11. Neyman L. R. Teoreticheskaja ehlektrotehnika: Izbrannye trudy [Theoretical Electrical Engineering: Selected Works] / L. R. Neyman. "Nauka", 1988, 334 p. [in Russian]

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.007>КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ  
РАСЧЕТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АНАЛИЗА РИСКОВ  
И ПРОГНОЗИРОВАНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Научная статья

Александров А.Е.<sup>1</sup>, Аждер Т.Б.<sup>2,\*</sup>, Степанова И.В.<sup>3</sup>, Яшников Д.А.<sup>4</sup>, Ливинская Л.Б.<sup>5</sup><sup>1, 2, 3, 5</sup> МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия;<sup>4</sup> Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (AzhderTB[at]yandex.ru)

## Аннотация

При проведении анализа рисков и прогнозировании аварийных ситуаций к расчетным моделям предъявляются требования по обоснованию значений погрешностей и неопределенностей полученных результатов. Реализация этих требований рассматривается, как правило, применительно к диапазонам изменения исходных данных расчетной модели, которые должны быть согласованы с предполагаемой предметной областью исследования, а также со значениями неопределенности расчетной модели. В работе приводится комбинированная методика, позволяющая рассчитывать неопределенность выходной характеристики, обусловленной как детерминированными исходными параметрами, так и случайными, а также корректировать диапазоны изменения исходных параметров для уменьшения неопределенности выходной характеристики. Разработанная методика была использована для расчета неопределенности выходной характеристики применительно к вероятностному анализу хрупкого разрушения трубопроводов первого контура РУ типа ВВЭР при различных условиях эксплуатации и в аварийных режимах.

**Ключевые слова:** анализа рисков, прогнозирование, погрешность, неопределенность, детерминированные параметры, вероятностный анализ.

A COMBINED METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING THE UNCERTAINTIES OF THE CALCULATED  
RESULTS WHEN CONDUCTING RISK ANALYSIS AND PREDICTING EMERGENCY SITUATIONS

Research article

Aleksandrov A.E.<sup>1</sup>, Azhder T.B.<sup>2,\*</sup>, Stepanova I.V.<sup>3</sup>, Yashnikov D.A.<sup>4</sup>, Livinskaya L.B.<sup>5</sup><sup>1, 2, 3, 5</sup> MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia;<sup>4</sup> Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

\* Corresponding author (AzhderTB[at]yandex.ru)

## Abstract

When conducting risk analysis and predicting emergency situations, the calculation models are required to justify the values of errors and uncertainties of the results obtained. As a rule, the implementation of these requirements is viewed in relation to the ranges of changes in the initial data of the computational model, which must be consistent with the intended subject area of the study, as well as with the uncertainty values of the computational model. The article presents a combined method that allows for calculating the uncertainty of the output characteristic due to both deterministic initial parameters and random ones, as well as adjusting the ranges of changes in the initial parameters to reduce the uncertainty of the output characteristic. The developed method was used to calculate the uncertainty of the output characteristic in relation to the probabilistic analysis of the brittle fracture of the RU primary pipelines of the VVER type reactor plant under various operating conditions and in emergency conditions.

**Keywords:** risk analysis, forecasting, error, uncertainty, deterministic parameters, probabilistic analysis.

## Введение

При проведении анализа рисков и прогнозировании аварийных ситуаций к расчетным моделям помимо прочих предъявляются требования по обоснованию значений погрешностей и неопределенностей полученных результатов [1]. Эти требования необходимо обеспечить также при проведении аттестации программ для ЭВМ, используемых применительно к объектам ядерной энергетики [2]. Реализация этих требований рассматривается, как правило, применительно к диапазонам изменения исходных данных расчетной модели, которые должны быть согласованы с предполагаемой предметной областью исследования. Для выбранных диапазонов могут присутствовать особенности расчетной модели, приводящие к ее высокой чувствительности по отдельным исходным параметрам, и, как следствие, к большой неопределенности выходной характеристики. Особенно часто данная ситуация возникает, когда в качестве исходных данных при моделировании используются как детерминированные, так и случайные параметры [5], [7], [9]. В связи с этим, появляется дополнительная задача при проведении расчетов, связанная с анализом выбранных диапазонов исходных параметров и согласованием их со значениями неопределенностей расчетной модели.

Для решения этой задачи была рассмотрена следующая методика, используемая в обычной практике, основанная на линеаризации исходной расчетной модели, и применяемая к детерминированным процессам [3]. Заданная связь, в этом случае, между исходными параметрами и выходной характеристикой расчетной модели может быть представлена в виде следующей функциональной зависимости:

$$P_{out} = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$



где  $P_{out}$  - выходная характеристика расчетной модели,

$x_1, x_2, \dots, x_n$  - исходные параметры расчетной модели.

Внесение погрешностей в исходные параметры  $x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n$  приводит к возникновению неопределенности выходной характеристики  $P_{out} + \Delta P_{out}$ , которая может быть рассчитана на основе выше упомянутого метода линеаризации функции  $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$  [4]. В соответствии с этим методом математическое ожидание выходной характеристики составит:

$$M[P_{out}] = \varphi(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}) \quad (2)$$

а значение дисперсии:

$$D[P_{out}] = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2 \cdot D_{x_i} + 2 \sum_{i < j} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) \cdot K_{ij} \quad (3)$$

где  $D_{x_i}$  - значение дисперсии для  $i$ -го исходного параметра,

$K_{ij}$  - коэффициент корреляции между  $i$ -ым и  $j$ -ым исходными параметрами.

Если исходные параметры некоррелированные ( $K_{ij} = 0$ ), то формула (3) для вычисления дисперсии принимает более простой вид:

$$D[P_{out}] = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2 \cdot D_{x_i} \quad (4)$$

где  $\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)$  - коэффициенты чувствительности  $i$ -го исходного параметра.

Задавая номинальные значения исходных параметров, и используя зависимости (1), (2) и (3), можно рассчитать неопределенность выходной характеристики, которая обусловлена используемой расчетной программой.

### Комбинированная методика для обоснования неопределенностей расчетных результатов

Рассмотренная методика была модифицирована для случая, когда одна часть исходных данных является детерминированной, а другая часть – случайной, и использована применительно к вероятностному анализу хрупкого разрушения трубопроводов первого контура РУ типа ВВЭР при различных условиях эксплуатации и аварийных режимах. Для расчета неопределенности была использована объединенная модель, включающая вероятностную модель расчета хрупкого разрушения трубопроводов и моделирование случайных ошибок или неопределенностей методом Монте-Карло [9], [10]. В качестве исходных данных были использованы виртуальные данные, включающие истинные значения исходных параметров и их неопределенности, что дало возможность проследить влияние исходных параметров на результирующую неопределенность выходной характеристики. Аналогичный подход был использован в работе [5].

Принятые первоначальные значения исходных параметров и диапазоны их изменения, выбранные на основе экспертных оценок, составили:

- 1) вязкость разрушения – от 20 до 300 МПа√м;
- 2) напряжения, приведенные к постоянным – от 0 до 500 МПа;
- 3) математическое ожидание глубин трещин – от 0 до 0.017 м;
- 4) математическое ожидание длин трещин – от 0 до 0.051 м;
- 5) среднее квадратичное отклонение (СКО) глубин и длин трещин принималось равным 10 %; 20 %; 60 % от величины мат ожидания соответственно для глубин и длин.

При расчете вероятности разрушения трубопровода глубины и длины трещин рассматривались как случайные величины, имеющие заданные исходные распределения. При моделировании исходного распределения глубин и длин трещин использовался нормальный закон распределения. Моделирование распределения размеров трещин проводилось в диапазоне от 0 до 0,7 толщины стенки трубопровода. Толщина стенки принималась постоянной и равной  $s=0,065$  м. Число экспериментов при выбранных значениях математического ожидания глубин и длин трещин принималось равным  $n_s = 10^4$ . Предварительные эксперименты с исходной расчетной моделью показали, что указанное число экспериментов обеспечивает устойчивые статистические значения для выходной характеристики. Остальные исходные параметры принимались детерминированными, изменяемыми в указанных выше диапазонах при исходных неопределенностях равных 10 % от выбранного номинального значения. Указанные неопределенности 10 % рассматривались как исходные данные и могли изменяться в зависимости от целей и задач проводимого эксперимента.

Выбор номинальных исходных параметров для каждого численного эксперимента проводился случайным образом из приведенного диапазона на основе равномерного распределения. Число экспериментов при формировании случайной выборки исходных параметров принималось равным  $n_{in} = 10^3$ .

Сформированная таким образом совокупность исходных номинальных параметров использовалась для расчета выходной характеристики – вероятности хрупкого разрушения  $P_f$  и ее неопределенности  $\delta P_f$ .

Поскольку для рассматриваемой модели выходная характеристика определялась на основе разработанного алгоритма, то вычислить коэффициенты чувствительности  $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}\right)$ , приведенные в формуле (4) аналитически невозможно. Поэтому коэффициенты чувствительности для каждого исходного параметра вычислялись с использованием конечно-разностных соотношений, на основе расчетного программного кода по следующей зависимости:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}\right)^0 = \frac{\varphi(x_1^0, x_2^0, \dots, x_i^0 + \Delta x_i, \dots, x_n^0) - \varphi(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)}{\Delta x_i} \quad (5)$$

где значения  $\varphi(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$  - вычислялись в точках номинальных значений исходных параметров.

Учитывая, что величина  $\varphi(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$  является случайной, то в формуле (5) для величины  $\varphi(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$  использовалось значение математического ожидания выходной характеристики, т.е.

$$M[\varphi(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)] = M[P_f] \quad (6)$$

Величина дисперсии выходной характеристики с учетом зависимости (4) может быть записана в виде следующей формулы:

$$D[P_f] = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial K1c}\right)^2 \cdot D[K1c] + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma}\right)^2 \cdot D[\sigma] + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial Ma}\right)^2 \cdot D[Ma] + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial Mc}\right)^2 \cdot D[Mc] \quad (7)$$

где  $D[K1c]$ ,  $D[\sigma]$ ,  $D[Ma]$ ,  $D[Mc]$  - заданные дисперсии для исходных параметров.

Относительная неопределенность выходной характеристики составит:

$$\delta P_f = \frac{\sqrt{D[P_f]}}{P_f} \quad (8)$$

Для наглядного сопоставления влияния каждого из исходных параметров наряду с коэффициентами чувствительности, определяемыми по формуле (5), были вычислены также относительные неопределенности по каждому исходному параметру, рассчитываемые по следующим зависимостям:

$$er_{K1c} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial K1c}\right)^2 \cdot D[K1c]}}{P_f} \quad (9)$$

$$er_{\sigma} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma}\right)^2 \cdot D[\sigma]}}{P_f} \quad (10)$$

$$er_{Ma} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial Ma}\right)^2 \cdot D[Ma]}}{P_f} \quad (11)$$

$$er\_Mc = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial Mc}\right)^2 \cdot D[Mc]}}{P_f} \quad (12)$$

С учетом (9-12) формула (8) может быть записана в виде:

$$\delta P_f = \sqrt{(er\_K1c)^2 + (er\_σ)^2 + (er\_Ma)^2 + (er\_Mc)^2}.$$

В результате проведенных численных экспериментов были получены неопределенности для всего массива значений исходных параметров во всем диапазоне их изменений. В таблице №1 приведены значения исходных параметров, а также рассчитанных выходных характеристик и относительных неопределенностей по каждому исходному параметру, для пяти наиболее высоких значений неопределенностей, полученных по результатам проведенного численного эксперимента. В заголовке столбцов таблицы использованы следующие сокращенные обозначения параметров:

1) исходные номинальные значения параметров:  $K1c$  – вязкость разрушения;  $σ$  – напряжения, приведенные к постоянным значениям;  $Ma$ ,  $Mc$  – математические ожидания глубин и длин трещин;

2) рассчитанные выходные характеристики:  $MP_f$  – математическое ожидание вероятности хрупкого разрушения;  $DP_f$  – дисперсия вероятности разрушения;  $er\_K1c$ ,  $er\_σ$ ,  $er\_Ma$ ,  $er\_Mc$  – относительные неопределенности по каждому исходному параметру;  $\delta P_f$ , % – относительная неопределенность выходной характеристики в процентах.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров, полученные для числа испытаний

| $K1c$ ,<br>МПа√м; | $σ$ , МПа | $Ma$ , м | $Mc$ , м | $MP_f$  | $DP_f$  | $er\_K1c$ | $er\_σ$            | $er\_Ma$ | $er\_Mc$ | $\delta P_f$ , % |
|-------------------|-----------|----------|----------|---------|---------|-----------|--------------------|----------|----------|------------------|
| 1                 | 2         | 3        | 4        | 5       | 6       | 7         | 8                  | 9        | 10       | 11               |
| 289.71            | 148.931   | 0.00214  | 0.0068   | 2.1e-17 | 4.3e-30 | 0.42      | 26                 | 4.7      | 4.4      | <b>2.7e+03</b>   |
| 221.85            | 108.382   | 0.00263  | 0.0393   | 1.9e-16 | 3.6e-28 | 0.43      | 32                 | 12       | 1.3      | 3.5e+03          |
| 130.20            | 87.7337   | 0.00786  | 0.0139   | 1.1e-15 | 1.1e-26 | 0.46      | 37                 | 7.6      | 5.9      | 3.8e+03          |
| 105.48            | 80.3222   | 0.00456  | 0.0406   | 1e-15   | 1.1e-26 | 0.48      | 67                 | 23       | 4        | 7.1e+03          |
| 223.18            | 86.0185   | 0.00784  | 0.0143   | 2.1e-18 | 4.5e-32 | 0.42      | $\frac{1.9e+0}{2}$ | 26       | 18       | 1.9e+04          |

Примечание:  $n=1000$  и  $CKO=60\%$

Следует заметить, что полученные неопределенности (Таблица №1) имеют очень большие значения (значение относительной неопределенности выходной характеристики достигает величины  $\delta P_f=19000\%$ ).

#### Модификация исходной методики в части стратификации расчетных результатов по значению выходной характеристики

При анализе рассчитанных значений была обнаружена особенность в распределении неопределенности выходной характеристики, выраженная в том, что высокие значения неопределенности наблюдаются для очень малых значений вероятности разрушения. Отмеченная особенность приводит к мысли – представить полученные результаты в виде функциональной зависимости вероятности разрушения от значений полученных неопределенностей, которая приводится на рисунке 1. Характер приведенного распределения показывает, что значения неопределенностей могут быть стратифицированы по группам, выделенным по значению выходной характеристики. Такая стратифицированная выборка сохраняет консервативность значений неопределенностей, но разделяет их в зависимости от значений вероятности разрушения, что позволяет для высоких значений вероятности получить более реалистичные и существенно меньшие значения неопределенностей, сохранив, в то же время, их консервативность.

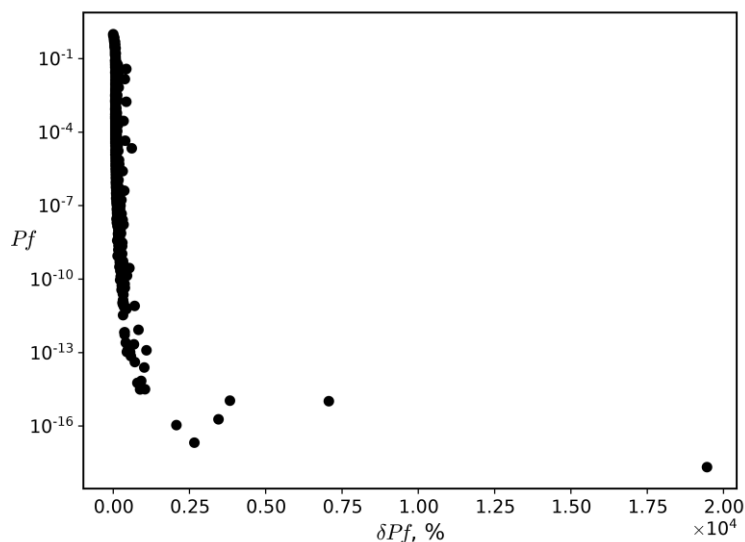


Рис. 1 – Зависимость вероятности разрушения от ее неопределенности для всего диапазона изменений исходных параметров

На основе полученных результатов, приведенных на рисунке 1, в соответствии с предложенным способом, были выделены группы данных, сформированные по следующим признакам: 1-ая группа -  $10^{-01} \leq P_f \leq 1$ ; 2-ая группа -  $10^{-03} \leq P_f \leq 10^{-01}$ ; 3-ая группа -  $10^{-07} \leq P_f \leq 10^{-03}$ ; 4-ая группа -  $10^{-10} \leq P_f \leq 10^{-07}$ ; 5-ая группа -  $10^{-16} \leq P_f \leq 10^{-10}$ .

Для каждой выделенной группы были определены максимальные значения неопределенности, которые составили:

1-ая группа -  $10^{-01} \leq P_f \leq 1$ ;  $\delta P_f = 88\%$ .

2-ая группа -  $10^{-03} \leq P_f \leq 10^{-01}$ ;  $\delta P_f = 430\%$

3-ая группа -  $10^{-07} \leq P_f \leq 10^{-03}$ ;  $\delta P_f = 610\%$ ;

4-ая группа -  $10^{-10} \leq P_f \leq 10^{-07}$ ;  $\delta P_f = 530\%$ ;

5-ая группа -  $10^{-16} \leq P_f \leq 10^{-10}$ ;  $\delta P_f = 19000\%$ .

Результаты распределений значений вероятности разрушения от неопределенности для 1-ой группы приведены на рисунке 2. Для остальных групп характер изменения неопределенностей сохраняется, но с уменьшением вероятности разрушения увеличивается рассеянность значений неопределенности.

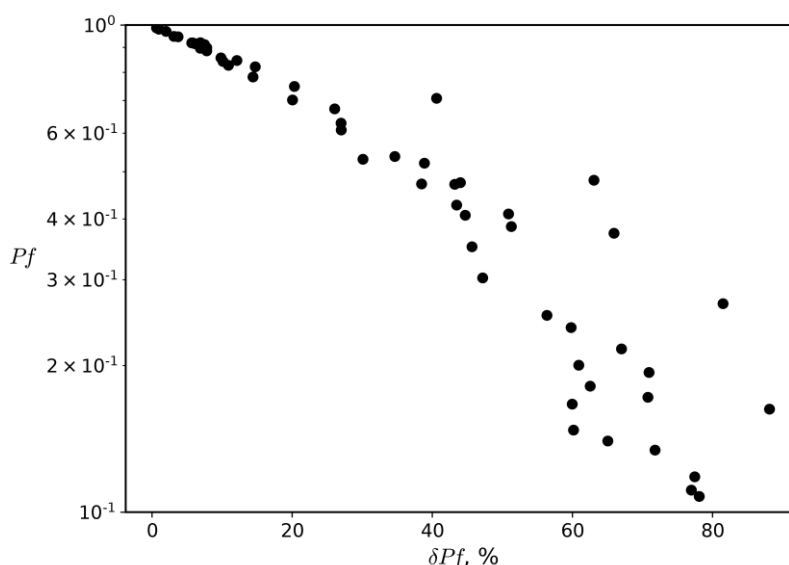


Рис. 2 – Зависимость вероятности разрушения от ее неопределенности для 1 группы

Примечание: диапазон изменения вероятности  $10^{-01} \leq P_f \leq 1$

### Параметрический анализ относительных неопределенностей расчетной модели

Полученный в результате расчета набор данных, приведенных в таблице №1, позволяет провести дополнительный параметрический анализ о влиянии относительных неопределенностей по каждому исходному параметру, вносимых в результирующую неопределенность выходной характеристики. При этом было установлено, что основной вклад вносится двумя исходными параметрами: напряжением и вязкостью разрушения. Построив зависимости относительных

неопределенностей для напряжения ( $er\_σ$ ) и вязкости разрушения ( $er\_K_{Ic}$ ) от исходных параметров, можно определить области экстремальных значений для относительных неопределенностей, а по ним и области допустимых значений исходных параметров. Сужая области изменения исходных параметров, можно существенно уменьшить неопределенность выходной характеристики, управляя тем самым ее значением.

В соответствии с предложенной методикой были построены графики относительных неопределенностей для напряжения ( $er\_σ$ ) и вязкости разрушения ( $er\_K_{Ic}$ ) в зависимости от исходных параметров. На рисунках 3 - 5 приведены выборочные графики относительных неопределенностей от исходных параметров, использованных в дальнейшем для параметрического анализа. Отметим следующие особенности поведения относительной неопределенности по напряжению  $er\_σ$ :

1) значительные величины неопределенностей находятся при самых низких выбранных значениях напряжения. Причем с уменьшением размеров трещин значения максимальных неопределенностей сильно возрастают.

2) области больших значений неопределенностей совпадают с областью малых значений вероятности хрупкого разрушения, что подтверждает полученные выше выводы.

Выделим также следующие особенности поведения относительной неопределенности по вязкости разрушения  $er\_K_{Ic}$ :

1) максимальные значения неопределенностей наблюдаются при самых низких значениях исходных параметров вязкости разрушения и напряжения в заданных диапазонах изменения;

2) области больших значений неопределенностей так же, как и для неопределенностей по напряжению совпадают с областью малых значений вероятности хрупкого разрушения.

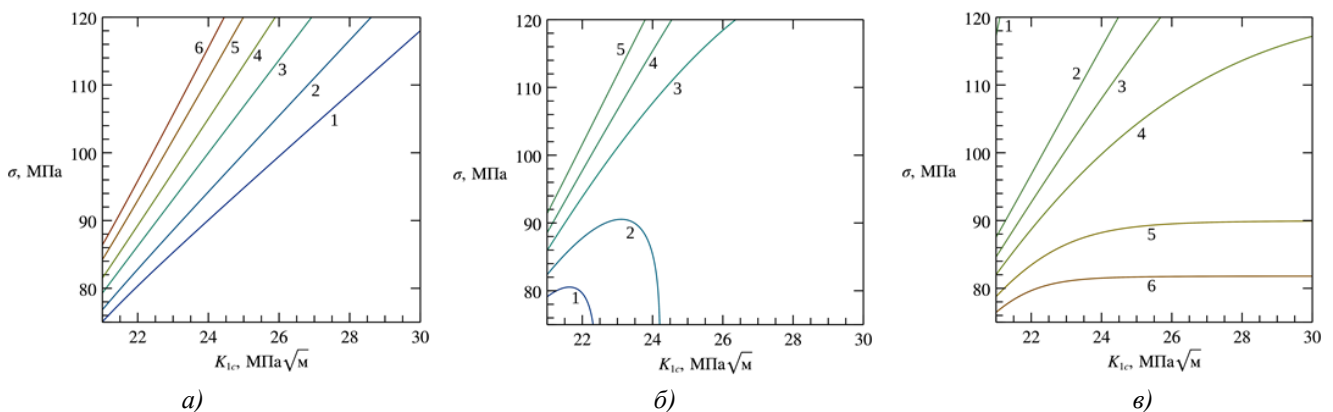


Рис. 3 – Зависимость вероятности разрушения и относительных неопределенностей от исходных параметров для значений:  $Ma=0,025$ ;  $Mc=0,050$ ;  $SKO=10\%$ :

а) вероятность разрушения  $P_f$ ; 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8; 6 – 0,9; б) относительная неопределенность  $er\_K_{Ic}$ ; 1 – 3; 2 – 2; 3 – 1; 4 – 0,5; 5 – 0,2; в) относительная неопределенность  $er\_σ$ ; 1 – 0; 2 – 0,2; 3 – 0,5; 4 – 1; 5 – 2; 6 – 3

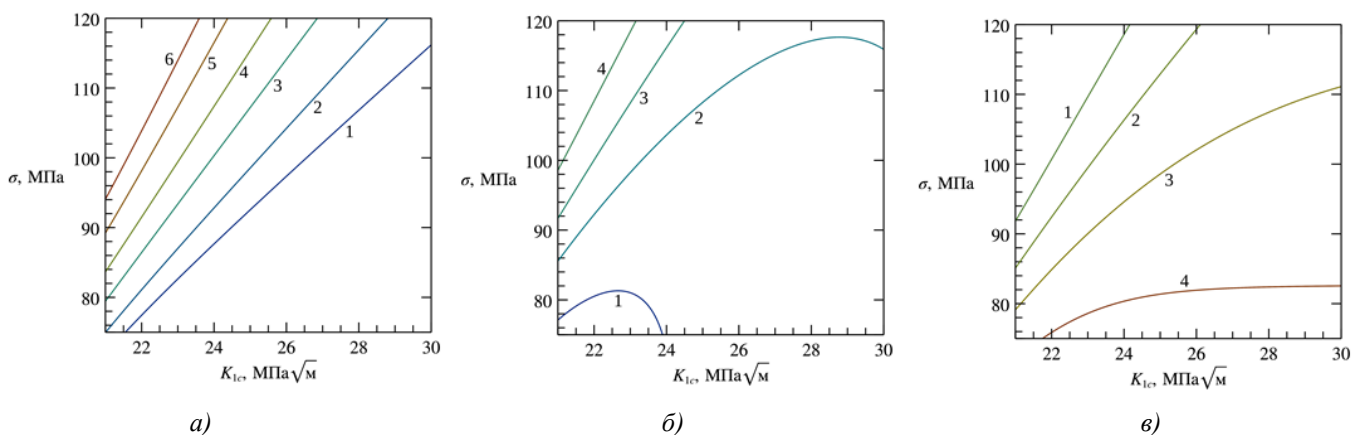


Рис. 4 – Зависимость вероятности разрушения и относительных неопределенностей от исходных параметров для  $Ma=0,025$ ;  $Mc=0,050$ ;  $SKO=20\%$ :

а) вероятность разрушения  $P_f$ ; 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8; 6 – 0,9; б) относительная неопределенность  $er\_K_{Ic}$ ; 1 – 2; 2 – 1; 3 – 0,5; 4 – 0,2; в) относительная неопределенность  $er\_σ$ ; 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 2

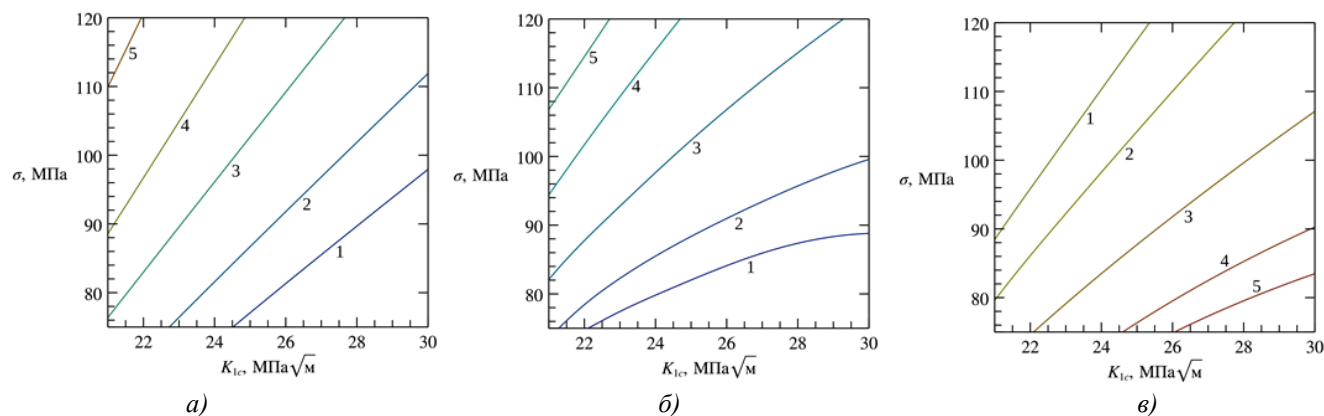


Рис. 5 – Зависимость вероятности разрушения и относительных неопределенностей от исходных параметров для  $Ma=0,025$ ;  $Mc=0,050$ ;  $SKO=60\%$ :

а) вероятность разрушения  $P_f$ ; 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8; б) относительная неопределенность  $er_{K_{li}}$ ; 1 – 0,8; 2 – 0,7; 3 – 0,5; 4 – 0,3; 5 – 0,2; в) относительная неопределенность  $er_{\sigma}$ ; 1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 0,7; 5 – 0,8

На основе полученных результатов анализа принятые ранее значения исходных параметров были откорректированы, и выбраны новые:

- 1) вязкость разрушения – от 20 до 300  $MPa\sqrt{m}$ ;
- 2) напряжения, приведенные к постоянным – от 100 до 500 МПа;
- 3) математическое ожидание глубин трещин – от 10 до 17 мм;
- 4) математическое ожидание длин трещин – от 20 до 34 мм;
- 5) среднее квадратичное отклонение (СКО) глубин и длин трещин принималось равным 10 %; 20 %; 60 % от величины мат ожидания соответственно для глубин и длин.

Выборочные результаты расчетов для новых диапазонов исходных данных приведены на рисунке 6. Анализ полученных данных для новых диапазонов показал, что максимальное значение неопределенности не превысило 740%, что явилось допустимым для проводимых расчетов. В случае получения значений неопределенностей, не удовлетворяющих исходным требованиям, необходимо выполнить новую итерацию по корректированию области исходных параметров.

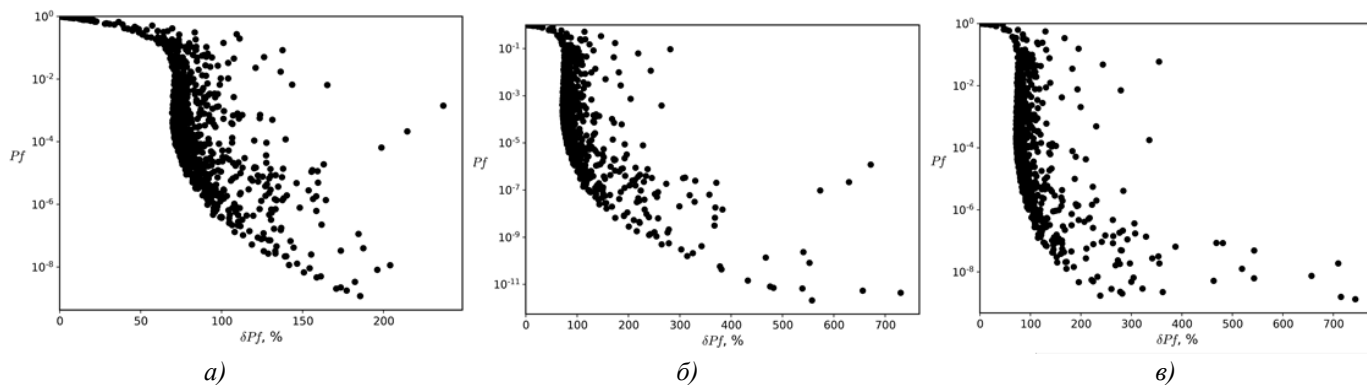


Рис. 6 – Зависимость вероятности разрушения от ее неопределенности для нового диапазона изменения исходных параметров: а –  $SKO=60\%$ ; б –  $SKO=20\%$ ; в –  $SKO=10\%$

### Закключение

Предложена комбинированная методика, позволяющая рассчитывать неопределенность выходной характеристики для случая, когда одна часть исходных данных является детерминированной, а другая часть – случайной, а также корректировать диапазоны исходных параметров с целью обеспечения требуемой неопределенности выходной характеристики.

Разработанная методика была использована для расчета неопределенности выходной характеристики применительно к вероятностному анализу хрупкого разрушения трубопроводов первого контура РУ типа ВВЭР при различных условиях эксплуатации и в аварийных режимах. Для заданных диапазонов изменения исходных параметров, используемой расчетной модели, были проведены численные эксперименты и получены неопределенности выходной характеристики для всего объема значений исходных параметров.

Предложен способ формирования расчетных данных – разбиение их на группы в зависимости от значения выходной характеристики, что позволило исключить большие выбросы значений неопределенности для диапазонов выходной характеристики, используемых в практике расчетов.

Из анализа полученных экспериментальных данных были выделены наиболее значимые исходные параметры, вносящие наибольший вклад в значение неопределенности выходной характеристики. На основе полученных зависимостей относительных неопределенностей были откорректированы диапазоны изменения исходных параметров, что позволило получить реалистичные значения неопределенности выходной характеристики.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Звонарев С. В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С. В. Звонарев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.
2. Порядок проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии. Утвержден приказом №325 ФСЭТАН от 30.07.2018г.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 576 с.
4. Вольперт А.И. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики / А.И.Вольперт, С.И.Худяев. – М.: Наука, 1975. – 395 с.
5. Ciroth, A. Uncertainty calculation in life cycle assessments / A. Ciroth, G. Fleischer, J. Steinbach. – Int J LCA 9, 2004. – 216 p.
6. Самарский А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 320 с.
7. Строгалева В. П. Имитационное моделирование: учеб. пособие для вузов / В. П. Строгалева, И. О. Толкачева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 276 с.
8. Пономарев В. Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В. Б. Пономарев, А. Б. Лошкарёв. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 129 с.
9. Ермаков С. М. Методы Монте–Карло и смежные вопросы / С. М. Ермаков. – М.: Наука, 1971.
10. Попов Ю. П. Вычислительный эксперимент / Ю. П. Попов, А. А. Самарский. – М.: Знание, 1983. – 64 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Zvonarev S. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya: uchebnoe posobie [Fundamentals of Mathematical Modeling: A Textbook] / S. V. Zvonarev. - Yekaterinburg: -Ural University Publishing House. -, 2019 – 112 p. [in Russian]
2. Porjadok provedeniya ehkspertizy programm dlja ehlektronnykh vychislitel'nykh mashin, ispol'zuemykh v celakh postroeniya raschetnykh modelej processov, vlijajushhih na bezopasnost' ob"ektov ispol'zovaniya atomnoj ehnergii i (ili) vidov dejatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii. Utverzhden prikazom №325 FSEhTAN ot 30.07.2018g. [The procedure for the examination of programs for electronic computers used for the construction of computational models of processes that affect the safety of nuclear energy facilities and (or) activities in the field of nuclear energy use. Approved by Order No. 325 of The Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 30.07.2018] [in Russian]
3. Wentzel E. S. Teorija verojatnostej [Probability Theory] / E. S. Wentzel. - M.: Publishing house «Akademija», 2005. - 576 p. [in Russian]
4. Volpert A. I. Analiz v klassakh razryvnykh funkciij i uravnenija matematicheskoy fiziki [Analysis in classes of discontinuous functions and equations of mathematical physics] / A. I. Volpert, S. I. Khudyaev. - M.: Nauka, 1975 – 395 p. [in Russian]
5. Ciroth, A. Uncertainty calculation in life cycle assessments / A. Ciroth, G. Fleischer, J. Steinbach. – Int J LCA 9, 2004. – 216 p.
6. Samarsky A. A. Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical modeling] / A. A. Samarsky, A. P. Mikhailov. - M.: Nauka. Fizmatlit, 1997. - 320 p. [in Russian]
7. Strogalev V. P. Imitatsionnoe modelirovanie: ucheb. posobie dlya vuzov [Simulation Modeling: a Textbook] / V. P. Strogalev, I. O. Tolkacheva. - M.: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University.- , 2008 – - 276 p. [in Russian]
8. Ponomarev V. B. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov: kurs lekcij [Mathematical modeling of technological processes: course of lectures] / V. B. Ponomarev, A. B. Loshkarev. – Yekaterinburg: Ural State Technical University, 2006. - 129 p. [in Russian]
9. Ermakov S. M. Metody Monte–Karlo i smezhnye voprosy [Monte Carlo methods and related issues] / S. M. Ermakov. - Moscow: Nauka, 1971. [in Russian]
10. Popov Yu. P. Vychislitel'nyj ehksperiment [Computational experiment] / Yu. P. Popov, A. A. Samarsky. - Moscow: Znanie, 1983. – 64 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.008>**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДА РАДИАЛЬНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

Научная статья

**Бегункова Н.О.\***

ORCID: 0000-0001-5069-9604,

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

\* Корреспондирующий автор (natali-beg[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье представлена и обоснована актуальность прогнозирования определения выхода радиальных пиломатериалов при распиловке круглых лесоматериалов. Предложено использовать способ сортировки радиальных пиломатериалов, основанный на применении методики численной оценки вида строганого шпона. При этом были задействованы возможности программного комплекса моделирования текстуры поверхностей, образуемых при раскросе пиловочных бревен. Проведенный анализ показал, что на выход различных видов пиломатериалов влияет диаметр бревен, форма кривой, описывающей их образующую, способ пиления. Сделан вывод о возможности использования предлагаемой методики для прогнозирования выхода радиальных, полурадiallyных или тангентальных пиломатериалов по текстуре, которая образуется при формировании поверхности доски.

**Ключевые слова:** прогнозирование, вид пиломатериала, радиальный пиломатериал, выход.

**PREDICTING THE YIELD OF RADially SAWN TIMBER**

Research article

**Begunkova N.O.\***

ORCID: 0000-0001-5069-9604,

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

\* Corresponding author (natali-beg[at]mail.ru)

**Abstract**

The article presents and substantiates the relevance of predicting the yield of radially sawn timber when sawing round timber. It is proposed to use a method for sorting radial lumber, based on the use of a method for the numerical assessment of the type of sliced veneer. At the same time, the capabilities of the software complex for modeling the texture of surfaces formed when cutting saw logs were used. The analysis showed that the yield of various types of timber is influenced by the log diameter, the shape of the curve circling their generatrix, and the method of sawing. It is concluded that the proposed method can be used to predict the yield of radially, semi-radially or tangentially sawn timber by texture, which is formed during the formation of the board surface.

**Keywords:** prediction, type of lumber, radially sawn timber, yield.

**Введение**

На Дальнем Востоке сосредоточено около 13% расчетной лесосеки России [1]. Ожидается, что к 2030 году лесной комплекс в несколько раз увеличит свой вклад как в бюджет страны, так и в бюджет края. Новым флагманским проектом, связанным с развитием деревоперерабатывающей промышленности в Хабаровском крае, планируется «Дом Дальневосточника» [2]. При реализации проекта потребуется большое количество пиломатериалов, среди которых важное значение будут иметь радиальные пиломатериалы. Поэтому очень актуален вопрос повышения эффективности производства данной продукции.

Радиальные пиломатериалы отличаются большей размеро- и формоустойчивостью. Кроме того, они меньше склонны к образованию трещин в различных условиях применения. Эти свойства пиломатериалов обеспечивают им высокую точность формы и размеров. Радиальные поверхности лучше окрашиваются и склеиваются при изготовлении клееных брусков [3], идущих на изготовление окон, дверей и других изделий, применяемых в деревянном домостроении. Сегодня такая продукция наиболее востребована на рынке.

Для получения радиальных пиломатериалов используются различные способы раскроса: например, секторный, развально-сегментный и др. [4].

Пиломатериалы сортируются по разным признакам. К числу их можно отнести: породу, размеры, качество, назначение и др. Сортируют, как правило, визуально, применяется также и силовая сортировка [5]. В целом можно сказать, что при сортировке как круглых лесоматериалов, так и пиломатериалов используются различные установки: ультразвуковые устройства, лазерные сканеры, различные типы томографов.

Однако методы объективной сортировки и соответственно отбора радиальных видов пиломатериалов пока отсутствуют. Поэтому разработка такой методики оценки вида пиломатериалов является актуальной.

Настоящая статья направлена на теоретическое обоснование одного из способов прогнозирования вида пиломатериалов, получаемых из пиловочных бревен.

**Основная часть**

Предлагаемый способ сортировки радиальных пиломатериалов основан на разработанной ранее методике численной оценки вида строганого шпона [6], позволяющей количественно оценить прямолинейность того или иного годичного слоя. Для этого использовались возможности программного комплекса моделирования текстуры поверхностей при раскросе круглого лесоматериала [7], с помощью которого происходит построение не только объемной модели бревна по заданным параметрам, но и отображение текстуры годичных слоев, формируемой на поверхности плоскостей резания [8].



Полученные результаты обрабатываются с помощью специально разработанного программного модуля, который оценивает каждый годичный слой плоскости резания на соответствие принятому коэффициенту прямолинейности и параллельности, что позволяет определить вид поверхности (радиальный, полурадиальный или тангентальный) и дать количественную оценку объемного выхода шпона определенного вида [9].

Для оценки возможностей предлагаемой теории по сортировке пиломатериалов была принята схема раскроя «в развал» (см. рисунок 1).

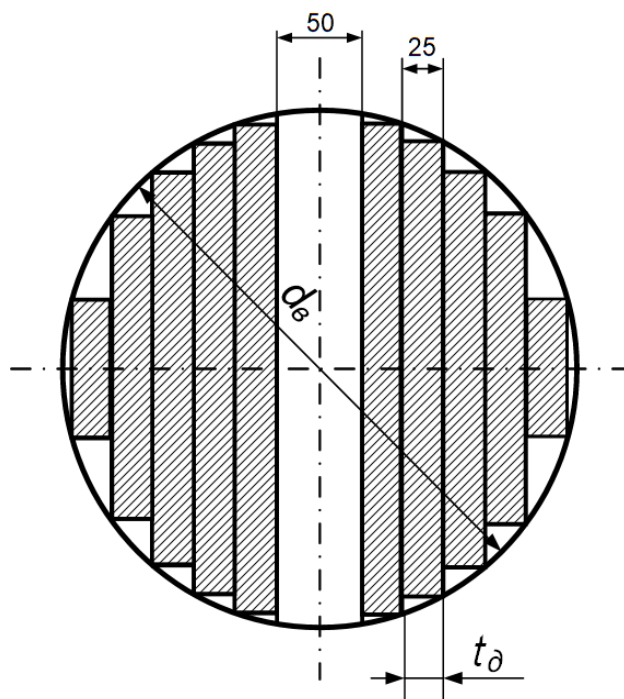


Рис. 1 – Схема раскроя бревна «в развал»

Исследования проводили на сырье различных диаметров ( $d_0$  на рисунке 1), который изменялся от 26 см до 32 см с шагом 2 см. Переменным также фактором являлся вид образующей сырья, которая имела форму или параболы, или прямой или так называемой параболы Нейля (данный вид образующей описывает комлевую часть бревна) [10].

Остальные параметры были приняты постоянными: длина сырья равной 4 м, сбег был принят нормальным (1 см/м).

В схемах раскроя (см. рисунок 1) толщина центральной доски была принята 50 мм, а всех остальных – 25 мм ( $t_0$  на рисунке 1). При этом не учитывались ширина пропила, припуски на усушку и обзол.

Результаты расчетов, выполненных по методике [6], [9], представлены ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Выход пиломатериала

| Тип образующей бревна | Вершинный диаметр, см | Раскрой доски | Выход пиломатериала, %                                                    |            |                 |            |                |            |       |            |
|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|------------|----------------|------------|-------|------------|
|                       |                       |               | радиального                                                               |            | полурадиального |            | тангентального |            | общий |            |
|                       |                       |               | при плоскости резания, параллельной оси или образующей пиловочного бревна |            |                 |            |                |            |       |            |
|                       |                       |               | оси                                                                       | образующей | оси             | образующей | оси            | образующей | оси   | образующей |
| парабола Нейля        | 26                    | нет           | 0,00                                                                      | 0,00       | 22,51           | 61,58      | 52,80          | 0,00       | 75,31 | 61,58      |
|                       |                       | да            | 30,97                                                                     | 53,36      | 0,00            | 0,00       | 38,99          | 0,00       | 69,96 | 53,36      |
|                       | 28                    | нет           | 0,00                                                                      | 0,00       | 21,08           | 58,49      | 51,73          | 14,39      | 72,81 | 72,88      |
|                       |                       | да            | 29,99                                                                     | 51,51      | 0,00            | 0,00       | 38,14          | 14,39      | 68,13 | 65,89      |
|                       | 30                    | нет           | 0,00                                                                      | 0,00       | 19,81           | 70,06      | 60,41          | 0,00       | 80,22 | 70,06      |
|                       |                       | да            | 39,66                                                                     | 61,03      | 0,00            | 0,00       | 36,54          | 0,00       | 76,20 | 61,03      |
|                       | 32                    | нет           | 0,00                                                                      | 0,00       | 18,68           | 67,22      | 59,69          | 11,26      | 78,37 | 78,48      |
|                       |                       | да            | 38,79                                                                     | 58,65      | 0,00            | 0,00       | 35,96          | 1,26       | 74,76 | 59,91      |

Окончание таблицы 1 – Выход пиломатериала

| Тип образующей бревна | Вершинный диаметр, см | Раскрой доски | Выход пиломатериала, %                                                    |            |                 |            |                |            |       |            |
|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|------------|----------------|------------|-------|------------|
|                       |                       |               | радиального                                                               |            | полурадиального |            | тангентального |            | общий |            |
|                       |                       |               | при плоскости резания, параллельной оси или образующей пиловочного бревна |            |                 |            |                |            |       |            |
|                       |                       |               | оси                                                                       | образующей | оси             | образующей | оси            | образующей | оси   | образующей |
| парабола              | 26                    | нет           | 0,00                                                                      | 0,00       | 21,79           | 59,62      | 51,11          | 0,00       | 72,90 | 59,62      |
|                       |                       | да            | 29,99                                                                     | 58,82      | 0,00            | 0,00       | 37,80          | 0,00       | 67,79 | 58,82      |
|                       | 28                    | нет           | 0,00                                                                      | 51,54      | 20,45           | 19,18      | 50,20          | 0,00       | 70,66 | 70,72      |
|                       |                       | да            | 29,12                                                                     | 70,48      | 0,00            | 0,00       | 37,04          | 0,00       | 66,16 | 70,48      |
|                       | 30                    | нет           | 0,00                                                                      | 37,46      | 19,26           | 30,66      | 58,75          | 0,00       | 78,01 | 68,12      |
|                       |                       | да            | 38,64                                                                     | 67,74      | 0,00            | 0,00       | 35,42          | 0,00       | 74,06 | 67,74      |
|                       | 32                    | нет           | 0,00                                                                      | 10,97      | 18,20           | 65,48      | 58,15          | 0,00       | 76,35 | 76,45      |
|                       |                       | да            | 37,82                                                                     | 75,66      | 0,00            | 0,00       | 35,06          | 0,00       | 72,87 | 75,66      |
| прямая                | 26                    | нет           | 0,00                                                                      | 59,82      | 21,86           | 0,00       | 51,29          | 0,00       | 73,15 | 59,82      |
|                       |                       | да            | 30,14                                                                     | 59,82      | 0,00            | 0,00       | 37,83          | 0,00       | 67,98 | 59,82      |
|                       | 28                    | нет           | 0,00                                                                      | 70,93      | 20,51           | 0,00       | 50,35          | 0,00       | 70,87 | 70,93      |
|                       |                       | да            | 29,24                                                                     | 70,93      | 0,00            | 0,00       | 37,08          | 0,00       | 66,32 | 70,93      |
|                       | 30                    | нет           | 0,00                                                                      | 68,30      | 19,31           | 0,00       | 58,90          | 0,00       | 78,21 | 68,30      |
|                       |                       | да            | 38,80                                                                     | 68,30      | 0,00            | 0,00       | 35,51          | 0,00       | 74,30 | 68,30      |
|                       | 32                    | нет           | 0,00                                                                      | 76,63      | 18,24           | 0,00       | 58,29          | 0,00       | 76,53 | 76,63      |
|                       |                       | да            | 37,86                                                                     | 76,63      | 0,00            | 0,00       | 35,14          | 0,00       | 73,00 | 76,63      |

Анализ приведенных табличных данных показывает, что при пилении пиловочных бревен параллельно их образующей получается наибольший выход радиальных пиломатериалов.

Использование раскроя доски способствует не только увеличению выхода радиальных пиломатериалов, но и возможности их получения даже при использовании пиления параллельно оси. Как видно из таблицы 1, при пилении параллельно оси без раскроя доски радиальных пиломатериалов вовсе не образуется и подобное характерно для всех рассматриваемых форм образующей бревна.

В свою очередь, форма образующей при пилении параллельно образующей также оказывает существенное влияние на выход радиального пиломатериала (см. рисунок 2). Максимальный его выход может быть получен из пиловочных бревен, образующие которых имеют форму прямой. Меньше всего радиального пиломатериала в этом случае образуется при использовании пиловочных бревен с формой образующей, описываемой параболой Нейля. Использование при этом дополнительного раскроя досок приводит к практически полному отсутствию полурадиального и тангентального пиломатериала, то есть получению только пиломатериалов радиального вида.

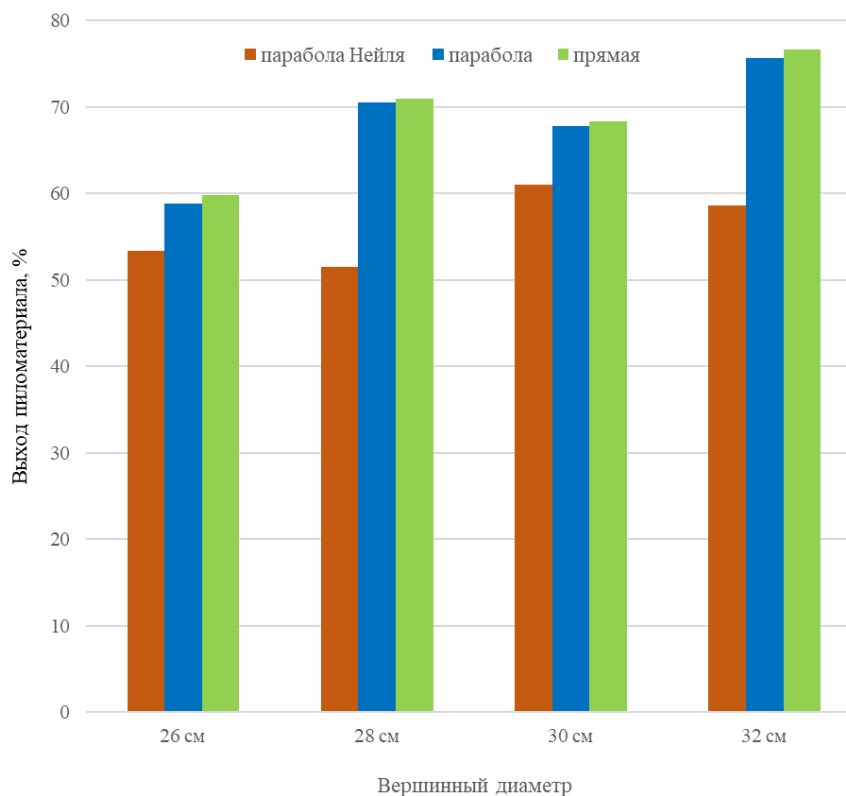


Рис. 2 – Выход радиальных пиломатериалов при пилении параллельно образующей с применением продольного раскря досок

Если рассматривать влияние диаметра на выход радиальных пиломатериалов без продольного раскря досок, то можно отметить: при распиливании бревна параллельно его образующей выход уменьшается с увеличением диаметра сырья, образующая которого описывается параболической кривой. Противоположная картина наблюдается в случае, когда образующая пиловочных бревен описывается уравнением прямой. При применении продольного раскря досок с увеличением диаметра пиловочных бревен наблюдается рост выхода радиальных пиломатериалов.

### Заключение

Используемая методика позволяет прогнозировать выход радиальных или тангентальных пиломатериалов независимо от способа раскря и при необходимости обосновать оптимальный способ раскря, обеспечивающий максимальный выход различных видов пиломатериала (радиальных, полураскряльных или тангентальных).

Таким образом, при принятых допущениях, на выход различных видов пиломатериалов влияет диаметр бревен, форма кривой, описывающей их образующую, способ пиления (параллельно оси или образующей бревна). Причем форма образующей бревна и продольный раскря досок оказывают значительное влияние на выход радиальных пиломатериалов.

На наш взгляд, дальнейшее развитие теории, заложенной в алгоритм расчетов, должно идти в направлении учета при определении вида пиломатериалов угла наклона годичных слоев к поверхности доски. Это позволит более объективно определять вид пиломатериала.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References\*

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс] : [утверждена распоряжением Правительства РФ № 312-р от 01.02.2021] // Гарант – информационно-правовое обеспечение. – URL: <http://www.garant.ru> (дата обращения: 26.03.2021).
2. Вилин И. «Дом дальневосточника» – наш новый проект / И. Вилин // Тихоокеанская звезда. – 2-3 апреля 2021. – № 59 (28817) – 60 (28818). – С. 1.
3. Волынский В. Н. Первичная обработка пиломатериалов на лесопильных предприятиях / В. Н. Волынский, С. Н. Пластинин. – М.: Ризл-пресс, 2005. – 256 с.
4. Аксенов П. П. Технология пиломатериалов : учебник для вузов / П. П. Аксенов, Н. С. Макарова, И. К. Прохоров и др. – 2-е изд. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 480 с.
5. Тамби А. А. Использование современных методов прогнозирования свойств пиломатериалов на этапе сортировки пиловочных бревен / Тамби А. А., Шимкевич Ю. А., Бахшиева М. А. и др. // Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка: материалы международной науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов 12 ноября 2012 г., Санкт-Петербург. – СПбГЛТУ, 2012 г. – С. 141–145.
6. Бегункова Н. О. Прогнозирование объемного выхода и вида строганого шпона на основе информационно-математического моделирования срезаемых слоев и их оценки / Н. О. Бегункова, С. П. Исаев, О. И. Бегунков // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 3 (19). – С. 151–156.

7. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013614119 Российская Федерация. Программный комплекс предсказательного моделирования текстуры поверхностей, формируемых при раскросе круглого лесоматериала / Исаев С. П., Бегункова Н. О., Бегунков О. И.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Тихоокеанский государственный университет. – № 2013612027; заявл. 12.03.13; опубл. 24.04.13. – 1 с.

8. Бегункова Н. О. Предсказательное моделирование поверхностей, формируемых при раскросе круглого лесоматериала / Н. О. Бегункова, С. П. Исаев, О. И. Бегунков // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4 (16). – С. 97–102.

9. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013660838 Российская Федерация. Программный комплекс автоматизированного расчета объемного выхода и идентификации вида строганого шпона / Бегункова Н. О., Исаев С. П., Бегунков О. И.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Тихоокеанский государственный университет. – № 2013618764; заявл. 01.10.13; опубл. 20.11.13. – 1 с.

10. Исаев С. П. Коэффициент формы сортиментов – один из критериев рационального раскроса хлыстов / С. П. Исаев // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: сборник научных трудов. – Вып. 4. – Брянск: БГИТА, 2002. – С. 44–47.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Strategija razvitija lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda [Strategy for the forestry complex development of the Russian Federation until 2030] [Electronic resource] : [approved by the order of the Russian Government № 312-r on 01.02.2021] // Garant – informacionno-pravovoe obespechenie. – URL: <http://www.garant.ru> (accessed: 26.03.2021). [in Russian]

2. Vilin I. «Dom dal'nevostochnika» – nash novyj proekt [The house of the far east's human is our new project] / I. Vilin // Tihookeanskaja zvezda [Pacific star]. – 2-3 April 2021. – № 59 (28817) – 60 (28818). – P. 1. [in Russian]

3. Volynskij V. N. Pervichnaja obrabotka pilomaterialov na lesopil'nyh predpriyatijah [Primary processing of lumber at sawmills] / V. N. Volynskij, S. N. Platinin. – M.: Rijel-press, 2005. – 256 p. [in Russian]

4. Aksenov P. P. Tehnologija pilomaterialov : uchebnik dlja vuzov [Lumber technology: textbook for universities] / P. P. Aksenov, N. S. Makarova, I. K. Prohorov et al. – 2nd edition. – M.: Lesnaja promyshlennost', 1976. – 480 p. [in Russian]

5. Tambi A. A. Ispol'zovanie sovremennyh metodov prognozirovaniya svojstv pilomaterialov na jetape sortirovki pilovocznyh breven [The use of modern methods for predicting the properties of lumber at the stage of sorting sawn logs] / Tambi A. A., Shimkevich Ju. A., Bahshieva M. A. et al. // Sovremennye problemy i perspektivy racional'nogo lesopol'zovanija v uslovijah rynka: materialy mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konf. molodyh uchenykh i specialistov 12 nojabrja 2012 g. [Modern problems and prospects of rational forest management at market conditions: Materials of International scientific and technical conference for young scientists and specialists November 12, 2012], Sankt-Peterburg. – SPbGLTU, 2012 – pp. 141–145. [in Russian]

6. Begunkova N. O. Prognozirovanie obemnogo vyhoda i vida stroganogo shpona na osnove informacionno-matematicheskogo modelirovaniya srezayemykh sloev i ih ocenki [Predicting volume yield and type of sliced veneer on the basis of information-mathematical modeling of cut layers and their evaluation] / N. O. Begunkova, S. P. Isaev, O. I. Begunkov // Sistemy. Metody. Tehnologii [Systems. Methods. Technologies]. – 2013. – № 3 (19). – P. 151–156. [in Russian]

7. Certificate of state registration for computer program № 2013614119 Russian Federation. Programmnyj kompleks predskazatel'nogo modelirovaniya tekstury poverhnostej, formiruemyh pri raskroe kruglogo lesomateriala [Software package for predictive modeling of the texture of surfaces formed during the cutting of round timber] / Isaev S. P., Begunkova N. O., Begunkov O. I.; the applicant and copyright holder FSEI of HPE Pacific National University. – № 2013612027; appl. 12.03.13; publ. 24.04.13. – 1 p. [in Russian]

8. Begunkova N. O. Predskazatel'noe modelirovanie poverhnostej, formiruemyh pri raskroe kruglogo lesomateriala [Predictive modeling of surfaces formed under round timber dressing] / N. O. Begunkova, S. P. Isaev, O. I. Begunkov // Sistemy. Metody. Tehnologii [Systems. Methods. Technologies]. – 2012. – № 4 (16). – P. 97–102. [in Russian]

9. Certificate of state registration for computer program № 2013660838 Russian Federation. Programmnyj kompleks avtomatizirovannogo rascheta obemnogo vyhoda i identifikacii vida stroganogo shpona [Software package for automated calculation of volume output and identification of the type of planed veneer] / Begunkova N. O., Isaev S. P., Begunkov O. I.; the applicant and copyright holder FSEI of HPE Pacific National University. – № 2013618764; appl. 01.10.13; publ. 20.11.13. – 1 p. [in Russian]

10. Isaev S. P. Kojefficient formy sortimentov – odin iz kriteriev racional'nogo raskroja hlystov [The shape's coefficient of the wood assortments is one of the criteria for the rational cutting of logs] / S. P. Isaev // Lesnoj kompleks: sostojanie i perspektivy razvitija: sbornik nauchnyh trudov [Forestry complex: state and development prospects: collection of scientific papers]. – Issue. 4. – Brjansk: BGITA, 2002. – P. 44–47. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.009>

# АППРОКСИМАЦИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СИНТЕЗ ПО НИМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМОВ ЛЕЖАНДРА, ГЕГЕНБАУЭРА И ЯКОБИ

Научная статья

Буренко Е.А.\*

ORCID: 0000-0003-0660-0843,

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (super.evgeny-burenko2012[at]yandex.ru)

## Аннотация

Повышение качества фильтрации радиосигналов актуально для радиотехнических систем различного назначения. Разработчики радиоэлектронной аппаратуры достаточно внимание уделяют улучшению характеристик радиотехнических частотно-избирательных фильтров. Они находят широкое применение в системах телеметрии, телеуправления, в измерительной и вычислительной технике, в радиотехнической, физической, медицинской и другой различной аппаратуре. Как правило, при выборе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики фильтра, предпочтение отдаётся степенным функциям (фильтры Баттерворта) и полиномам Чебышёва I рода. Целью настоящей статьи является анализ предлагаемых методов аппроксимации амплитудно-частотных характеристик фильтров высокого порядка, основанных на использовании полиномов Лежандра, Гегенбауэра и Якоби, а также исследование возможности физической реализации радиотехнических фильтров с улучшенными амплитудно-частотными характеристиками при использовании математического аппарата аппроксимации на указанных полиномах.

**Ключевые слова:** синтез радиотехнических фильтров, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), передаточная функция, полиномиальная аппроксимация, оптимально монотонная аппроксимация, полиномы Лежандра, полиномы Гегенбауэра, полиномы Якоби.

## AN APPROXIMATION OF THE AMPLITUDE AND FREQUENCY CHARACTERISTICS AND SYNTHESIS OF HIGH-ORDER RADIO FILTERS BASED ON LEGENDRE, GEGENBAUER, AND JACOBI POLYNOMIALS

Research article

Burenko E.A.\*

ORCID: 0000-0003-0660-0843,

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

\* Corresponding author (super.evgeny-burenko2012[at]yandex.ru)

## Abstract

Improving the quality of radio signal filtering is important for radio engineering systems for various purposes. The developers of radio-electronic equipment pay sufficient attention to improving the characteristics of radio-technical frequency-selective filters. They are widely used in telemetry and remote control systems, in measuring and computing equipment, in radio engineering, physical, medical, and other various types of equipment. As a rule, when choosing an approximation of the amplitude-frequency response of the filter, preference is given to power functions (Butterworth filters) and Chebyshev polynomials of the first kind. The purpose of this article is to analyze the proposed methods for approximating the amplitude-frequency characteristics of high-order filters based on the use of Legendre, Gegenbauer, and Jacobi polynomials as well as to study the possibility of the physical implementation of radio-technical filters with improved amplitude-frequency characteristics using the mathematical apparatus of approximation on these polynomials.

**Keywords:** synthesis of radio-technical filters, Frequency response, transfer function, polynomial approximation, optimal monotone approximation, Legendre polynomials, Gegenbauer polynomials, Jacobi polynomials.

Задача синтеза фильтра состоит из нескольких этапов:

- выбор аппроксимирующей функции для заданной характеристики фильтра;
- построение передаточной функции фильтра в соответствии с аппроксимирующей функцией (любую характеристику фильтра как четырёхполюсника можно свести к передаточной функции и наоборот);
- конструирование фильтра и анализ его характеристик.

В теории электрических фильтров во всех методах аппроксимации АЧХ используется не сама АЧХ, а квадрат модуля комплексной частотной характеристики  $|\dot{H}(j\Omega)|^2$ , т. е. квадрат АЧХ –  $A^2(\Omega)$ , либо функция, обратная квадрату АЧХ

$\frac{1}{|\dot{H}(j\Omega)|^2} = \frac{1}{A^2(\Omega)}$ . Это объясняется тем, что функция  $|\dot{H}(j\Omega)|^2$ , являясь вещественной функцией вещественного

аргумента, упрощает решение задачи аппроксимации, поскольку исключает на этапе аппроксимации чрезвычайно сложные, а порой невыполнимые операции над функциями комплексного переменного. Для нормированного фильтра нижних частот функция квадрата АЧХ в общем случае представляется в виде [1], [2], [4]:

$$A^2(\Omega) = |\dot{H}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \Psi_n^2(\Omega)}, \quad (1)$$

где  $\Psi_n(\Omega)$  – аппроксимирующая функция степени  $n$ , называемая также функцией фильтрации,  
 $\varepsilon = \frac{\sqrt{1-(1-\delta_1)^2}}{1-\delta_1} = \frac{\sqrt{\delta_1 \cdot (2-\delta_1)}}{1-\delta_1}$  – параметр, управляющий неравномерностью АЧХ в полосе пропускания (реже,

например, при дробно-рациональной аппроксимации – в полосе задерживания). В общем случае  $\Psi_n(\Omega)$  – это дробно-рациональная функция с вещественными коэффициентами (в частности полином), удовлетворяющая условиям:  $0 \leq |\Psi_n(\Omega)| \leq 1$  в полосе пропускания и  $|\Psi_n(\Omega)| > 1$  вне полосы пропускания фильтра.

Порядок фильтра  $n$  определяется из условия  $A(\Omega_k) \leq \delta_2$  и вычисляется методом подбора значений  $n$  до тех пор, пока не выполнится данное условие.

В зависимости от вида аппроксимирующей функции получают различные типы фильтров. Если в качестве аппроксимирующей функции используются полиномы, то фильтры называются полиномиальными [1], [2], [3], [4]. Среди полиномиальных фильтров наиболее широкое применение нашли *фильтры Баттерворта и Чебышёва I рода*. Если  $\Psi_n(\Omega)$  – дробно-рациональная функция, например, дробь Золотарёва  $F_n(\Omega)$ , получаемая непосредственно из эллиптической дробно-рациональной функции Якоби  $R_n(\Omega)$ , то получается *фильтр Золотарёва–Кауэра, называемый также просто фильтром Кауэра, фильтром Золотарёва или эллиптическим фильтром*. Среди дробно-рациональных фильтров помимо фильтров Золотарёва–Кауэра известны также фильтры Чебышёва II рода и дробные фильтры Чебышёва [1], [2], [3], [6].

Фильтры Баттерворта наиболее полно соответствуют условиям безыскажённой передачи сигнала по амплитуде и фазе. При прочих равных условиях фильтр Баттерворта имеет более высокий порядок, чем фильтры других типов [1], [2].

Фильтры Чебышёва I рода обладают равноволновой неравномерностью АЧХ в полосе пропускания, но при этом имеют большую крутизну спада характеристики в переходной полосе, чем фильтры Баттерворта [1], [2], [3]. Другими словами, коэффициент прямоугольности фильтра Чебышёва больше, чем у фильтра Баттерворта при одинаковых заданных требованиях к АЧХ.

Фильтры Чебышёва I рода используются в тех случаях, когда требуется большая скорость затухания вне полосы пропускания и не предъявляются жёсткие требования по обеспечению минимальных искажений АЧХ в полосе пропускания. По этой причине фильтры Чебышёва наиболее широко применяются в радиосистемах для подавления помех от соседних радиостанций [1], [2].

### Аппроксимация амплитудно-частотной характеристики фильтра полиномами Лежандра

Если в качестве аппроксимирующей функции  $\Psi_n(\Omega)$  использовать предлагаемые в работе полиномы Лежандра, то получим соответственно фильтр с амплитудно-частотной характеристикой на полиномах Лежандра (рис. 1).

Как уже было показано ранее,  $\Psi_n(\Omega)$  – это дробно-рациональная функция с вещественными коэффициентами, удовлетворяющая условиям:  $0 \leq |\Psi_n(\Omega)| \leq 1$  в полосе пропускания и  $|\Psi_n(\Omega)| > 1$  вне полосы пропускания фильтра. Полином Лежандра  $n$ -го порядка удовлетворяет этим условиям, следовательно, его можно использовать в качестве аппроксимирующей функции.

Функция квадрата АЧХ нормированного фильтра нижних частот с аппроксимацией на полиномах Лежандра  $n$ -го порядка имеет вид:

$$A^2(\Omega) = \left| \dot{H}(j\Omega) \right|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 P_n^2(\Omega)}, \quad (2)$$

где  $P_n(\Omega)$  – полином Лежандра  $n$ -го порядка,

$\varepsilon$  – параметр, отвечающий за пульсации в полосе пропускания.

Полином Лежандра степени  $n$  можно выразить через формулу Родрига в виде [7]:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n \cdot n!} \cdot \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n, \quad (3)$$

однако более удобно использовать представление через сумму:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n} \cdot \sum_{k=0}^{E\left(\frac{n}{2}\right)} [(-1)^k \cdot C_n^k \cdot C_{2n-2k}^n \cdot x^{n-2k}], \quad (4)$$

где  $E$  – оператор выбора целой части от  $\frac{n}{2}$ ,

$C_n^k = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!}$  – число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ .

Раскрывая сочетания, можно записать более подробно:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n} \cdot \sum_{k=0}^{E\left(\frac{n}{2}\right)} \left[ \frac{(-1)^k \cdot (2n-2k)!}{k! \cdot (n-k)! \cdot (n-2k)!} \cdot x^{n-2k} \right], \quad (5)$$

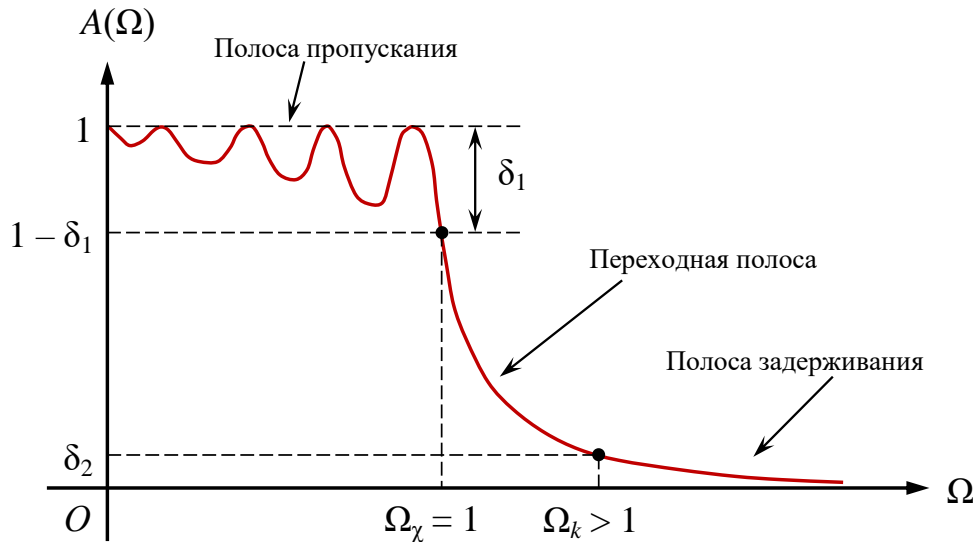


Рис. 1 – Вид амплитудно-частотной характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированной полиномом Лежандра

Графики полиномов Лежандра 1 ÷ 6-го порядков приведены на рис. 2.

Полусы  $\hat{p}_{*k}$  передаточной функции определяются, исходя из решения уравнения:

$$1 + \varepsilon^2 P_n^2(-j\hat{p}) = 0, \quad (6)$$

Передаточная функция фильтра, с учётом того, что образующие её полюсы лежат в левой  $p$ -полуплоскости, определяется следующим образом:

$$H(\hat{p}) = \frac{1}{a_n \cdot \varepsilon \cdot \prod_{k=0}^{n-1} (\hat{p} - \hat{p}_{*k})} = \frac{1}{v(\hat{p})}, \quad (7)$$

где  $a_n = \frac{(2n)!}{2^n \cdot (n!)^2}$  – коэффициент полинома Лежандра  $n$ -го порядка при старшей степени аргумента,  $v(p)$  –

полином знаменателя, который является полиномом Гурвица.

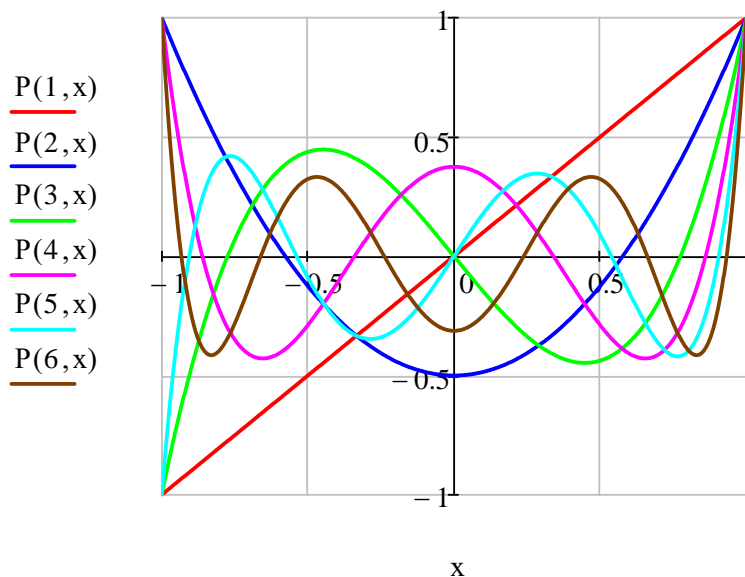


Рис. 2 – Графики полиномов Лежандра 1 ÷ 6-го порядков

На основании выражения (7) производится реализация фильтра на выбранной элементной базе – это пассивные  $LC$ -фильтры [1], [2], [3], либо – активные  $RC$ -фильтры. Возможность реализации активных  $RC$ -фильтров на предлагаемом методе аппроксимации АЧХ показана в работе [4].

На рис. 3 приведено сравнение амплитудно-частотных характеристик фильтров, аппроксимированных полиномами Лежандра, степенными функциями Баттерворта и полиномами Чебышёва I рода при одинаковых заданных требованиях к фильтру. Допустимое отклонение значения АЧХ от единицы в полосе пропускания равно  $\delta_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,293$  (что

соответствует максимальному затуханию  $\alpha_{\max} \approx 3,01$  дБ), допустимое отклонение значения АЧХ от нуля в полосе задерживания равно  $\delta_2 = 0,0005$  (что соответствует минимальному затуханию  $\alpha_{\min} \approx 66,02$  дБ), нормированное значение граничной частоты полосы задерживания равно  $\Omega_k = 2$ . При этом соответствующие порядки фильтров равны:  $n_{\text{батт.}} = 11$ ,  $n_{\text{леб.}} = 7$ ,  $n_{\text{чб.}} = 7$ .

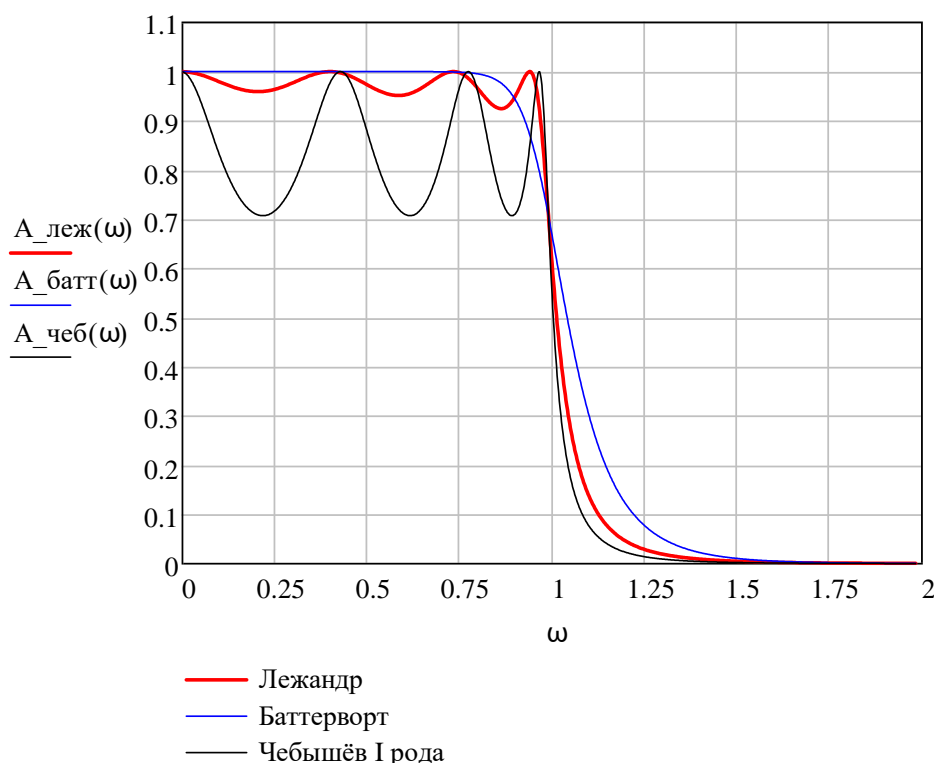


Рис. 3 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные полиномами Лежандра, степенными функциями Баттерворта и полиномами Чебышёва I рода

Из полученных результатов следует, что при одинаковых  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\Omega_k$  амплитуда пульсаций АЧХ при использовании полинома Лежандра значительно меньше, чем при использовании полинома Чебышёва I рода (однако порядки фильтров оказываются равными  $n_{\text{чб.}} = 7$ ,  $n_{\text{леб.}} = 7$ ), а также полином Лежандра позволяет получить более высокую крутизну спада АЧХ за пределами полосы пропускания, чем степенная функция Баттерворта, при этом обеспечивается выигрыш в порядке фильтра:  $n_{\text{батт.}} = 11$ , а  $n_{\text{леб.}} = 7$ .

### Оптимально монотонная аппроксимация амплитудно-частотной характеристики фильтра

Функция квадрата АЧХ фильтра  $n$ -го порядка определяется выражением:

$$A^2(\Omega) = \left| \dot{H}(j\Omega) \right|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 L_n(\Omega^2)}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – параметр, отвечающий за неравномерность в полосе пропускания,  $L_n(\Omega^2)$  – аппроксимирующий полином  $n$ -го порядка, который характеризуется выполнением ряда специальных критериев, обеспечивающих желаемые качества характеристик фильтра, а именно, монотонность АЧХ в полосе пропускания и крутой спад АЧХ за пределами полосы пропускания (рис. 4).



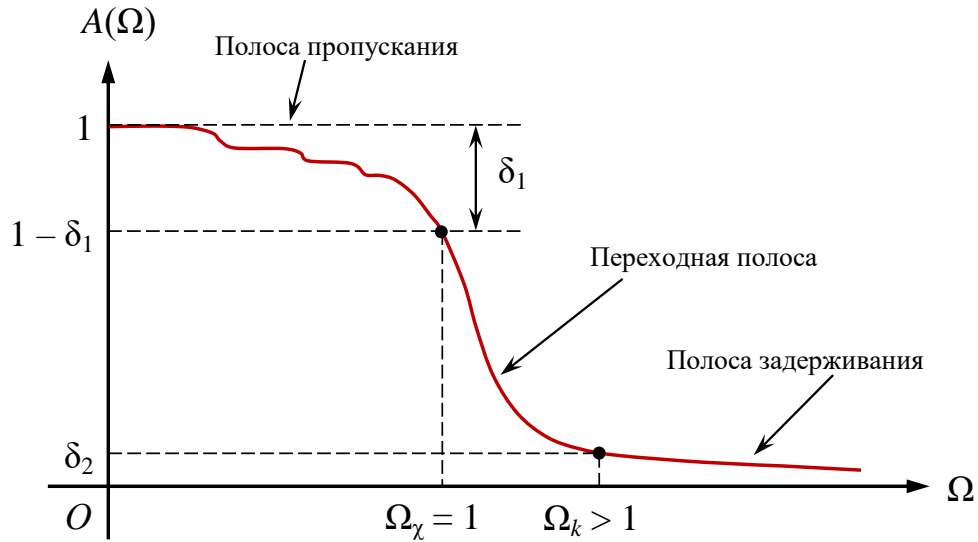


Рис. 4 – Вид амплитудно-частотной характеристики нормированного фильтра нижних частот с оптимально монотонной аппроксимацией

Выражение для аппроксимирующего полинома  $L_n(\Omega^2)$  нечётного порядка имеет вид:

$$L_n(\Omega^2) = \frac{1}{2(k+1)^2} \int_{-1}^{2\Omega^2-1} \left[ \sum_{i=0}^k (2i+1) \cdot P_i(x) \right]^2 dx, \quad (9)$$

где  $n = 2k + 1$  – порядок полинома,  $P_i(x)$  – полином Лежандра  $i$ -го порядка,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$ . Соответственно, для  $n$  чётного, полином  $L_n(\Omega^2)$  имеет вид:

$$L_n(\Omega^2) = \frac{1}{(k+1)(k+2)} \int_{-1}^{2\Omega^2-1} (x+1) \cdot \left[ \sum_{i=0}^k (2i+1) \cdot P_i(x) \right]^2 dx, \quad (10)$$

где  $n = 2k + 2$  – порядок полинома,  $i = \begin{cases} 0, 2, 4, \dots, k, & \text{если } k \text{ – чётное,} \\ 1, 3, 5, \dots, k, & \text{если } k \text{ – нечётное.} \end{cases}$

### Результат вычислений

С помощью выражений (9) и (10) получены аппроксимирующие полиномы  $L_n(\Omega^2)$  фильтров 1 ÷ 6-го порядков (табл. 1).

Таблица 1 – Аппроксимирующие полиномы  $L_n(\Omega^2)$  1 ÷ 6-го порядков и значения коэффициента полинома при старшей степени аргумента  $a_n$

| $n$ | $L_n(\Omega^2)$                                                         | $a_n$ |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1   | $\Omega^2$                                                              | 1     |
| 2   | $\Omega^4$                                                              | 1     |
| 3   | $3\Omega^6 - 3\Omega^4 + \Omega^2$                                      | 3     |
| 4   | $6\Omega^8 - 8\Omega^6 + 3\Omega^4$                                     | 6     |
| 5   | $20\Omega^{10} - 40\Omega^8 + 28\Omega^6 - 8\Omega^4 + \Omega^2$        | 20    |
| 6   | $50\Omega^{12} - 120\Omega^{10} + 105\Omega^8 - 40\Omega^6 + 6\Omega^4$ | 50    |

Графики аппроксимирующих полиномов фильтров 1 ÷ 6-го порядков приведены на рис. 5.

Оптимально монотонная аппроксимация сочетает в себе свойства аппроксимаций на степенных функциях Баттерворта и полиномах Чебышёва I рода. Она не столь равномерна в полосе пропускания, как степенная функция Баттерворта, но и не содержит пульсаций, характерных для полиномов Чебышёва. Фильтр с такой характеристикой является компромиссным (оптимальным) решением между фильтром Баттерворта и Чебышёва I рода. Более крутой спад АЧХ, чем у фильтра Баттерворта достигается за счёт ухудшения равномерности АЧХ в полосе пропускания [4].

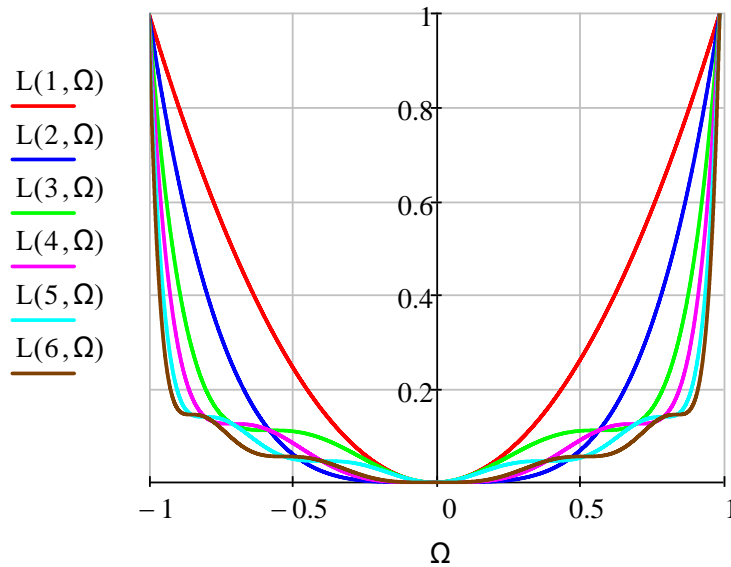


Рис. 5 – Графики оптимально монотонных аппроксимирующих функций (полиномов) 1 ÷ 6-го порядков

Полюсы  $\hat{p}_{*k}$  передаточной функции фильтра определяются, исходя из решения уравнения:

$$1 + \varepsilon^2 L_n(-\hat{p}^2) = 0, \quad (11)$$

Передаточная функция фильтра, с учётом того, что образующие её полюсы лежат в левой  $p$ -полуплоскости, определяется как

$$H(\hat{p}) = \frac{1}{\sqrt{a_n} \cdot \varepsilon \cdot \prod_{k=0}^{n-1} (\hat{p} - \hat{p}_{*k})} = \frac{1}{v(\hat{p})}, \quad (12)$$

где  $a_n$  – коэффициент аппроксимирующего полинома  $n$ -го порядка при старшей степени аргумента (табл. 1),  $v(\hat{p})$  – полином знаменателя, который является полиномом Гурвица.

На рис. 6 приведено сравнение амплитудно-частотных характеристик фильтров, аппроксимированных степенными функциями Баттерворта, полиномами Чебышёва I рода и методом оптимально монотонной аппроксимации при одинаковых заданных требованиях к фильтру. Допустимое отклонение значения АЧХ от единицы в полосе пропускания равно  $\delta_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}}$ , допустимое отклонение значения АЧХ от нуля в полосе задерживания равно  $\delta_2 = 0,0005$ ,

нормированное значение граничной частоты полосы задерживания равно  $\Omega_k = 2$ . При этом соответствующие порядки фильтров равны:  $n_{\text{батт.}} = 11$ ,  $n_{\text{чеб.}} = 7$ ,  $n_{\text{опт.}} = 8$ .

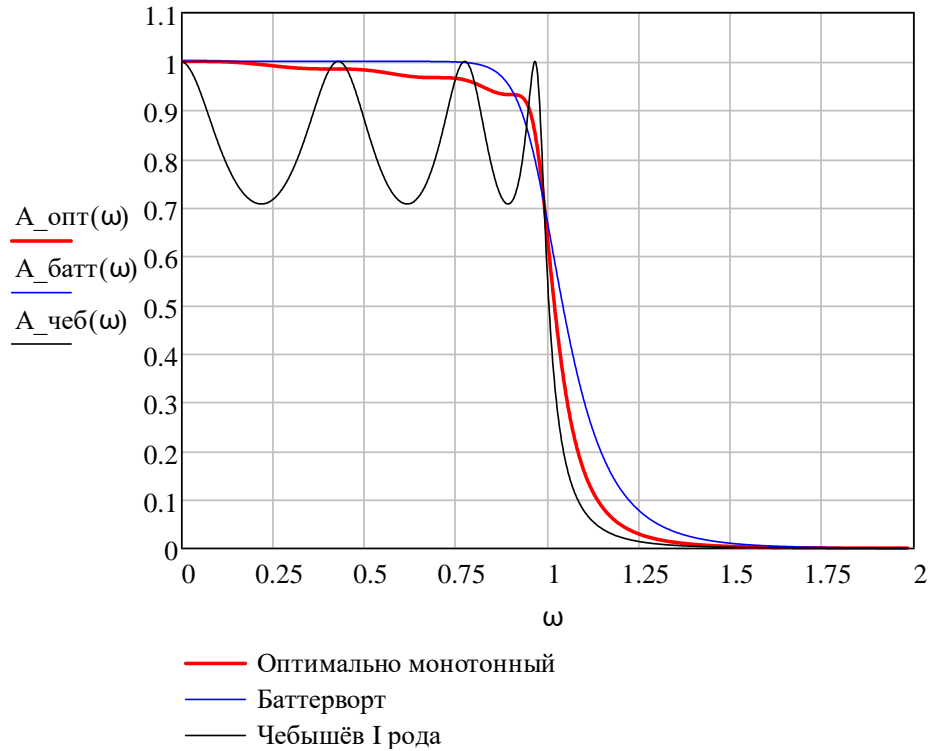


Рис. 6 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные степенными функциями Баттерворта, полиномами Чебышёва I рода и методом оптимально монотонной аппроксимации

Как следует из рис. 6, фильтр с оптимально монотонной амплитудно-частотной характеристикой сочетает в себе свойства фильтров Баттерворта и Чебышёва I рода. Его АЧХ не столь равномерна в полосе пропускания, как у фильтра Баттерворта, но и не содержит пульсаций, характерных для фильтров Чебышёва. Более крутой спад амплитудно-частотной характеристики, чем у фильтра Баттерворта достигается за счёт ухудшения её равномерности в полосе пропускания.

Аналогично проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик фильтров, аппроксимированных полиномами Лежандра и методом оптимально монотонной аппроксимации (рис. 7).

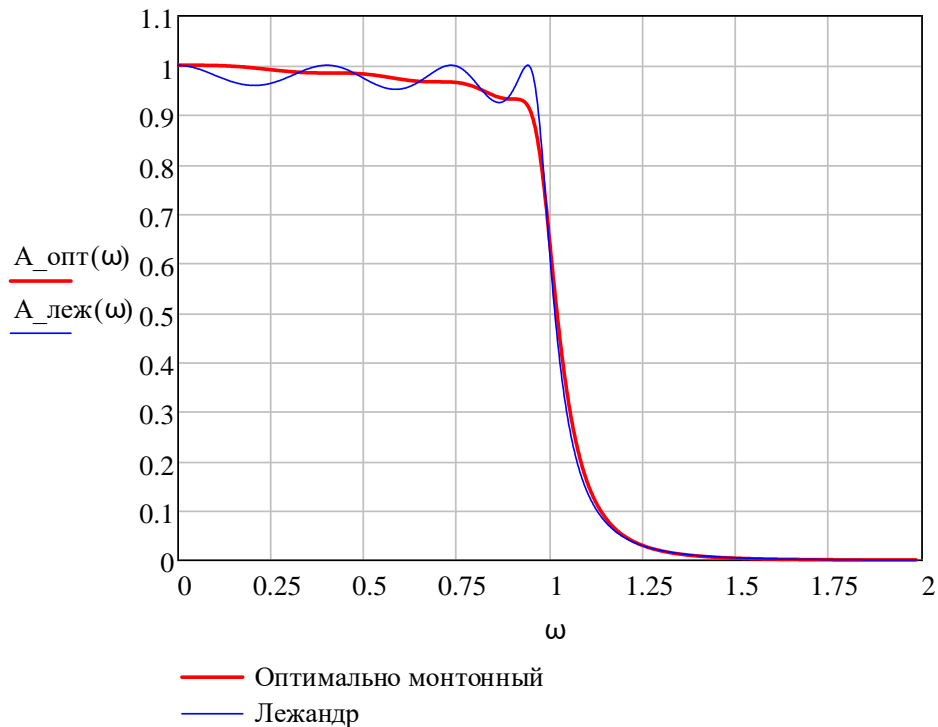


Рис. 7 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные полиномом Лежандра и методом оптимально монотонной аппроксимации

Как следует из рис. 7, одна и та же крутизна спада АЧХ обеспечивается полиномом Лежандра при порядке  $n_{\text{леж.}} = 7$ , и оптимально монотонной аппроксимирующей функцией при порядке  $n_{\text{опт.}} = 8$ . Наличие пульсаций при использовании

полинома Лежандра уменьшает порядок фильтра, тогда как оптимально монотонная аппроксимация, являясь более равномерной, имеет порядок больший, чем при использовании полинома Лежандра.

### Аппроксимация амплитудно-частотной характеристики фильтра полиномами Гегенбауэра

Полиномы Гегенбауэра степени  $n$  в общем случае представляются в виде [8]:

$$G_n^{(\alpha)}(x) = \sum_{k=0}^{E\left(\frac{n}{2}\right)} \left[ (-1)^k \cdot \frac{\Gamma(n-k+\alpha)}{\Gamma(\alpha) \cdot k! \cdot (n-2k)!} \cdot (2x)^{n-2k} \right], \quad (13)$$

где  $E$  – оператор выбора целой части от  $\frac{n}{2}$ ,

$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$  – гамма-функция.

Как уже было показано ранее, для аппроксимации АЧХ фильтра, аппроксимирующая функция должна удовлетворять условиям:  $0 \leq |\Psi_n(\Omega)| \leq 1$  в полосе пропускания и  $|\Psi_n(\Omega)| > 1$  вне полосы пропускания фильтра [4]. Это достигается при использовании полиномов Гегенбауэра  $G_n^{(\alpha)}(x)$ , нормированных на некоторую постоянную величину  $C_n^{(\alpha)}$ :

$$\Psi_n(\Omega) = \frac{G_n^{(\alpha)}(\Omega)}{C_n^{(\alpha)}}, \quad (14)$$

которая определяется, как значение полинома Гегенбауэра при  $x = 1$  и равна:

$$C_n^{(\alpha)} = G_n^{(\alpha)}(1) = \frac{\Gamma(n+2\alpha)}{n! \cdot \Gamma(2\alpha)}, \quad (15)$$

Для получения приемлемой формы АЧХ параметр  $\alpha$  рекомендуется выбирать  $\alpha > 0$ .

При  $\alpha \rightarrow 0$  получившаяся функция  $\Psi_n(\Omega)$  стремится к полиному Чебышёва I рода; при  $\alpha = 0,5$  она является полиномом Лежандра; при  $\alpha = 1$  – нормированным полиномом Чебышёва II рода, который может быть определён, как:

$$U_n(x) = \frac{\sin[(n+1) \cdot \arccos x]}{(n+1) \cdot \sin(\arccos x)} = \frac{\sin[(n+1) \cdot \arccos x]}{(n+1) \cdot \sqrt{1-x^2}}, \text{ если } -1 \leq x \leq 1,$$

или для значений  $-1 > x > 1$  выражением:

$$U_n(x) = \frac{\text{sh}[(n+1) \cdot \text{Arch } x]}{(n+1) \cdot \text{sh}(\text{Arch } x)} = \frac{\text{sh}[(n+1) \cdot \text{Arch } x]}{(n+1) \cdot \sqrt{x^2 - 1}}.$$

Также полиномы Гегенбауэра  $G_n^{(\alpha)}(x)$  являются частным случаем полиномов Якоби  $P_n^{(\mu, \nu)}(x)$  при  $\mu = \nu = \alpha - 0,5$ , которые будут рассмотрены далее.

Так как при  $0 < \alpha \leq 0,5$  полиномы Гегенбауэра являются обобщением полиномов Чебышёва I рода и Лежандра, то для получения более высокого качества избирательности фильтра, параметр полинома  $\alpha$  рекомендуется выбирать  $\alpha > 0,5$ .

На рис. 8 приведено сравнение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров, аппроксимированных полиномами Чебышёва I рода и Гегенбауэра с параметром  $\alpha = 0,05$  при одинаковых заданных требованиях к фильтру. Допустимое отклонение значения АЧХ от единицы в полосе пропускания равно  $\delta_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,293$ , допустимое

отклонение значения АЧХ от нуля в полосе задерживания равно  $\delta_2 = 0,0005$ , нормированное значение граничной частоты полосы задерживания равно  $\Omega_k = 2$ . При этом соответствующие порядки фильтров оказываются одинаковыми:  $n_{\text{чеб.}} = n_{\text{геген.}} = 7$ . Как следует из рис. 8, при  $\alpha \rightarrow 0$ , полином Гегенбауэра стремится к полиному Чебышёва I рода и достаточно высоких качеств избирательности не достигается. Характеристика по-прежнему является сильно пульсирующей.

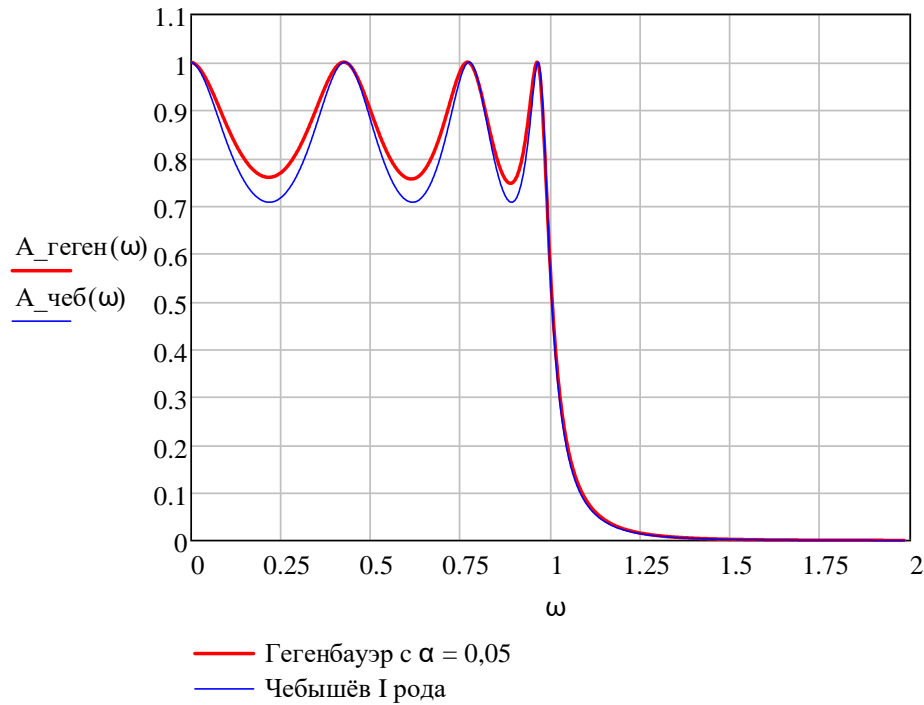


Рис. 8 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные полиномами Чебышёва I рода и Гегенбауэра с параметром  $\alpha = 0,05$

На рис. 9 приведено сравнение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров, аппроксимированных полиномами Лежандра и Гегенбауэра с  $\alpha = 1$  при одинаковых заданных требованиях к фильтру. Допустимое отклонение значения АЧХ от единицы в полосе пропускания равно  $\delta_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,293$ , допустимое отклонение значения АЧХ от

нуля в полосе задерживания равно  $\delta_2 = 0,0005$ , нормированное значение граничной частоты полосы задерживания равно  $\Omega_k = 2$ . При этом соответствующие порядки фильтров равны:  $n_{\text{леж.}} = 7$ ,  $n_{\text{геген.}} = 8$ . В данном случае при  $\alpha = 1$  величина пульсаций полинома Гегенбауэра значительно меньше, чем у полинома Лежандра, при этом крутизна спада характеристики фильтров практически одинакова. Недостатком полинома Гегенбауэра в данном случае является его более высокий порядок.

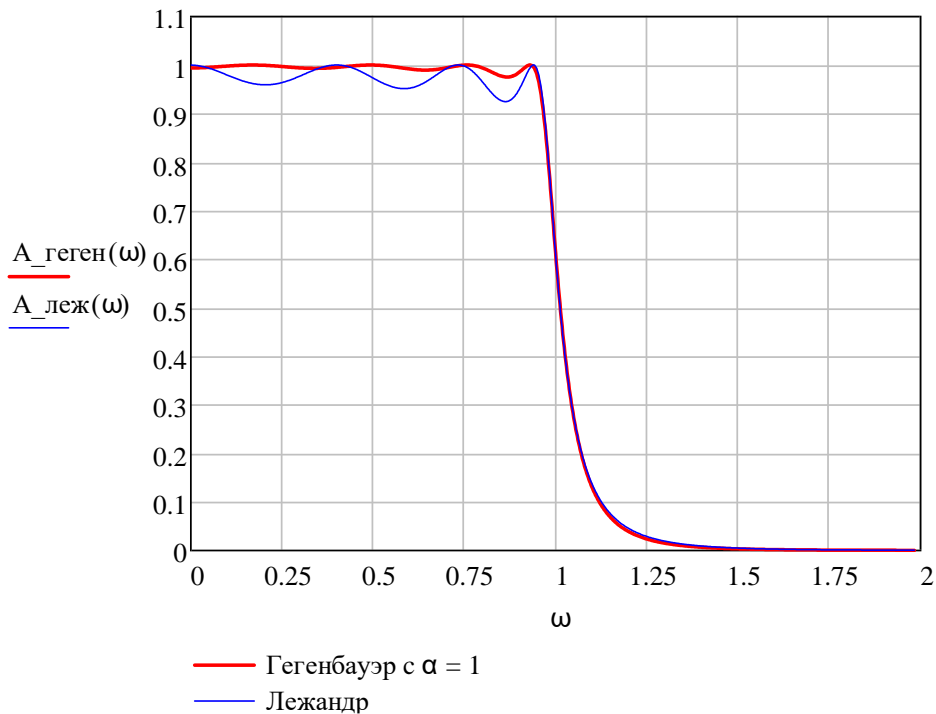


Рис. 9 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные полиномами Лежандра и Гегенбауэра со значением  $\alpha = 1$

Аналогично проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик фильтров, аппроксимированных полиномами Лежандра Гегенбауэра с  $\alpha = 2$  (рис. 10).

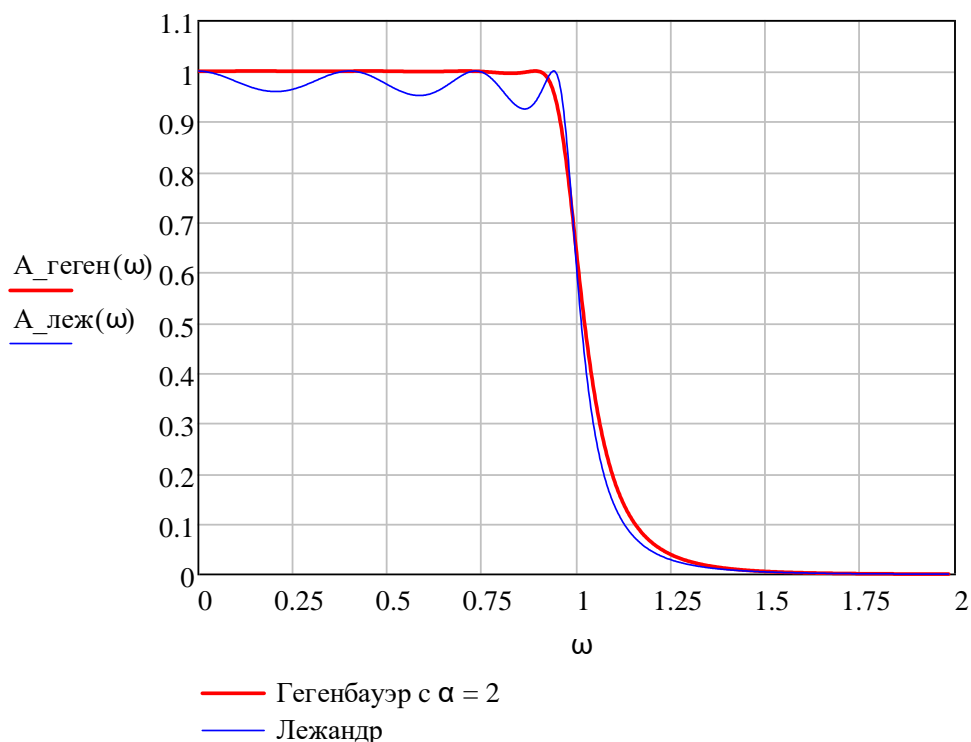


Рис. 10 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные полиномами Лежандра и Гегенбауэра со значением  $\alpha = 2$

При значениях  $\alpha > 1$  также целесообразно провести сравнение амплитудно-частотных характеристик фильтров, аппроксимированных степенными функциями Баттерворта и полиномами Гегенбауэра (рис. 11). При этом полином Гегенбауэра с параметром  $\alpha = 2$  обеспечивает достаточно высокую равномерность АЧХ в полосе пропускания, а также доставляет характеристике фильтра более высокий спад за пределами полосы пропускания, чем функция Баттерворта. Соответствующие порядки полиномов имеют следующие значения:  $n_{\text{батт.}} = 11$ ,  $n_{\text{геген.}} = 8$ , откуда видно, что полином Гегенбауэра имеет более низкий порядок, чем степенная функция Баттерворта.

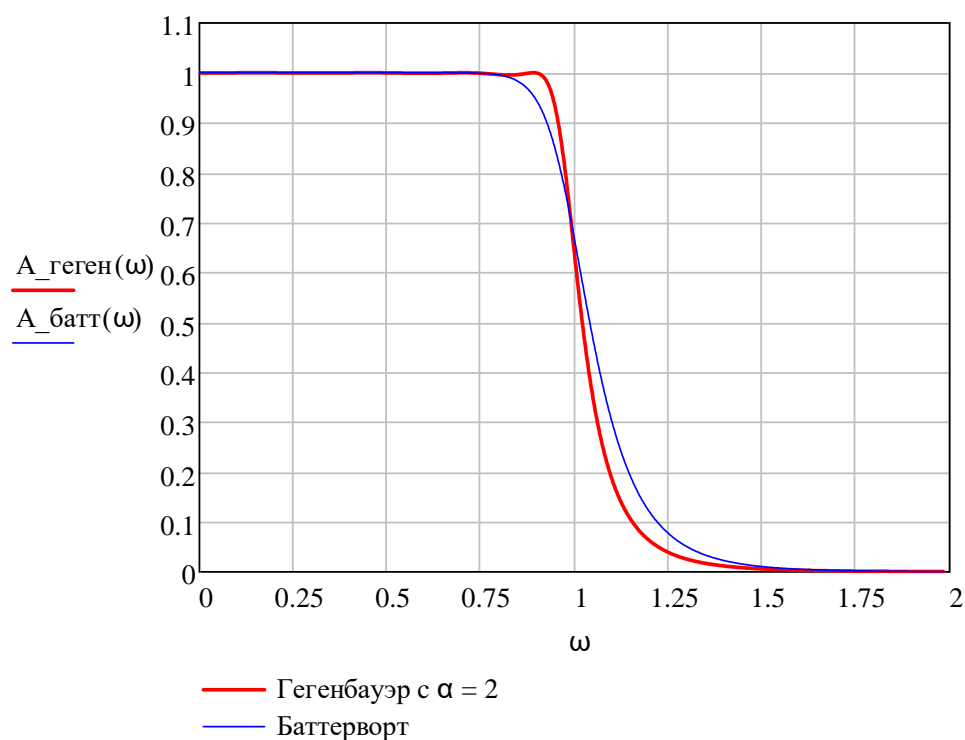


Рис. 11 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные степенными функциями Баттерворта и полиномами Гегенбауэра с  $\alpha = 2$

Таким образом, на основе полиномов Гегенбауэра возможна реализация полиномиального фильтра  $n$ -го порядка с различными пульсациями АЧХ, величина которых зависит от параметра полинома  $\alpha$ . Задавая параметр  $\alpha$  из области рекомендуемых значений, можно получать фильтры с различными пульсациями АЧХ в полосе пропускания и различной крутизной АЧХ за её пределами, в частности, с улучшенной частотной избирательностью.

**Аппроксимация амплитудно-частотной характеристики фильтра полиномами Якоби**

Полиномы Якоби степени  $n$  в общем случае представляются в виде [9]:

$$P_n^{(\alpha, \beta)}(x) = \frac{\Gamma(\alpha + n + 1)}{n! \cdot \Gamma(\alpha + \beta + n + 1)} \cdot \sum_{k=0}^n \left[ C_n^k \cdot \frac{\Gamma(\alpha + \beta + n + k + 1)}{\Gamma(\alpha + k + 1)} \cdot \left( \frac{x-1}{2} \right)^k \right], \quad (16)$$

где  $C_n^k = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!}$  – число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ ,

$\Gamma(x)$  – гамма-функция.

Эти полиномы удовлетворяют условию ортогональности при  $\alpha > -1$  и  $\beta > -1$ .

Для полиномов Якоби существует соотношение симметрии:

$$P_n^{(\beta, \alpha)}(x) = (-1)^n P_n^{(\alpha, \beta)}(-x), \quad (17)$$

Для получения аппроксимирующей функции необходимо использование так называемых модифицированных полиномов Якоби [9], [10]:

$$J_n^{(\alpha, \beta)}(x) = P_n^{(\alpha, \beta)}(x) + P_n^{(\beta, \alpha)}(x), \quad (18)$$

нормированных на некоторую постоянную величину  $C_n^{(\alpha, \beta)}$ :

$$\Psi_n(\Omega) = \frac{J_n^{(\alpha, \beta)}(\Omega)}{C_n^{(\alpha, \beta)}}, \quad (19)$$

которая определяется как значение модифицированного полинома Якоби при  $x = 1$  и равна:

$$C_n^{(\alpha, \beta)} = J_n^{(\alpha, \beta)}(1) = \frac{1}{\Gamma(n+1)} \cdot \left[ \frac{\Gamma(n+\alpha+1)}{\Gamma(\alpha+1)} + \frac{\Gamma(n+\beta+1)}{\Gamma(\beta+1)} \right], \quad (20)$$

Многие известные ортогональные полиномы являются частными случаями нормированных модифицированных полиномов Якоби, например, при  $\alpha = \beta = 0$  функция  $\Psi_n(\Omega)$  является полиномом Лежандра (рис. 2); при  $\alpha = \beta = -0,5$  – полиномом Чебышёва I рода (рис. 12); при  $\alpha = \beta = 0,5$  – нормированным полиномом Чебышёва II рода (рис. 13).

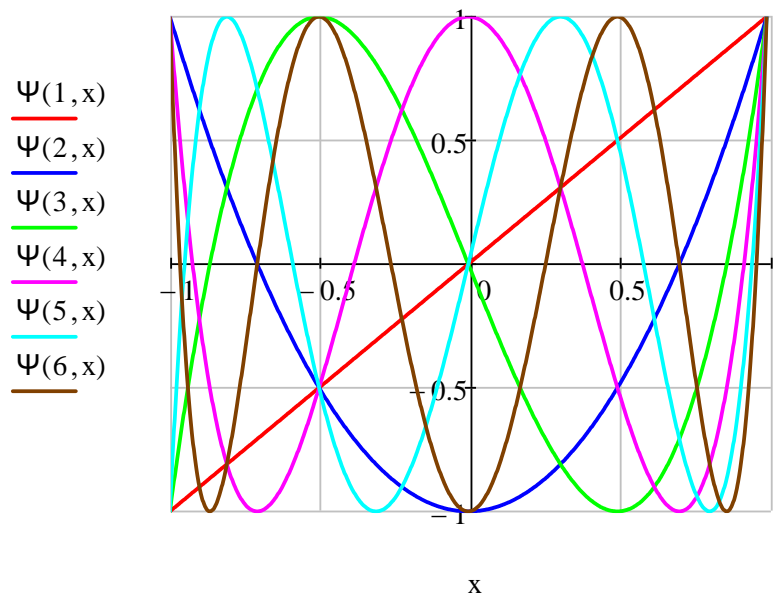
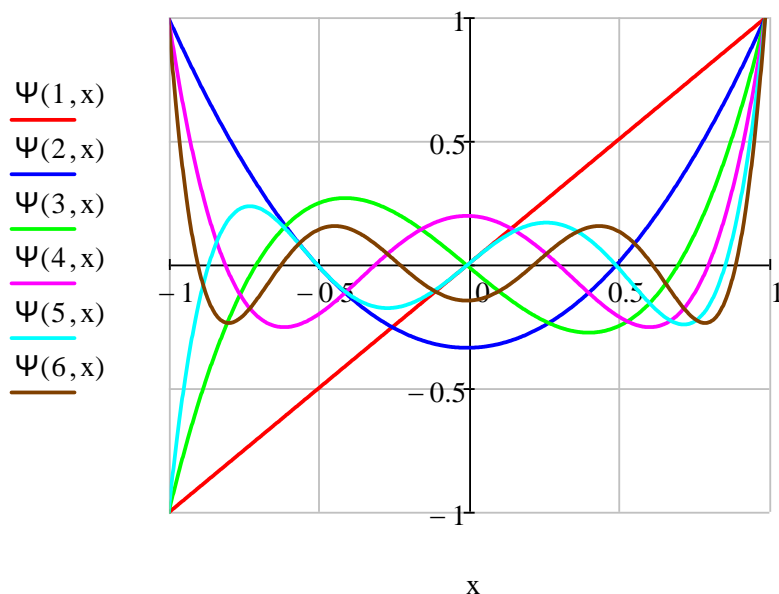
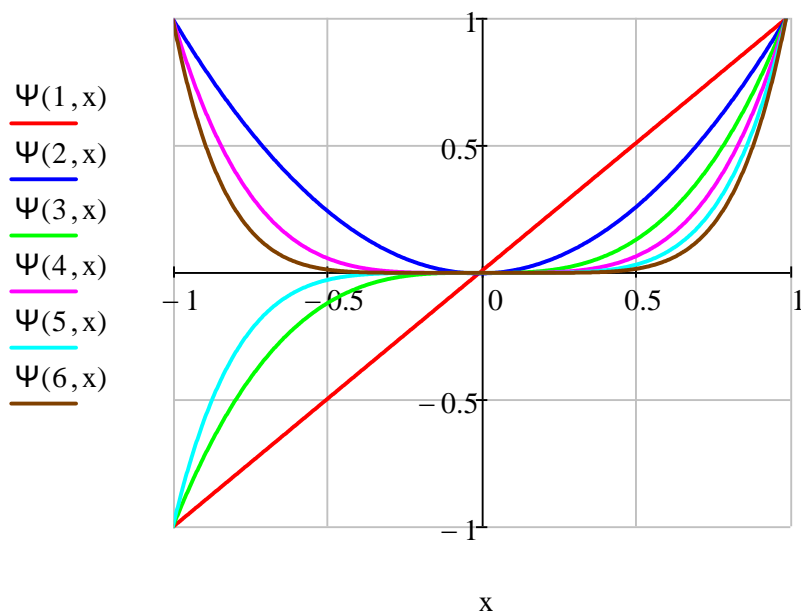


Рис. 12 – Графики функций  $\Psi_n(x)$  1 ÷ 6-го порядков при  $\alpha = \beta = -0,5$

Кроме того, необходимо отметить тот факт, что при достаточно больших значениях  $\alpha$  и  $\beta$  нормированный модифицированный полином Якоби в пределе стремится к степенной функции  $x^n$ , т. е. фильтр при таких значениях  $\alpha$  и  $\beta$  будет представлять собой фильтр Баттерворта (рис. 14).

Рис. 13 – Графики функций  $\Psi_n(x)$  1 ÷ 6-го порядков при  $\alpha = \beta = 0,5$ Рис. 14 – Графики функций  $\Psi_n(x)$  1 ÷ 6-го порядков при  $\alpha = 70$  и  $\beta = 80$ 

На рис. 15 приведено сравнение амплитудно-частотных характеристик фильтра, аппроксимированных полиномами Лежандра и Якоби с параметрами  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 0$  при одинаковых заданных требованиях к фильтру. Допустимое отклонение значения АЧХ в полосе пропускания от единицы равно  $\delta_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,293$ , допустимое отклонение

значения АЧХ от нуля в полосе задерживания равно  $\delta_2 = 0,0005$ , нормированное значение граничной частоты полосы задерживания равно  $\Omega_k = 2$ . Соответствующие порядки фильтров равны семи:  $n_{\text{якоб.}} = n_{\text{леж.}} = 7$ .



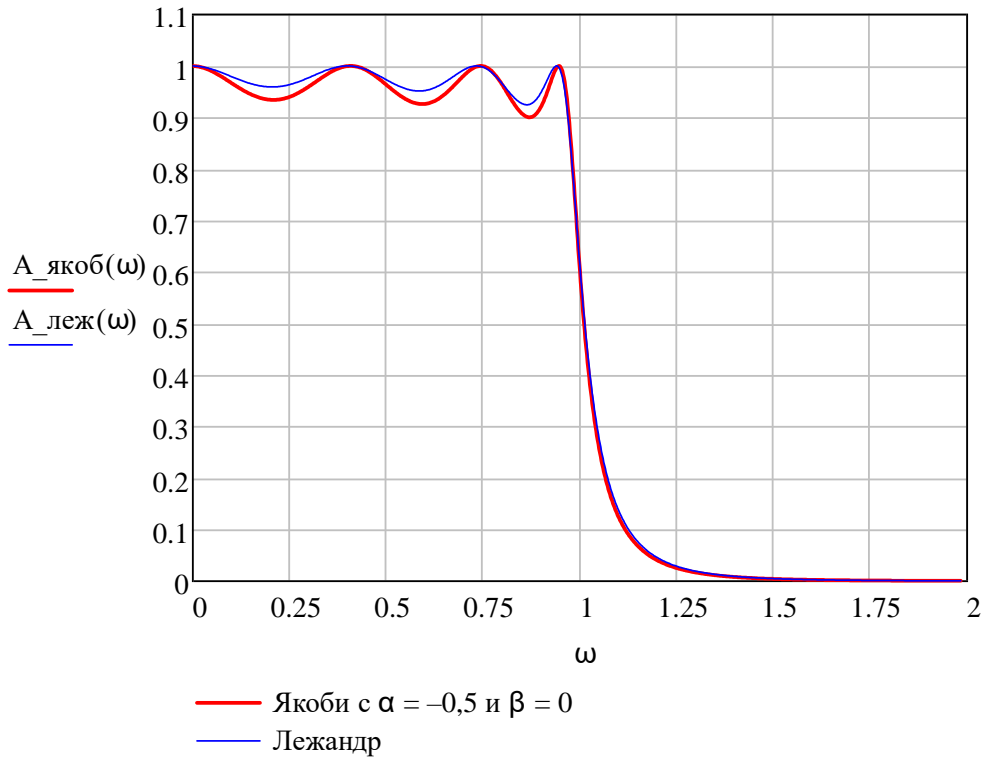


Рис. 15 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные полиномами Лежандра и Якоби с  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 0$

Как следует из рис. 15, величина пульсаций при использовании полинома Якоби с  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 0$  превышает величину пульсаций при использовании полинома Лежандра. Порядки фильтров одинаковы, крутизна спада АЧХ одинакова. Следовательно, в данном случае, при таких значениях  $\alpha$  и  $\beta$  предпочтение следует отдать полиному Лежандра, однако если параметр  $\beta = 0,5$ , то амплитудно-частотная характеристика принимает вид (рис. 16).

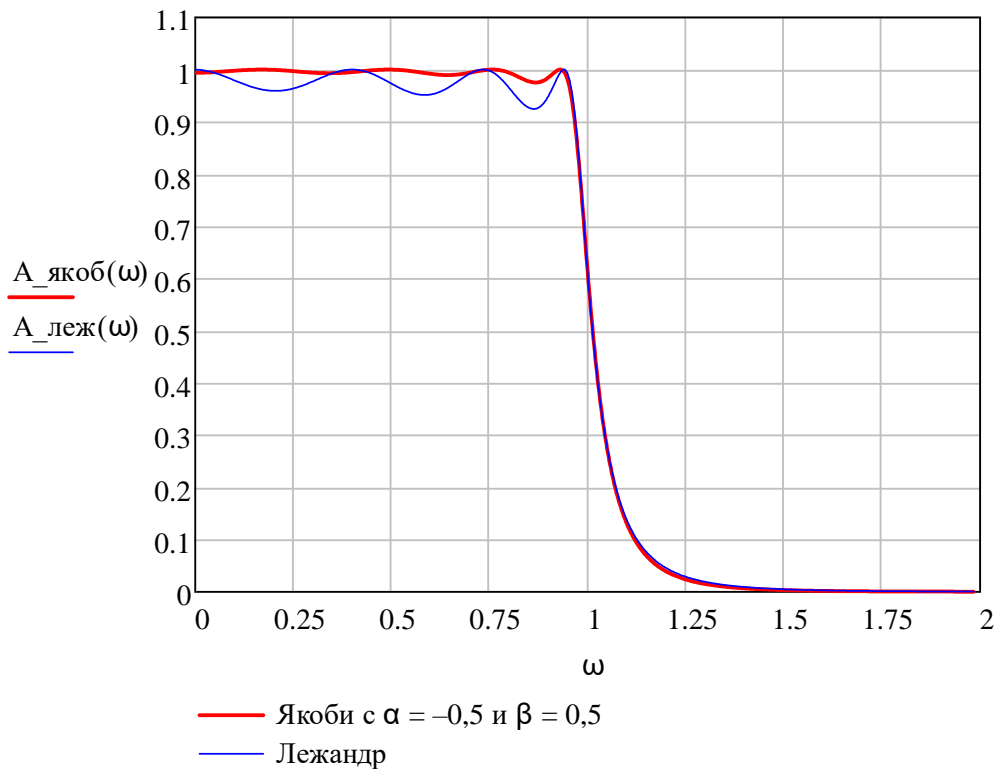


Рис. 16 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные полиномами Лежандра и Якоби с  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 0,5$

В данном случае полином Якоби с параметрами  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 0,5$  обеспечивает практически равномерную АЧХ в полосе пропускания по сравнению с использованием полиномов Лежандра. Крутизна спада АЧХ при этом сохраняется практически неизменной. Однако порядок фильтра в этом случае оказывается выше, чем при использовании полинома Лежандра. В данном случае при выбранных  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 0,5$  предпочтение может быть отдано полиному Якоби, исходя из соображений обеспечения минимальных линейных искажений при передаче сигнала.

Аналогично проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик фильтра, аппроксимированных функциями Баттерворта и полиномами Якоби с параметрами  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 1$  (рис. 17). При  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 1$  полином Якоби имеет существенно незначительные пульсации, т. е. АЧХ в полосе пропускания практически совпадает с характеристикой на степенных функциях Баттерворта. При этом порядок фильтра при использовании аппроксимации полиномом Якоби составляет  $n_{\text{якоб.}} = 8$ , а при степенной функции Баттерворта –  $n_{\text{батт.}} = 11$ , из чего следует, что полином Якоби при порядке  $n_{\text{якоб.}} = 8$  обеспечивает большую крутизну спада АЧХ, чем полином Баттерворта при  $n_{\text{батт.}} = 11$ .

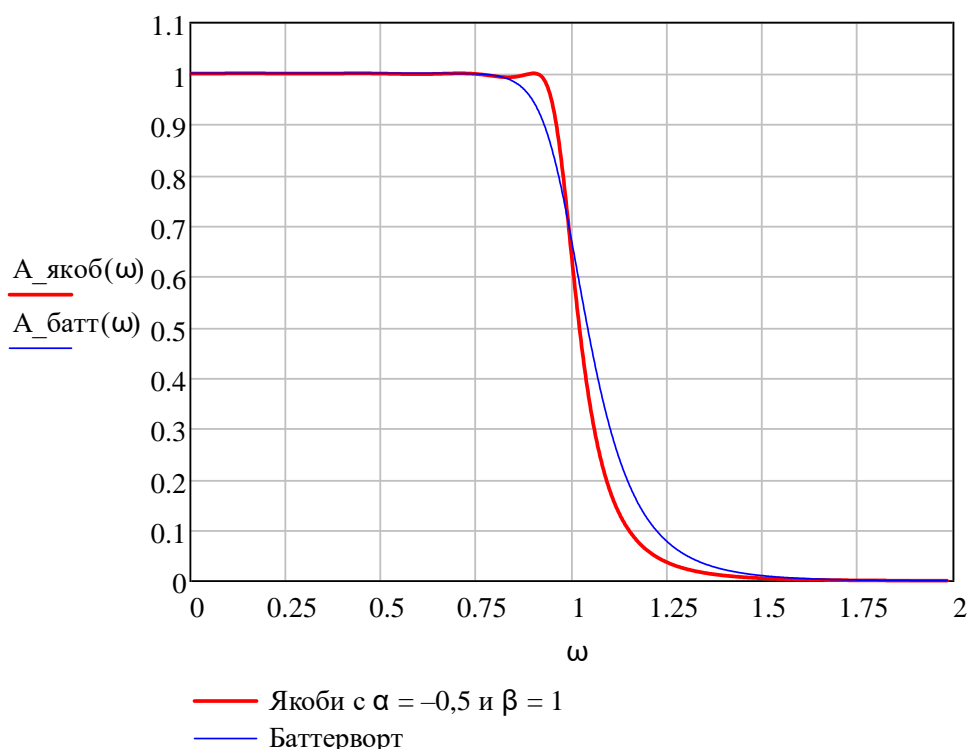


Рис. 17 – Амплитудно-частотные характеристики нормированного фильтра нижних частот, аппроксимированные степенными функциями Баттерворта и полиномами Якоби со значениями  $\alpha = -0,5$  и  $\beta = 1$

### Заключение

Таким образом, из проведённого исследования следует, что аппроксимация на основе полиномов Якоби является наиболее обобщённым вариантом полиномиальной аппроксимации амплитудно-частотной характеристики фильтра (за исключением оптимально монотонной аппроксимации). При различных значениях параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , удовлетворяющих условию ортогональности полиномов Якоби, можно получать различные по виду АЧХ фильтры  $n$ -го порядка, в частности, с повышенной частотной избирательностью, реализованные полиномиальной структурой.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Улахович Д. А. Основы теории линейных электрических цепей / Д. А. Улахович. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 816 с.
2. Нестеров С. В. Синтез линейных электрических цепей / С. В. Нестеров. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2013. – 84 с.
3. Буренко Е. А. Аппроксимация характеристик электрических фильтров рациональными функциями / Е. А. Буренко // XLIV международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения». Сборник тезисов докладов. Москва, 2018 г. Т.1. С. 375–376.
4. Буренко Е. А. Проектирование активных частотно-избирательных фильтров / Е. А. Буренко, С. В. Нестеров // Труды МАИ. Выпуск №101 от 14.09.2018 г., 26 стр. [Электронный ресурс]. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=97011> (дата обращения: 22.04.2021 г.).
5. Butterworth S. On the theory filter amplifier / S. Butterworth. // Experimental Wireless and the Radio Engineer, vol. 7, pp. 536–541, Oct. 1930.
6. Cauer W. Theorie der linearen Wechselstromschaltungen / W. Cauer. Bd. 1, Leipzig: Becker und Erler, 1941; Bd. 2, Berlin: Akademie, 1960.
7. Brafman F. Generating functions and associated Legendre polynomials / F. Brafman. // Quart. J. Math. (Oxford) 10 (2) (1959) 156–160.
8. Chongdar A. K. Group-theoretic study of certain generating functions of Gegenbauer polynomials / A. K. Chongdar // J. Orissa Math. Soc. 2 (1983) 71–85.
9. Gospodarczyk P. Efficient modified Jacobi-Bernstein basis transformation / P. Gospodarczyk, Woźny, // arXiv.org, 2017. [Electronic resource]. URL: <http://poivs.tsput.ru/Downloads/Publication/1701.03058v1.pdf> (accessed: 22.04.2021).

10. Alam S. On Some Mixed Trilateral Generating Functions of Modified Jacobi Polynomials by Group Theoretic Method, Univer / S. Alam and A. K. Chongdar // Jour. Appli. Math. 1(2), 63-71 (2013). [Electronic resource]. URL: <http://www.hrpub.org/download/201309/ujam.2013.010205.pdf> (accessed: 22.04.2021).

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Ulakhovich D. A. Osnovy teorii linejnykh ehlektricheskikh cepejj [Fundamentals of the Theory of Linear Electrical Circuits] / D. A. Ulakhovich. - St. Petersburg: BKhV-Petersburg, 2009. - 816 p. [in Russian]
2. Nesterov S. V. Sintez linejnykh ehlektricheskikh cepejj [Synthesis of Linear Electrical Circuits] / S. V. Nesterov. - Volgograd: Volgograd State University Publishing house, 2013. - 84 p. [in Russian]
3. Burenko E. A. Approksimacija kharakteristik ehlektricheskikh fil'trov racional'nyimi funkcijami. XLIV mezhdunarodnaja molodjozhnaja nauchnaja konferencija «Gagarinskie chtenija». Sbornik tezisov dokladov [Approximation of the Characteristics of Electric Filters by Rational Functions. XLIV International Youth Scientific Conference "Gagarin Readings". A Collection of Abstracts] / E. A. Burenko. Moscow, 2018 Vol. 1, pp. 375-376. [in Russian]
4. Burenko E. A. Proektirovanie aktivnykh chastotno-izbiratel'nykh fil'trov [Design of Active Frequency-Selective Filters] / E. A. Burenko, S. V. Nestervoc. Moscow, "Trudy MAI". Issue No. 101 of 14.09.2018, 26 pages. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=97011> (accessed: 22.04.2021) [in Russian]
5. Butterworth S. On the theory filter amplifier / S. Butterworth. // Experimental Wireless and the Radio Engineer, vol. 7, pp. 536–541, Oct. 1930.
6. Cauer W. Theorie der linearen Wechselstromschaltungen [Theory of linear AC Circuits] / W. Cauer. Bd. 1, Leipzid: Becker und Erler, 1941; Bd. 2, Berlin: Akademie, 1960. [in German]
7. Brafman F. Generating functions and associated Legendre polynomials / F. Brafman. // Quart. J. Math. (Oxford) 10 (2) (1959) 156–160.
8. Chongdar A. K. Group-theoretic study of certain generating functions of Gegenbauer polynomials / A. K. Chongdar // J. Orissa Math. Soc. 2 (1983) 71–85.
9. Gospodarczyk P. Efficient modified Jacobi-Bernstein basis transformation / P. Gospodarczyk, Woźny, // arXiv.org, 2017. [Electronic resource]. URL: <http://poivs.tspu.ru/Downloads/Publication/1701.03058v1.pdf> (accessed: 22.04.2021).
10. Alam S. On Some Mixed Trilateral Generating Functions of Modified Jacobi Polynomials by Group Theoretic Method, Univer / S. Alam and A. K. Chongdar // Jour. Appli. Math. 1(2), 63-71 (2013). [Electronic resource]. URL: <http://www.hrpub.org/download/201309/ujam.2013.010205.pdf> (accessed: 22.04.2021).

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.010>**РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОДНОЙ СТАНЦИЕЙ  
В СЕТИ WI-FI**

Научная статья

**Глушаков В.Е.\***

ORCID: 0000-0002-4235-2931,

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

\* Корреспондирующий автор (vitalikgl[at]gmail.com)

**Аннотация**

В данной статье рассматриваются разные математические модели передачи одного пакета одной станцией в сети Wi-Fi, позволяющие определить возможное время доставки при изменении таких параметров, как время задержки, коэффициент неудачной отправки, интенсивность отправки пакетов, скорость передачи данных и т.д.

Процесс обмена пакетами считается однородным Марковским с дискретными состояниями и непрерывным временем. Для нахождения предельных вероятностей состояний системы и закона распределения времени передачи информации для каждой из моделей построен размеченный граф состояний и соответствующая ему система уравнений Колмогорова, проведен сравнительный анализ модельных результатов между собой и с данными практического эксперимента.

Результаты, полученные в статье, могут быть полезны как при проектировании беспроводных участков распределенной сети обработки информации, так и при их модернизации.

**Ключевые слова:** Wi-Fi, CSMA/CA, WLAN, MAC, моделирование передачи данных, задержка, помехи, пропускная способность, протокол доступа к среде передачи.

**VARIOUS APPROACHES TO SIMULATING SINGLE STATION DATA TRANSMISSION  
WITHIN A WI-FI NETWORK**

Research article

**Glushakov V.E.\***

ORCID: 0000-0002-4235-2931,

Voronezh State University, Voronezh, Russia

\* Corresponding author (vitalikgl[at]gmail.com)

**Abstract**

The article discusses various mathematical models of the transmission of a single packet by a single station within a Wi-Fi network that allows for determining the possible delivery time when changing parameters such as the delay time, the failure rate, the rate of sending packets, the data transfer rate, etc.

The packet exchange process is considered to be a homogeneous Markov process with discrete states and continuous time. To find the limit probabilities of the states of the system and the law of distribution of the time of information transmission for each of the models, the study constructs a marked state graph and the corresponding system of Kolmogorov equations while also carrying out a comparative analysis between the model results and with the data of the practical experiment.

The results obtained in the article can be useful both in the design of wireless sections of a distributed information processing network and in their modernization.

**Keywords:** Wi-Fi, CSMA/CA, WLAN, MAC, data transfer simulation, delay, interference, bandwidth, transmission medium access protocol.

**Введение**

Тенденция развития информационных технологий требует обработки возрастающего объема информации. Для этого всё чаще применяют распределённые системы обработки данных с использованием беспроводных сетевых технологий. Однако их использование ограничено в настоящее время из-за временных задержек в сети и потери пакетов. Для расчёта параметров функционирования таких систем необходима разработка математических моделей, позволяющих учитывать эти факторы при проектировании систем для оптимизации времени доставки информации.

Построению таких моделей посвящены работы [1], [5], но сравнительного анализа этих моделей и соотнесения с экспериментальными данными не было.

В этой статье проводится сравнительный анализ различных моделей для передачи одного пакета и сопоставление полученных результатов с данными эксперимента.

**Принципы исследования**

В данной статье рассматриваются пять разных математических моделей для передачи одного пакета одной станцией в сети Wi-Fi. Процесс обмена пакетами будем считать однородным Марковским с дискретными состояниями и непрерывным временем. Для каждой из моделей представлен размеченный граф состояний для оценки возможного времени доставки пакета, причем таким образом, чтобы состояния, в которых пакет был доставлен, стали конечными, построена соответствующая система уравнений Колмогорова, проведен сравнительный анализ модельных результатов с результатами практического эксперимента.

Данные модели были построены для стандарта 802.11, использующего метод множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA) [6, С. 13-14].

Последовательность обмена пакетами (для стандарта 802.11a) между передающей и принимающей станциями в случае успешной и неудачной передачи одного пакета (фрагмента) с первой попытки представлена на рисунках 1 и 2 соответственно [7, С. 17].

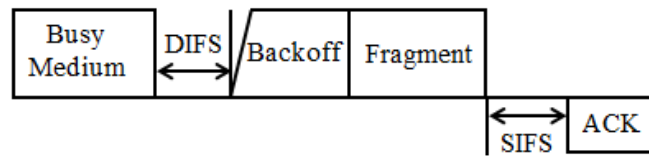


Рис. 1 – Удачная передача одного пакета

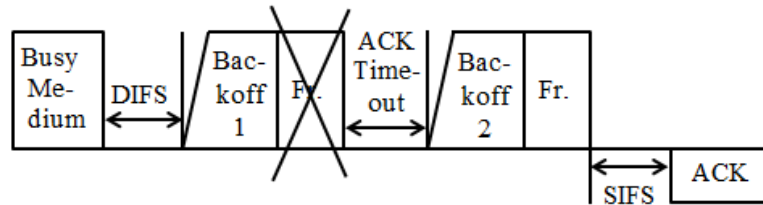


Рис. 2 – Неудачная передача одного пакета с первой попытки

Заметим, что задержка при передаче информации может быть только во время передачи фрагмента и пакета ACK.

Для успешной передачи нескольких пакетов с целью повышения эффективности передачи данных используется режим *Bursting* [8], [9], при котором происходит увеличение пропускной способности за счет удаления части временных затрат. В этом случае последовательность отправки одним сетевым устройством  $n$  пакетов имеет вид, представленный на рисунке 3 [9, С. 80].

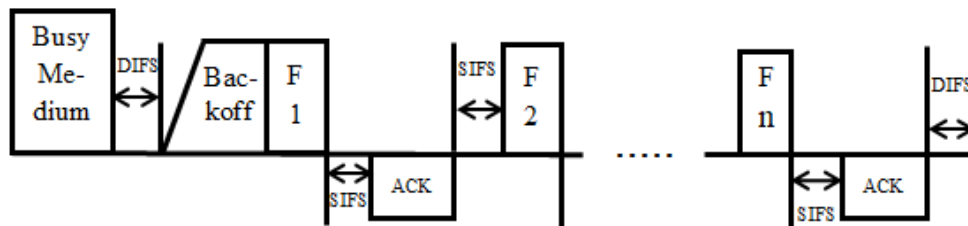


Рис. 3 – Отправка  $n$  пакетов в режиме Bursting

Рассмотрим теперь все пять моделей.

#### Модель 1 – неудачная отправка одного пакета с первой попытки

Этой модели отвечает последовательность обмена пакетами, представленная на рисунке 2, тогда передаче данных будет соответствовать размеченный граф состояний, изображенный на рисунке 4.

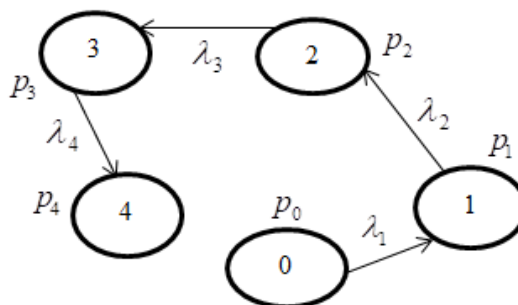


Рис. 4 – Граф состояний для неудачной отправки одного пакета с первой попытки

Опишем приведенные на рисунке 4 состояния:

- $p_0$  – начальное состояние (нет пакетов),
- $p_1$  – генерация пакета передающей станцией,
- $p_2$  – передающая станция ждет время  $DIFS + Backoff\ Time\_1$ , передает один пакет (фрагмент) с возможной задержкой, ждет установленный промежуток времени  $ACK\ Timeout$ ,
- $p_3$  – станция ждет время  $Backoff\ Time\_2$ , повторно передает пакет с возможной задержкой,
- $p_4$  – станция ждет время  $SIFS$ , принимающая станция отправляет пакет подтверждения  $ACK$  с возможной задержкой.

Здесь  $\lambda_1$  пакетов/с – интенсивность передачи информации передающей станцией,  $\lambda_i$  – интенсивность передачи информации,  $\lambda_i = 1/t_i$  ( $i = 2, 3, 4$ ),

$$t_2 = t_{DIFS} + t_{BACKOFF\_1} + t_{FRAGMENT} + t_{ACK\_Timeout} + t_{задержки}, \quad t_3 = t_{BACKOFF\_2} + t_{FRAGMENT} + t_{задержки}, \\ t_4 = t_{SIFS} + t_{ACK} + t_{задержки}.$$

### Модель 2 – возможная неудачная отправка одного пакета с первой попытки (1 вариант)

Предположим, что возможна неудачная передача информации с первой попытки, но гарантированно удачная со второй, причем при передаче информации возможна задержка.

При построении этой модели были использованы схемы передачи информации, представленные на рисунках 2 и 3.

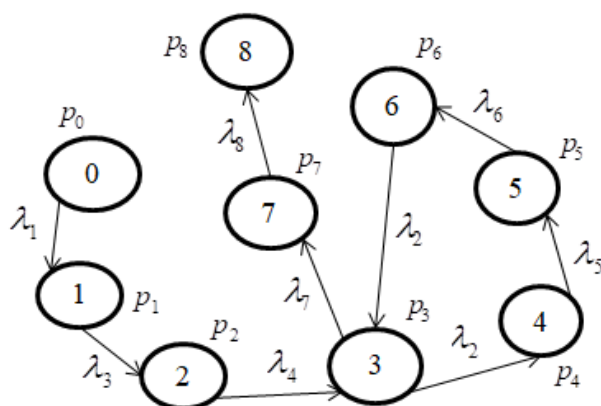


Рис. 5 – Граф состояний для возможной неудачной передачи одного пакета одной станцией (1 вариант)

Опишем представленные на рисунке 5 состояния:

- $p_0$  – начальное состояние (нет пакетов для отправки),
- $p_1$  – генерация пакетов передающей станцией,
- $p_2$  – пауза 1 (передающая станция ждет время  $DIFS + Backoff\ Time\_1$ ),
- $p_3$  – отправка пакета с возможной задержкой,
- $p_4$  – неудачная передача части пакетов,
- $p_5$  – пауза 2 (передающая станция ждет время  $ACK\_Timeout$ ),
- $p_6$  – пауза 3 (передающая станция ждет время  $Backoff\ Time\_2$ ),
- $p_7$  – успешная передача пакетов с задержкой, станция ждет время  $SIFS$ ,
- $p_8$  – принимающая станция передает пакет подтверждения  $ACK$  с возможной задержкой.

Здесь  $\lambda_1$  пакетов/с – интенсивность передачи информации передающей станцией,  $\lambda_2 = k \cdot \lambda_1$ , где  $k$  – коэффициент неудачной отправки (часть от отправленных пакетов),  $\lambda_i$  – интенсивность передачи информации,  $\lambda_i = 1/t_i$  ( $i = 3, \dots, 8$ ),  $t_3 = t_{DIFS} + t_{BACKOFF\_1}$ ,  $t_4 = t_{FRAGMENT} + t_{задержки}$ ,  $t_5 = t_{ACK\_Timeout}$ ,  $t_6 = t_{BACKOFF\_2}$ ,  $t_7 = t_{SIFS}$ ,  $t_8 = t_{ACK} + t_{задержки}$ .

### Модель 3 – возможная неудачная передача одного пакета с первой попытки (2 вариант)

Это другая модификация предыдущей модели. В этом случае граф состояний будет иметь вид, представленный на рисунке 6.

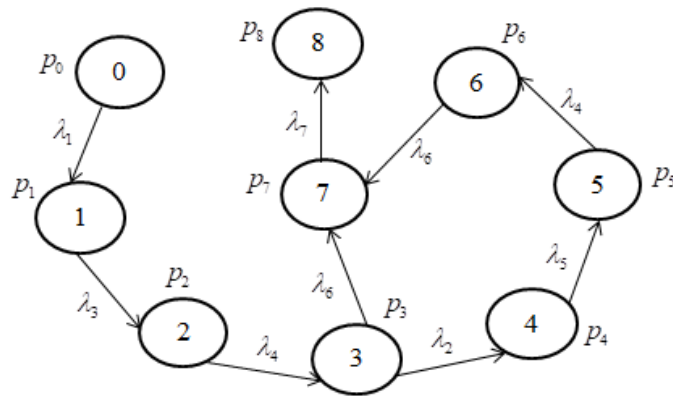


Рис. 6 – Граф состояний для возможной неудачной передачи одного фрагмента одной станцией с задержкой (2 вариант)

Опишем представленные на рисунке 6 состояния:

- $p_0$  – начальное состояние (нет пакетов для отправки),
- $p_1$  – генерация пакетов передающей станцией,
- $p_2$  – пауза 1 (передающая станция ждет время  $DIFS + Backoff\_Time\_1$ ),
- $p_3$  – отправка пакета с возможной задержкой,
- $p_4$  – неудачная передача части пакетов с первого раза,
- $p_5$  – пауза 2 (передающая станция ждет время  $ACK\_Timeout + Backoff\_Time\_2$ ),
- $p_6$  – успешная передача “неудачных” пакетов с возможной задержкой,
- $p_7$  – передающая станция ждет время  $SIFS$ ,
- $p_8$  – принимающая станция передает пакет подтверждения  $ACK$  с возможной задержкой.

Здесь  $\lambda_1$  пакетов/с – интенсивность передачи информации передающей станцией,  $\lambda_2 = k \cdot \lambda_1$ , где  $k$  – коэффициент неудачной отправки (часть от отправленных пакетов),  $\lambda_i$  – интенсивность передачи информации,  $\lambda_i = 1/t_i$  ( $i=3, \dots, 8$ ),  $t_3 = t_{DIFS} + t_{BACKOFF\_1}$ ,  $t_4 = t_{FRAGMENT} + t_{задержки}$ ,  $t_5 = t_{ACK\_Timeout} + t_{BACKOFF\_2}$ ,  $t_6 = t_{SIFS}$ ,  $t_7 = t_{ACK} + t_{задержки}$ .

#### Модель 4 – циклическая удачная передача одного пакета

Для построения этой модели была использована схема, изображенная на рисунке 3, только вместо последовательной отправки пакетов предлагается циклическая. Соответствующий размеченный граф представлен на рисунке 7.

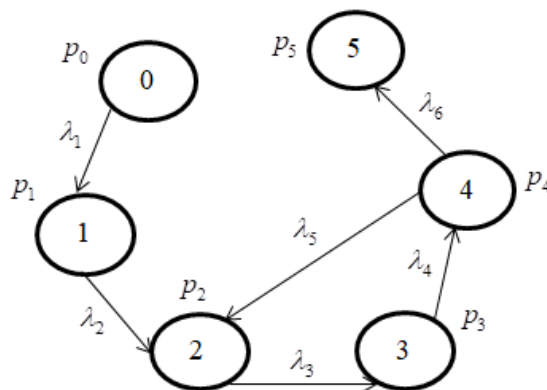


Рис. 7 – Граф состояний для циклической удачной передачи одного фрагмента одной станцией с задержкой

Опишем представленные на рисунке 7 состояния:

- $p_0$  – начальное состояние (нет пакетов для отправки),
- $p_1$  – генерация пакетов передающей станцией,
- $p_2$  – пауза 1 (станция ждет время  $DIFS + Backoff\_Time$ ),
- $p_3$  – отправка пакета с возможной задержкой,

- $p_4$  – пауза 2 (станция ждет время  $SIFS$ ),
- $p_5$  – принимающая станция передает пакет подтверждения  $ACK$  с возможной задержкой.

Здесь  $\lambda_1$  пакетов/с – интенсивность передачи информации передающей станцией,  $\lambda_i$  – интенсивность передачи информации,  $\lambda_i = 1/t_i$  ( $i=2, \dots, 6$ ),  $t_2 = t_{DIFS} + t_{BACKOFF}$ ,  $t_3 = t_{FRAGMENT} + t_{задержки}$ ,  $t_4 = t_{SIFS}$ ,  $t_5 = t_{ACK} + t_{SIFS} + t_{задержки}$ ,  $t_6 = t_{ACK} + t_{задержки}$ .

#### Модель 5 – последовательная удачная передача $n$ пакетов

Для успешной передачи последовательно  $n$  пакетов используется режим *Bursting*. В этом случае последовательность отправки одним сетевым устройством  $n$  пакетов имеет вид, представленный на рисунке 3. Соответствующий размеченный граф изображен на рисунке 8.

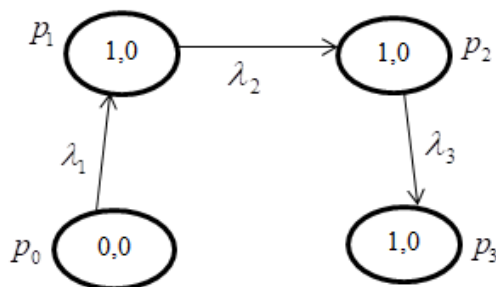


Рис. 8 – Граф состояний для последовательной передачи  $n$  пакетов в режиме *Bursting*

Из схемы на рисунке 3 видно, что на каждый отправленный пакет (фрагмент) с задержкой приходится 2 паузы  $SIFS$  и 1 пакет  $ACK$  с задержкой.

Опишем представленные на рисунке 8 состояния:

- $p_0$  – начальное состояние (нет пакетов для отправки),
- $p_1$  – генерация пакетов передающей станцией,
- $p_2$  – пауза 1 (станция ждет время  $DIFS + Backoff\ Time$ ),
- $p_3$  – отправка  $n$  пакетов с возможной задержкой, передающая станция ждет время  $2n\ SIFS$ , принимающая станция передает  $n$  пакетов подтверждения  $ACK$  с возможной задержкой.

Здесь  $\lambda_1$  пакетов/с – интенсивность передачи информации передающей станцией,  $\lambda_i$  – интенсивность передачи информации,  $\lambda_i = 1/t_i$  ( $i=2,3$ ),  $t_2 = t_{DIFS} + t_{BACKOFF}$ ,  $t_3 = n \cdot (2 \cdot t_{SIFS} + t_{FRAGMENT} + t_{ACK} + 2 \cdot t_{задержки})$ .

#### Метод решения

Для нахождения предельных вероятностей состояний системы и закона распределения времени передачи информации строится система уравнений Колмогорова. Для модели 1 она имеет следующий вид [10, С. 133-134]:

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{dt} = -\lambda_1 p_0, \\ \frac{dp_1}{dt} = \lambda_1 p_0 - \lambda_2 p_1, \\ \frac{dp_2}{dt} = \lambda_2 p_1 - \lambda_3 p_2, \\ \frac{dp_3}{dt} = \lambda_3 p_2 - \lambda_4 p_3, \\ \frac{dp_4}{dt} = \lambda_4 p_3. \end{cases}$$

Начальные условия –

$$\begin{cases} p_0(0) = 1, \\ p_i(0) = 0 \quad (i=1, \dots, 4). \end{cases}$$

Для данной модели плотность распределения вероятностей времени доставки одного пакета передающей станцией будет определяться формулой [10, С. 175]:



$$F(t) = \lambda_4 p_3(t).$$

Для остальных моделей системы уравнений Колмогорова строятся аналогично.

### Основные результаты и их обсуждение

При решении всех систем дифференциальных уравнений использовались значения параметров из стандарта IEEE 802.11a:  $t_{SLOT\_TIMER} = 9 \text{ мкс}$ ,  $t_{SIFS} = 16 \text{ мкс}$ ,  $t_{DIFS} = t_{SIFS} + 2t_{SLOT\_TIMER} = 34 \text{ мкс}$ ,  $t_{ACK\_Timeout} = 100 \text{ мкс}$ , размер фрейма  $ACK$  – 14 байт, размер передаваемых пакетов (фреймов)  $FRAGMENT_i$  – 700 байт. Для моделей 1-3  $t_{BACKOFF\_i} = d_i \cdot t_{SLOT\_TIMER}$  ( $d_i$  – случайная величина таймера отката), причем  $d_i = 1$  ( $i = 1, 2$ ) в случае минимальных временных затрат и  $d_1 = 31$ ,  $d_2 = 63$  – в случае максимальных. Для моделей 4-5  $t_{BACKOFF} = d \cdot t_{SLOT\_TIMER}$ , где  $d = 1$  в случае минимальных временных затрат и  $d = 31$  – в случае максимальных. Коэффициент неудачной отправки (для моделей 2-3)  $k = 0,1\%$ . Скорость передачи данных  $K$  – 100 Мбит/с. Решение системы находилось численно на отрезке  $[0; 0.04]$  с числом отрезков разбиения  $N = 2000$ . Время задержки  $t_{задержки}$  принимает значения 0 мкс и 125 мкс. Интенсивность передачи информации  $\lambda_1$  – 200, 400, 600, 800 и 1000 пакетов/с (п/с).

Для численного решения применялся программный математический пакет Maple 13 и метод Рунге-Кутты-Фелберга 4-5 порядков.

Для проверки результатов моделирования в одной из подвальных лабораторий Воронежского госуниверситета были проведены измерения реальной скорости передачи пакетов. Компьютер был соединен сетевым проводом Ethernet с двухдиапазонным Wi-Fi роутером Tp-Link Archer C20 AC750 (частота 5 ГГц), ноутбук – с помощью Wi-Fi. Захват трафика производился на ноутбуке с помощью программы Ethereal. Устройства находились на расстоянии 3 м в одной лаборатории в метре от земли.

Так как к сети Wi-Fi был подключен только один клиент (компьютер), задержки можем считать минимальными.

В таблице 1 указаны ожидаемое время получения пакетов для первых 4-х моделей и реальное время при разной загрузке канала. Первое значение – минимальное, для  $d_{1,2} = 1$  (модели 1-3) и  $d = 1$  (модель 4),  $t_{задержки} = 0$ , второе – максимальное, для  $d_1 = 31$ ,  $d_2 = 63$  (модели 1-3) и  $d = 31$  (модель 4),  $t_{задержки} = 125$ . Очевидно, что для одной пары клиент-сервер ни одна из моделей 1-4 не подходит, хотя при большой загрузке сети (1000 п/с) экспериментальные данные приближаются к модельным, особенно для 2-3 моделей.

Таблица 1 – Реальное и ожидаемое время получения пакета для моделей 1-4

|             | Скорость передачи информации |                            |                            |                            |                            |
|-------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|             | 200 п/с                      | 400 п/с                    | 600 п/с                    | 800 п/с                    | 1000 п/с                   |
| Эксперимент | 0,000465223<br>0,000484871   | 0,000465223<br>0,000473366 | 0,000459202<br>0,000489319 | 0,000782919<br>0,000784406 | 0,000820112<br>0,000849802 |
| 1 модель    | 0,00525994–<br>0,00645821    | 0,00277587–<br>0,00397887  | 0,00194255–<br>0,00314554  | 0,00152588–<br>0,00272887  | 0,00127588–<br>0,00247888  |
| 2 модель    | 0,00509804–<br>0,00561630    | 0,00261345–<br>0,00313345  | 0,00178012–<br>0,00230012  | 0,00136346–<br>0,00188346  | 0,00111346–<br>0,00163346  |
| 3 модель    | 0,00509805–<br>0,00561632    | 0,00261347–<br>0,00313347  | 0,00178014–<br>0,00230015  | 0,00136347–<br>0,00188348  | 0,00111347–<br>0,00163349  |
| 4 модель    | 0,00510239–<br>0,00578818    | 0,00261780–<br>0,00330598  | 0,00178448–<br>0,00247265  | 0,00136782–<br>0,00205599  | 0,00111782–<br>0,00180599  |

Если же проводить сравнительный анализ этих моделей между собой, то видно, что результаты численного эксперимента для 2-й и 3-й моделей практически совпадают, хотя у 3-й незначительно выше. Самые большие значения получились для 1-й модели, что объясняется большими временными затратами. Наиболее неудачной из этих моделей является 4-я, у которой, несмотря на отсутствие повторной отправки пакета, временные затраты, хотя и меньше, чем у 1-й (что объяснимо), но больше 2-й и 3-й.

Для 5-й модели были получены грубые оценки определения времени доставки пакета: результаты численного эксперимента для последовательной отправки  $n$  пакетов были разделены на  $n$ . Полученные значения при разной загрузке сети приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Реальное и ожидаемое время получения пакета для модели 5

| Скорость (пакетов/с) | Эксперимент                  | Модель 5          |     |                 |
|----------------------|------------------------------|-------------------|-----|-----------------|
|                      |                              | число пакетов $n$ | $d$ | ожидаемое время |
| 200                  | 0,0004843563<br>0,0004848711 | 13                | 1   | 0,000472889     |
|                      |                              |                   | 31  | 0,000493571     |
| 400                  | 0,000465223<br>0,000473366   | 7                 | 1   | 0,000449759     |
|                      |                              |                   | 31  | 0,000488329     |
| 600                  | 0,000459202<br>0,000489319   | 5                 | 1   | 0,000428407     |
|                      |                              |                   | 31  | 0,000482406     |

Окончание таблицы 2 – Реальное и ожидаемое время получения пакета для модели 5

| Скорость<br>(пакетов/с) | Эксперимент                | Модель 5          |     |                 |
|-------------------------|----------------------------|-------------------|-----|-----------------|
|                         |                            | число пакетов $n$ | $d$ | ожидаемое время |
| 800                     | 0,00078292<br>0,000784407  | 2                 | 1   | 0,000732974     |
|                         |                            |                   | 31  | 0,000867972     |
| 1000                    | 0,000820112<br>0,000849802 | 2                 | 1   | 0,000607974     |
|                         |                            |                   | 31  | 0,000742974     |
|                         |                            | 1                 | 1   | 0,001129474     |
|                         |                            |                   | 31  | 0,001379474     |

Таким образом, для одной пары клиент-сервер отправка пакетов осуществляется в режиме *Bursting*, причем (что ожидаемо), с увеличением загрузки канала число пакетов уменьшается.

### Заключение

Из анализа полученных результатов видно, что для одной пары клиент-сервер передача пакетов при малой загрузке канала осуществляется в режиме *Bursting*, а при большой – приближается к результатам для моделей 2-3, что может говорить о том, что при изменении загрузки каналов происходит изменение режимов передачи данных.

Этот аспект требует более детальной проработки.

Результаты данной статьи могут представлять интерес при проектировании и модернизации сети Wi-Fi.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / Reference

1. Глушаков В. Е. Исследование подходов к моделированию передачи данных в беспроводных сетях / В. Е. Глушаков // Научный журнал «Globus»: XXX Международная научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки» (Санкт-Петербург, 4 мая 2018 г.). – Санкт-Петербург, 2018. – Ч. 1. – С. 48-55.
2. Глушаков В. Е. Исследование зависимости времени доставки информации от числа фрагментов / В. Е. Глушаков // Информационные технологии моделирования и управления. Международный научно-технический журнал. – Воронеж : Научная книга, 2020. – № 2 (120). – С. 130-138.
3. Глушаков В. Е. Исследование модели неудачной передачи информации / В. Е. Глушаков // Современная наука: проблемы, идеи, тенденции : материалы Международной научно-практической конференции 23 июня 2020 года (г. Нефтекамск, Башкортостан). – Нефтекамск : Научно-издательский центр «Мир науки», 2020. – С. 46-53.
4. Глушаков В. Е. Численное моделирование повышения производительности передачи данных в беспроводных сетях / В. Е. Глушаков // Научный альманах. – 2020. – № 4-1 (66). – С. 19-25.
5. Глушаков В. Е. Исследование модели возможной неудачной передачи одного пакета с задержкой в сети Wi-Fi / В. Е. Глушаков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 5-1(107). – С. 61-66.
6. Платунова С. М. Архитектура и технические средства корпоративной сети на базе беспроводного оборудования WI-FI фирмы ZyXEL : учеб. пособие / С. М. Платунова. – Санкт-Петербург : ИТМО, 2014. – 61 с.
7. Раздел 7. Локальные беспроводные сети WiFi. Лекции по стандартам. – [Электронный ресурс]. URL: <http://docplayer.ru/33818454-Razdel-7-lokalnye-besprovodnye-seti-wifi-lekcii-po-standartam.html> (дата обращения: 3.03.18).
8. Методы увеличения производительности в беспроводных сетях Wi-Fi, часть первая: Bursting, Compression, Fast Frames, Concatenation. – [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ixbt.com/comm/tech-80211g-super\\_1.shtml](https://www.ixbt.com/comm/tech-80211g-super_1.shtml) (дата обращения: 20.04.2020).
9. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. – ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition. – 512 p. – [Electronic resource]. URL: <https://www.wardriving.ch/hpneu/info/doku/802.11-1999.pdf> (accessed: 20.04.2020).
10. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения : учеб. пособие для втузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – Москва : Высшая школа, 2000. – 383 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Glushakov V. E. Issledovanie podhodov k modelirovaniyu peredachi dannyh v besprovodnyh setjah [Study of approaches to modeling data transmission in wireless networks] / V. E. Glushakov // Nauchnyj zhurnal «Globus»: XXX Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Dostizhenija i problemy sovremennoj nauki» (Sankt-Peterburg, 4 maja 2018 g.) [Scientific journal "Globus": XXX International Scientific and Practical Conference "Achievements and Problems of Modern Science" (St. Petersburg, May 4, 2018)]. – Sankt-Peterburg, 2018. – Part 1. – pp. 48-55. [in Russian]
2. Glushakov V. E. Issledovanie zavisimosti vremeni dostavki informacii ot chisla fragmentov [Research on the dependence of information delivery time on the number of fragments] / V. E. Glushakov // Informacionnye tehnologii modelirovanija i upravlenija. Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal [Information technologies of modeling and management. International Scientific and Technical Journal]. – Voronezh : Nauchnaja kniga, 2020. – № 2 (120). – pp. 130-138. [in Russian]
3. Glushakov V. E. Issledovanie modeli neudachnoj peredachi informacii [Study of the model of unsuccessful transmission of information] / V. E. Glushakov // Sovremennaja nauka: problemy, idei, tendencii : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskaj konferencii 23 ijunya 2020 goda (g. Neftekamsk, Bashkortostan) [Modern science: problems, ideas, trends: materials of the International Scientific and Practical Conference on June 23, 2020 (Neftekamsk, Bashkortostan)]. – Neftekamsk : Mir nauki, 2020. – pp. 46-53. [in Russian]

4. Glushakov V. E. Chislennoe modelirovanie povyshenija proizvoditel'nosti peredachi dannyh v besprovodnyh setjah [Numerical modeling of increasing the performance of data transmission in wireless networks] / V. E. Glushakov // Nauchnyj al'manah [Scientific Almanac]. – 2020. – № 4-1 (66). – pp. 19-25. [in Russian]
5. Glushakov V. E. Issledovanie modeli vozmozhnoj neudachnoj peredachi odnogo paketa s zaderzhkoj v seti Wi-Fi [Study of the model of possible unsuccessful transmission of one packet with a delay in the Wi-Fi network] / V. E. Glushakov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International research journal]. – 2021. – № 5-1(107) . – P. 61-66. [in Russian]
6. Platunova S. M. Arhitektura i tehicheskie sredstva korporativnoj seti na baze besprovodnogo oborudovanija WI-FI firmy ZyXEL : ucheb. posobie [Architecture and technical means of the corporate network based on wireless WI-FI equipment of the company ZyXEL: textbook] / S. M. Platunova. – Sankt-Peterburg : ITMO, 2014. – 61 p. [in Russian]
7. Razdel 7. Lokal'nye besprovodnye seti WiFi. Lekcii po standartam [Section 7. Local Wireless Networks WiFi. Lectures on standards]. – [Electronic resource]. URL: <http://docplayer.ru/33818454-Razdel-7-lokalnye-besprovodnye-seti-wifi-lekcii-po-standartam.html> (accessed: 3.03.18). [in Russian]
8. Metody uvelichenija proizvoditel'nosti v besprovodnyh setjah Wi-Fi, chast' pervaja: Bursting, Compression, Fast Frames, Concatenation [Methods for increasing performance in wireless Wi-Fi networks, part one: Bursting, Compression, Fast Frames, Concatenation]. – [Electronic resource]. URL: [https://www.ixbt.com/comm/tech-80211g-super\\_1.shtml](https://www.ixbt.com/comm/tech-80211g-super_1.shtml) (accessed: 20.04.2020). [in Russian]
9. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. – ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition. – 512 p. – [Electronic resource]. URL: <https://www.wardriving.ch/hpneu/info/doku/802.11-1999.pdf> (accessed: 20.04.2020).
10. Ventcel' E. S. Teorija sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozhenija : uchebnoe posobie dlja vtuzov [The theory of random processes and its engineering applications : a textbook for knots] / E. S. Ventcel', L. A. Ovcharov. – Moscow : Vysshaja shkola, 2000. – 383 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.011>**АЛГОРИТМ ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОДНОМЕРНОЙ УПАКОВКИ ОБЪЕКТОВ  
С ИЗМЕНЕНИЕМ ВЕСА**

Научная статья

**Дворянкин А.М.<sup>1</sup>, Жан Макс Хабиб Тале<sup>2</sup>, \***<sup>1, 2</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

\* Корреспондирующий автор (jeanmax.habib[at]mail.ru)

**Аннотация**

Цель работы заключается в поиске оптимального размещения одномерных объектов (отрезков с заданным весом) с минимальным отклонением центра тяжести от заданного и минимальным отклонением центра тяжести объектов при условии обнуления веса одного заданного объекта. В работе предлагается формализованная постановка задачи и алгоритм поиска на основе полного перебора множества всех возможных решений. Очевидно, что данный алгоритм будет находить глобальное решение задачи, и будет служить основой для сравнения эффективности будущих приближенных алгоритмов.

Приводится формула, определяющая возможное отклонение для заданных отрезков. Приведены примеры алгоритма. По результатам работы можно спланировать оптимальное размещение груза на транспортном средстве.

**Ключевые слова:** одномерная упаковка, сила, нагруженные отрезки, алгоритм, упаковка, отклонение от целевого центра тяжести.

**A COMPLETE SURVEILLANCE ALGORITHM FOR THE PROBLEM OF ONE-DIMENSIONAL PACKING  
OF OBJECTS WITH A CHANGE IN WEIGHT**

Research article

**Dvoryankin A.M.<sup>1</sup>, Jean Max Habib Tape<sup>2</sup>, \***<sup>1, 2</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

\* Corresponding author (jeanmax.habib[at]mail.ru)

**Abstract**

The purpose of the work is to find the optimal placement of one-dimensional objects (segments with a given weight) with a minimum deviation of the center of gravity from a given one and a minimum deviation of the center of gravity of objects, provided that the weight of one given object is zeroed. The paper proposes a formalized formulation of the problem and a search algorithm based on a complete enumeration of the set of all possible solutions. Obviously, this algorithm will find a global solution to the problem, and will serve as a basis for comparing the effectiveness of future approximate algorithms.

A formula is given that determines the possible deviation for the given segments. Examples of the algorithm are given. Based on the results of the work, it is possible to plan the optimal placement of the cargo on the vehicle.

**Keywords:** one-dimensional packing, force, loaded segments, algorithm, packing, deviation from the target center of gravity.

**Введение**

Имеются различные постановки и алгоритмы решения задач одномерной оптимальной упаковки (размещения): «задачи о ранце» [1], упаковка одномерных контейнеров [2], представление перестановками решений одномерной задачи упаковки [3], оптимальная загрузка летательного аппарата [4], [5]. Задача одномерной упаковки является задачей комбинаторной оптимизации и относится к классу NP-полных [6].

В статье рассматривается модель и задача размещения отрезков, нагруженных сосредоточенной силой [7]. Критерий оптимального размещения - минимальное отклонение центра тяжести от заданного значения. Ставится новая задача, которая формулируется с условием: отклонение центра тяжести при обнулении веса одного заданного отрезка должно быть минимальным.

Эта задача возникает при размещении груза на транспортном средстве, для которого положение центра тяжести является важным, и при сбросе некоторого груза изменение центра тяжести должно быть минимальным. Предложен алгоритм решения задачи на основе полного перебора. Найденное решение является глобально оптимальным. Несмотря на высокую сложность, алгоритма он будет полезен при сравнительном анализе эффективности будущих приближенных алгоритмов.

**Задача упаковки**

Задача упаковки формулируется так: пусть имеется набор отрезков имеющие различную длину и вес, требуется упаковать отрезки так, чтобы их центр тяжести был как можно ближе к указанному. На основе этих теорем построен алгоритм решения задачи размещения отрезков, нагруженных сосредоточенной силой

Эта задача возникает при проектировании компоновки самолёта, размещения груза на транспортном средстве, для которого положение центра тяжести является важным.

**Модель**

Будем использовать обозначения отрезков, понятие соединения отрезков и формулы вычисления центра тяжести соединения отрезков в соответствии с работой [7]. Обозначим  $A = (a, p, b)$  - горизонтальный отрезок, где  $a$  - расстояние от левого края отрезка до точки приложения вертикальной силы  $p$  (вес отрезка),  $b$  - расстояние от точки приложения силы до правого края отрезка. Полагаем  $a > 0, p \geq 0, b > 0$ . Обозначим  $d = a + b$  длину отрезка. Для обозначения различных отрезков будем использовать нижние индексы в виде букв или цифр:  $A_y = (a_y, p_y, b_y)$  или  $A_i = (a_i, p_i, b_i)$ . Компоненты

отрезка  $A$  будем также обозначать как  $a = a(A)$ ,  $p = p(A)$ ,  $b = b(A)$ . Через Соединение отрезков  $A_x$  и  $A_y$  будем обозначать как  $A_{xy} = A_x A_y$ . При этом  $A_{xy} = (a_{xy}, p_{xy}, b_{xy})$ , где компоненты соединения вычисляются по формулам [7]:

$$a_{xy} = a(A_{xy}) = [p_x a_x + p_y (a_x + b_x + a_y)], p_{xy} = p(A_{xy}) = p_x + p_y, b_{xy} = b(A_{xy}) = d_x + d_y - a_{xy}.$$

### Постановка задачи

Предполагаем, что задано множество отрезков  $R = \{A_i = (a_i, p_i, b_i)\}$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ . Среди этих отрезков выделен один:  $A_k = (a_k, p_k, b_k)$ . Назовем его "груз". Этот груз будет удаляться (сбрасываться), т.е.  $p_k$  через некоторое время будет равно 0. Задано число  $C$  – целевой центр тяжести соединения отрезков из множества  $R$ . Пусть  $J_n$  – множество перестановок чисел  $1, 2, \dots, n$ . Любой перестановке  $I = (i_1, i_2, \dots, i_n) \in J_n$  можно сопоставить соединение отрезков:

$$AI = A_{i_1} A_{i_2} \dots A_{i_n}.$$

Введем обозначения:

- $\text{ЦТ1}(AI)$  – центр тяжести соединения отрезков на перестановке  $I$  при условии  $p_k \neq 0$ ;
- $\text{ЦТ2}(AI)$  – центр тяжести соединения отрезков на перестановке  $I$  при условии  $p_k = 0$ ;
- $\text{delta1}(AI) = |\text{ЦТ1}(AI) - C|$  – отклонение от целевого центра тяжести при  $p_k \neq 0$ ;
- $\text{delta2}(AI) = |\text{ЦТ2}(AI) - C|$  – отклонение от целевого центра тяжести при  $p_k = 0$ ;
- $\text{delta}(AI) = \max(\text{delta1}(AI), \text{delta2}(AI))$  – максимальное отклонение центра тяжести соединения отрезков на перестановке  $I$  от целевого положения с учётом обнуления веса отрезка с номером  $k$ .
- $(\langle \text{перестановка} \rangle, \langle \text{ЦТ1} \rangle \text{ при } P_k \neq 0, \langle \text{ЦТ2} \rangle \text{ при } P_k = 0, \langle \text{delta} \rangle = \max(\text{delta1}, \text{delta2}))$

**Формулировка задачи:** найти перестановку  $T = (t_1, t_2, \dots, t_n) \in J_n$ , на которой достигается минимальное значение величины  $\text{delta}(AI)$ .

### Алгоритм

Для решения сформулированной задачи предлагается алгоритм полного перебора всех перестановок с ограничением. Т.к. сложность алгоритма  $O(n!)$ , то практическое его использование рекомендуется для  $n \leq 10$ .

Обоснование рекомендации. Причина рекомендации – рост  $n!$ , который представлен в таблице.

Таблица 1 – Рост  $n!$

| $n$  | 5   | 8     | 10               | 13               | 15                  | 30                  |
|------|-----|-------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| $n!$ | 129 | 40320 | $3.6 \cdot 10^6$ | $6.2 \cdot 10^9$ | $1.3 \cdot 10^{12}$ | $2.7 \cdot 10^{32}$ |

Предполагаем, что  $n$  – число отрезков для упаковки. При  $n=5$  расчет всех вариантов можно сделать вручную. При  $n=8$  для расчета может потребоваться программируемый калькулятор. При  $n=10$  потребуются вычислительная техника более высокой производительности. При  $n=13$  суперкомпьютер. При  $n=15$  не справятся современные компьютеры. Количество вариантов при  $n=30$  превышает количество атомов на земле.

Считаем, что для сравнительного анализа эффективности будущих приближенных алгоритмов решения этой задачи  $n=10$  будет достаточно.

Шаг 0. Определить значение  $n$  – количество отрезков. Инициализация необходимых массивов и ввод исходных данных: множество отрезков  $R$ ,  $C$  – целевой центр тяжести для соединения отрезков,  $k$  – номер отрезка, вес которого будет обнуляться. Присвоить переменной  $w$  большое значение.

Шаг 1. Генерация очередной перестановки  $I$ .

Шаг 2. На перестановке  $I$  вычислить центры тяжести соединения отрезков  $\text{ЦТ1}(AI)$  и  $\text{ЦТ2}(AI)$ , вычислить отклонения  $\text{delta1}(AI)$ ,  $\text{delta2}(AI)$  и  $\text{delta}(AI)$ .

Шаг 3. Выполнить сравнение величин  $w$  и  $\text{delta}(AI)$ .

Шаг 4. Если  $\text{delta}(AI) < w$ , то перейти на шаг 5. Иначе на шаг 6.

Шаг 5.  $w := \text{delta}(AI)$ , запомнить перестановку  $I$  ( $T := I$ ).

Шаг 6. Если  $I$  – НЕ последняя перестановка, то перейти на шаг 1.

Шаг 7. Конец.

Результат работы алгоритма – оптимальная перестановка  $T$ .

В таблице 2 представлен пример исходных данных при  $n = 5$ ,  $C=30$ ,  $k=2$ , где  $k$  – номер отрезка с обнулением веса.

Таблица 2 – Исходные данные

| $A$   | $a(A)$ | $p(A)$ | $b(A)$ |
|-------|--------|--------|--------|
| $A_1$ | 7      | 8      | 12     |
| $A_2$ | 5      | 5      | 8      |
| $A_3$ | 4      | 1      | 2      |
| $A_4$ | 2      | 6      | 15     |
| $A_5$ | 6      | 10     | 11     |

В таблице 3 представлен результат работы алгоритма.

Таблица 3 – Результат работы алгоритма

| Количество отрезков | Пример входных данных                                              | Результат работы алгоритма                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Время выполнения задач |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| N = 5               | C = 30 ;<br>A p b<br>7 8 12<br>5 5 8<br>4 1 2<br>2 6 15<br>6 10 11 | При $k=2$ ; $p_2=0$ ;<br>номер Оптимальной перестановки: 111 Оптимальная перестановка: (5 3 2 1 4 )<br>$\text{ЦТ1} = 30.233$ $\text{delta1} = 0.233$<br>$\text{ЦТ2} = 30.68$ $\text{delta2} = 0.68$<br>решение задачи находится в массиве с заданным отрезком с нулевым весом<br>Целевой ЦТ = 30<br>$\text{Delta} = \max(\text{delta1}, \text{delta2}) = 0.68$<br>Оптимальный центр тяжести ЦТ2 = 30.68<br>Отклонение от целевого тяжести ЦТ(delta2) = 0.68 | 1.30 Секунда           |

### Тестирование программы

на тестовых примерах была проведена связь между количеством сегментов N и временем выполнения программы V сначала для T1 при  $p_k \neq 0$  и V2 для  $p_k = 0$ ;

тогда  $V = V1 + V2$  со временем V для всего.

примечание  $V1 \approx T2$

тогда  $V \approx 2V1 \approx 2V2$

из всех наших результатов мы замечаем, что

время выполнения программы сильно зависит от количества сегментов N.

Метод полного перебора, сущность метода полного перебора заключается в том, что необходимо:

- рассматривать все возможные случаи;
- найти те, которые удовлетворяют условию данной задачи;
- ищется глобальный оптимум.

Показан процесс проектирования алгоритмов и разработки инструментального средства, а также приводятся перспективное исследование решения задачи одномерной упаковки с изменением веса с использованием созданного инструмента.

### Заключение

Сформулирована задача оптимальной упаковки (размещения) отрезков, нагруженных сосредоточенной силой, с условием изменения веса одного выделенного отрезка. Критерием оптимальной упаковки является минимальное отклонение центра тяжести от заданного значения. Алгоритм даёт точное решение. Временная сложность алгоритма составляет  $O(n!)$ . Алгоритм полного перебора будет полезен при сравнении эффективности будущих приближенных алгоритмов. На основе этих теорем построен алгоритм полного перебора для задачи одномерной упаковки объектов с изменением веса.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

- Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. — 460 с.
- Mongeau M. Optimization of aircraft container loading / M. Mongeau, C. Be` s // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 39, 2003. 1, 140–150.
- Залюбовский В. В. О представлении перестановками допустимых решений одномерной задачи упаковки в контейнеры / В. В. Залюбовский // Труды XIII Байкальской международной школы-семинара «Методы оптимизации». Том 1: Иркутск, ИСЭМ СО АН РАН. – 2005. с.461-467.
- Wim Vancroonenburg. Automatic air cargo selection and weight balancing: A mixed integer programming approach / Wim Vancroonenburg, Jannes Verstichel, Karel Tavernier et al. // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 65, May 2014, Pages 70-83. DOI: 10.1016/j.tre.2013.12.013 .
- Kaluzny Bohdan L. Optimal aircraft load balancing / Kaluzny, Bohdan L.; Shaw, R. H. A. David. // International Transactions in Operational Research, Volume 16, Number 6, November 2009, pp. 767-787(21). DOI: 10.1111/j.1475-3995.2009.00723.x
- Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
- Дворянkin А.М. Задача размещения нагруженных отрезков./ А.М. Дворянkin, М.Б. Кульцова, И.Г. Жукова // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – Волгоград, 2017. – № 8 (203). – С. 29-34.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Bellman R. Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya [Applied dynamic programming] / R. Bellman, S. Dreyfus. Moscow, Science Publ., 1965. 460 p. [in Russian]
2. Mongeau M. Optimization of aircraft container loading / M. Mongeau, C. Be` s // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 39, 2003. 1, 140–150.
3. Zaljubovskij V. V. O predstavlenii perestanovkami dopustimyh reshenij odnomernoj zadachi upakovki v kontejnery [On the representation by permutations of admissible solutions of the one-dimensional problem of packing into containers] / Zaljubovskij V. V. // Proceedings of the XIII Baikal International School-Seminar "Optimization Methods". Volume 1: Irkutsk, ISEM SB RAS. - 2005. p.461- 467. [in Russian]
4. Wim Vancroonenburg. Automatic air cargo selection and weight balancing: A mixed integer programming approach / Wim Vancroonenburg, Jannes Verstichel, Karel Tavernier et al. // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 65, May 2014, Pages 70-83. DOI: 10.1016/j.tre.2013.12.013 .
5. Kaluzny Bohdan L. Optimal aircraft load balancing / Kaluzny, Bohdan L.; Shaw, R. H. A. David. // International Transactions in Operational Research, Volume 16, Number 6, November 2009, pp. 767-787(21). DOI: 10.1111/j.1475-3995.2009.00723.x
6. Garey M. Vychislitel'nye mashiny i trudnoreshaemye zadachi [Computers and inaccessible tasks] / M. Garey, D. Johnson. Moscow, Mir Publ., 1982. 416 p. [in Russian]
7. Dvoryankin A. M. Zadacha razmeshheniya nagruzhennyh otrezkov [The problem of locating segments loaded by force] / A. M. Dvoryankin, M. B. Kultsova, I. G. Zhukova // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Aktualnye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh» [Proceedings of the Volgograd State Technical University. Series "Actual Problems of Control, Computer Technology and Computer Science in Technical Systems"], 2017, no. 8 (203), pp. 29–34. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.012>**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СИСТЕМНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ПРИМЕРЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ТЭЦ -2**

Научная статья

**Гаврилова А.А.<sup>1</sup>, Салов А.Г.<sup>2</sup>, Денисова И.Ю.<sup>3,\*</sup>, Соловьев А.И.<sup>4</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6598-5518;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-8263-2471;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0003-1574-0020;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

\* Корреспондирующий автор (denisova.irina.97[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Произведен анализ эффективности функционирования организационной структуры Калининградской ТЭЦ (КТЭЦ-2). Определен тип организационной структуры управления энергетическим предприятием. Проведена оптимизация по группе критериев, которые характеризуют сбалансированность, целостность, управляемость и надежность данной структуры. Для получения численных значений критериев применялась методология системного анализа, теория графов и метод Data Envelopment Analysis (DEA).

**Ключевые слова:** системный анализ, Data Envelopment Analysis (DEA), организационная структура управления, граф, критерии качества, устойчивость, управляемость, сбалансированность, целостность, информационная нагрузка.

**A MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE SYSTEM EFFICIENCY OF ENERGY ENTERPRISE  
MANAGEMENT IN THE SECOND KALININGRAD COMBINED HEAT AND POWER PLANT (CHPP)**

Research article

**Gavrilova A.A.<sup>1</sup>, Salov A.G.<sup>2</sup>, Denisova I.Yu.<sup>3,\*</sup>, Solovyev A.I.<sup>4</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6598-5518;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-8263-2471;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0003-1574-0020;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Samara State Technical University, Samara, Russia

\* Corresponding author (denisova.irina.97[at]yandex.ru)

**Abstract**

The current study conducts an analysis of the efficiency of the functioning of the organizational structure in the second Kaliningrad combined heat and power plant (CHPP) and defines the type of the organizational structure of the energy enterprise management. The authors carry out an optimization according to a group of criteria that characterize the balance, integrity, manageability, and reliability of this structure. To obtain the numerical values of the criteria, the study uses the methodology of system analysis, graph theory, and the Data Envelope Analysis (DEA) method.

**Keywords:** system analysis, Data Envelope Analysis( DEA), organizational management structure, graph, quality criteria, stability, manageability, balance, integrity, information load.

**Введение**

В процессе перехода Российской Федерации от плановой к рыночной экономике большое количество промышленных предприятий существенно изменили цели и задачи. В рамках плановой экономики на предприятиях наблюдался производственный подход, который, прежде всего, был ориентирован на внутренние ресурсы и возможности объекта. При рыночной экономике работа предприятия направлена на возможности потребителя с учетом конкуренции со стороны рынка. Большое количество крупных предприятий, в которых принята многоуровневая организационная структура управления, оказалось не готово к переходу к рыночной экономике. В процессе перехода при диверсификации производства возникла потребность в реструктуризации действующих организационных структур управления. Так как рыночная экономика характеризуется постоянно меняющейся внешней средой (например, изменение законодательства), организационная структура управления должна быть способной к самоуправлению и саморазвитию [4].

Для многокритериального оценивания эффективности организационной структуры с учетом влияния факторов внешней среды в условиях рыночных преобразований, рационально использовать методологию системного анализа и метод DEA, позволяющие учесть многие существенные аспекты. Благодаря системному подходу учитывается многообразие критериев, которыми характеризуется деятельность предприятия – энергетические, потребительские, организационные, экономические и другие факторы производства [3], [5].

**Цель работы**

Повышение системной эффективности организационной структуры управления энергетическим предприятием (Калининградской ТЭЦ-2), оценка и выявление наиболее значимой группы локальных критериев эффективности.

Для проведения комплексного анализа исследуемой энергетической системы рассмотрим действующую организационную структуру управления энергообъектом и интегральные показатели деятельности. Калининградская ТЭЦ-2 является одной из наиболее современных электростанций в России, работающих на основе парогазовой технологии со сбросом отработанных газов в котлы-утилизаторы [6]. Станция была спроектирована и построена для обеспечения энергетической самостоятельности Калининградской области с перспективой выхода на энергетический рынок Литвы.



Основные интегральные технико-экономические показатели Калининградской ТЭЦ-2 по проекту в составе двух энергоблоков (по 450 МВт) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технико-экономические показатели Калининградской ТЭЦ-2

| №  | Наименование показателя                                                                 | Величина |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1. | Установленная электрическая мощность, МВт                                               | 900,0    |
| 2. | Годовой отпуск электроэнергии с шин, млн. кВтч                                          | 5585,6   |
| 3. | Годовой отпуск теплоэнергии с коллекторов, тыс.Гкал                                     | 3323,0   |
| 4. | Расход электроэнергии на собственные нужды, %                                           | 2,22     |
| 5. | Среднегодовой удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию, г/кВтч    | 181,5    |
| 6. | Среднегодовой удельный расход условного топлива на отпущенную тепловую энергию, кг/Гкал | 155,0    |
| 7. | Среднегодовой коэффициент использования топлива в теплофикационном режиме, %            | 76       |
| 8. | Коэффициент полезного действия (брутто) в конденсационном режиме, %                     | 51       |

Действующая организационная структура управления Калининградской ТЭЦ-2 (рис.1) является функциональной – каждый орган управления выполняет определенный перечень функций на всех уровнях управления [1], [8], [10].

Производственным подразделениям обязательно требуется выполнять указания каждого функционального органа в пределах его компетенции. Передача поручений и указаний осуществляется в зависимости от вида поставленной задачи. Функциональная специализация аппарата управления значительно повышает его эффективность, так как вместо универсальных управленцев, которые должны разбираться во всех функциях, появляется штаб высококвалифицированных специалистов. В энергетике этих специалистов условно можно разделить на 3 группы: административно-хозяйственный персонал, ремонтный и эксплуатационный.

С точки зрения структурирования данных, действующая структура управления на КТЭЦ-2 является древовидной и состоит из 55 узлов (элементов), между которыми существуют двусторонние каналы связи. Наивысший узел  $a_0$  в иерархической структуре принято называть корнем (в случае описанной структуры – это директор). Зависимые узлы, включающие лица принимающие решения (ЛПР), составляют уровень управления  $a$ . Уровень  $b$  включает отделы (производственно-технический отдел, отдел учета активов и обязательств, отдел управления персоналом). На уровне  $c$  представлены группы отделов (группа планирования и отчетности, группа управления запасами, группа топливообеспечения), на уровне  $d$  – котельные, турбинные, химические цеха.

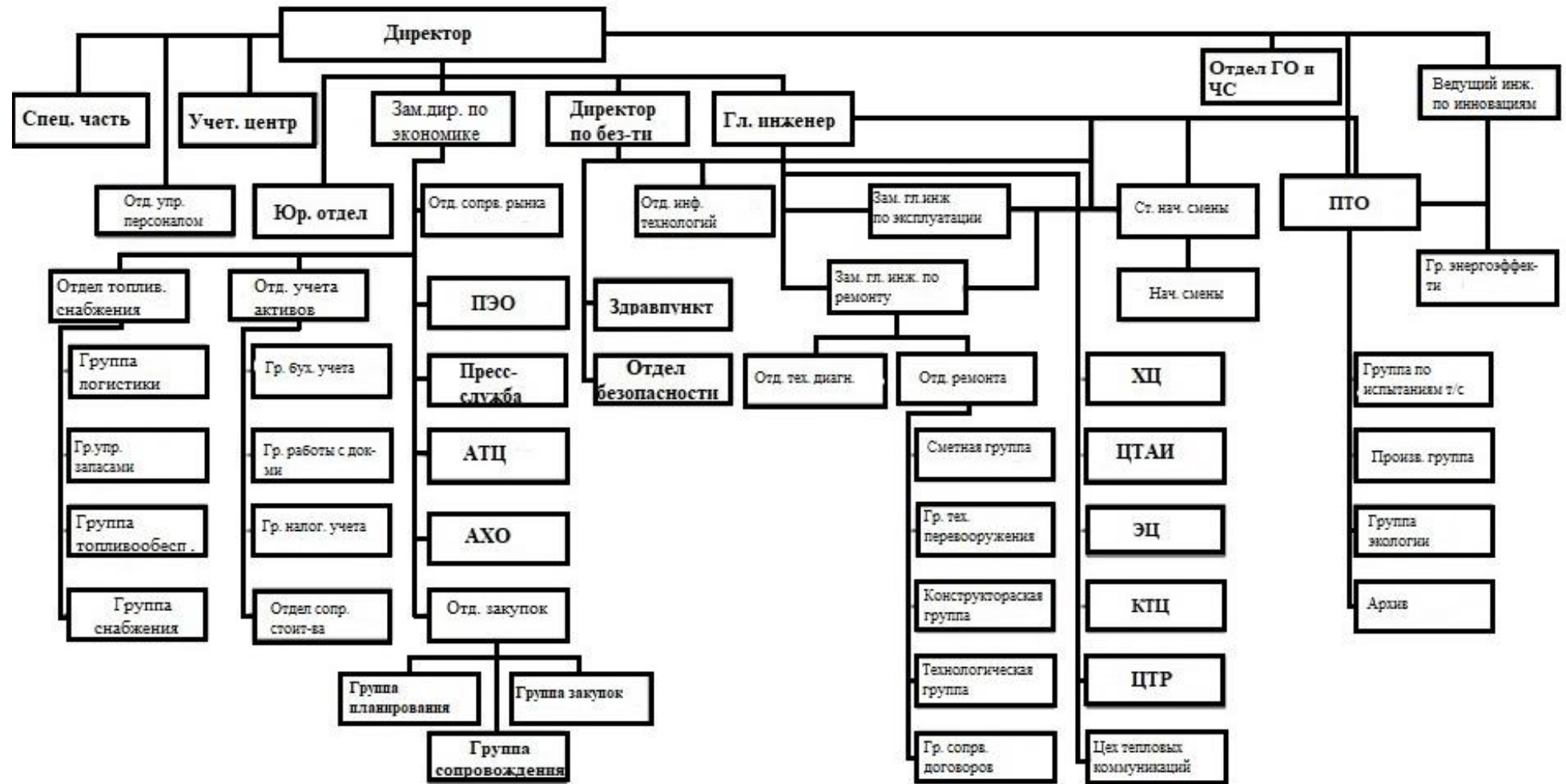


Рис. 1 – Действующая организационная структура управления КТЭЦ-2

По каналам связи все элементы структуры обмениваются информацией с помощью 3 видов взаимодействия: информационного, административного и технического.

Особенность действующей организационной структуры КТЭЦ-2 - наличие должности директора по безопасности и режиму. В его обязанности входит минимизация рисков ошибок некомпетентных работников, мошенничества сотрудников, которые имеют доступ с секретной информации, осуществление следственных действий по факту нарушений. Для обеспечения полноценной и надежной информационной безопасности станции требуется использовать комплексный и системный подход.

### Показатели качества организационной структуры. Определение локальных критериев качества

Для оценки системной эффективности функционирования организационной структуры ТЭЦ в работах [4], [8] были сформулированы показатели, которые характеризуют сбалансированность, целостность, управляемость и устойчивость рассматриваемых структур управления. Рассчитаем эти показатели для графа действующей организационной структуры управления Калининградской ТЭЦ-2, изображенном на рисунке 2.

Наибольшую эффективность несет сбалансированная структура, в которой равномерно распределена информационная нагрузка между всеми элементами структуры. Сбалансированность структуры можно охарактеризовать с помощью следующих критериев: информационной нагрузки первого руководителя, максимальной информационной нагрузки и степенью неравномерности информационной нагрузки.

Информационная нагрузка первого руководителя характеризуется числом управленческих связей директора. Показатель принято рассчитывать относительно числу 7, которое определяет оптимальное число управленческих связей главного руководителя.

$$\lambda_0 = \lambda_{a0} = \deg \{a_0\} = \frac{10}{7} = 1,42$$

Для графа G1 показатель  $\lambda_{a0} = 1,42$ . Таким образом, можно сделать вывод, что генеральный директор информационно перегружен на 42%. Операция оптимизации приведенного критерия – минимизация.

Критерий максимальной информационной нагрузки описывает максимальную нагрузку лиц, принимающих решения. Для оптимизации данный критерий так же минимизируется. При рассмотрении организационной структуры Калининградской ТЭЦ-2 максимальная информационная нагрузка наблюдается у генерального директора.

$$\max_{a \in V(G)} \deg G_1 = \deg \{a_0\} = 10 \quad (1)$$

Минимальная информационная нагрузка у ведущего инженера по инновациям и энергетической эффективности.

$$\min_{a \in V(G)} \deg G_1 = \deg \{a_4\} = 2 \quad (2)$$

Степень неравномерности информационной нагрузки – это отношение максимальной и минимальной степеней однородности. Операция оптимизации – min

$$\frac{\max_{a \in V(G)} \deg G_1}{\min_{a \in V(G)} \deg G_1} = \frac{10}{2} = 5 \quad (3)$$

Таким образом, при оценке сбалансированности действующей организационной структуры КТЭЦ-2 по вышеперечисленным показателям можно сделать вывод о том, что степени неравномерности распределения информационной нагрузки являются неудовлетворительными, а информационная нагрузка генерального директора слишком завышена и нуждается в улучшении.

При рассмотрении целостности структуры воспользуемся следующими показателями:

Диаметр графа  $d(G)$  находится как максимальное расстояние между двумя его вершинами  $a$  и  $b$

$$d(G) = \max_{a, b \in V(G)} d(a, b) = 7 \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  произвольные вершины графа. На КТЭЦ-2, например, это – сметно-аналитическая группа, входящая в состав отдела ремонта, технического перевооружения и группа работы с первичными документами, входящая в состав отдела учета активов и обязательств.  $V(G)$  – множество всех вершин,  $d(a, b)$  – расстояние между  $d(a, b)$  – наименьшая длина цепи, связывающая вершины  $a$  и  $b$ . Длина графа описывает размер, компактность структуры управления, поэтому данный критерий принято минимизировать.

Радиус графа  $r(G)$  – минимизируемый критерий – характеризует наименьшее из максимальных значений расстояний от фиксированной вершины  $f$  до всех вершин графа  $V(G)$ .

$$r(G) = \max_{b \in V(G)} d(a_i, b) = \min_{a \in V(G)} \max_{b \in V(G)} d(a, b) = 4 \quad (5)$$

Число центров графа – это количество вершин, относительно которых выполняется условие минимакса:

$$\max_{b \in V(G)} d(a_i, b) = \min_{a \in V(G)} \max_{b \in V(G)} d(a, b) \quad (6)$$

Из рисунка 2 видно, что структура имеет две вершины:  $a_0$  соответствующая генеральному директору и вершину  $a_1$  – главный инженер КТЭЦ-2. Каждая из вершин находится на высшем уровне иерархии.

Для оценки управляемости структуры используется два критерия: число каналов управления и число контуров управления. Оба критерия следует максимизировать.

Число каналов управления – это количество ребер графа, по которым передаются управленческие решения.

В случае действующей организационной структуры Калининградской ТЭЦ-2  $N=66$

Число контуров управления рассчитывается по следующей формуле:

$$\nu = N - n + 2 = 66 - 55 + 2 = 13 \quad (7)$$

Для оценки эффективности структуры с точки зрения управляемости, чем меньше диаметр графа и разница между диаметром и радиусом, тем эффективнее организационная структура энергопредприятия.

При определении надежности организационной структуры с точки зрения теории графов используются критерии – число внутренней и внешней устойчивости, которые следует максимизировать.

Число внешней устойчивости находится как число вершин в наименьшем внешне устойчивом множестве. В действующей организационной структуре  $\alpha(G) = 13$ , а число внутренней устойчивости, определяющееся как число вершин в наибольшем внутренне устойчивом множестве,  $\beta(G) = 42$ .

Были построены модифицированные структуры управления, в которых была оптимизирована одна из групп критериев эффективности: сбалансированность, целостность, управляемость или устойчивость (см. рисунки 3.1-3.4). Значения локальных критериев представлены в таблице 2. Так же в совокупность сравниваемых структур со структурой КТЭЦ-2 были включены типовая, существовавшая до 1990 года, и действующая в настоящее время структуры ТЭЦ, входящей в Самарскую энергосистему. Для многокритериальной сравнительной оценки эффективности структур использован метод DEA.

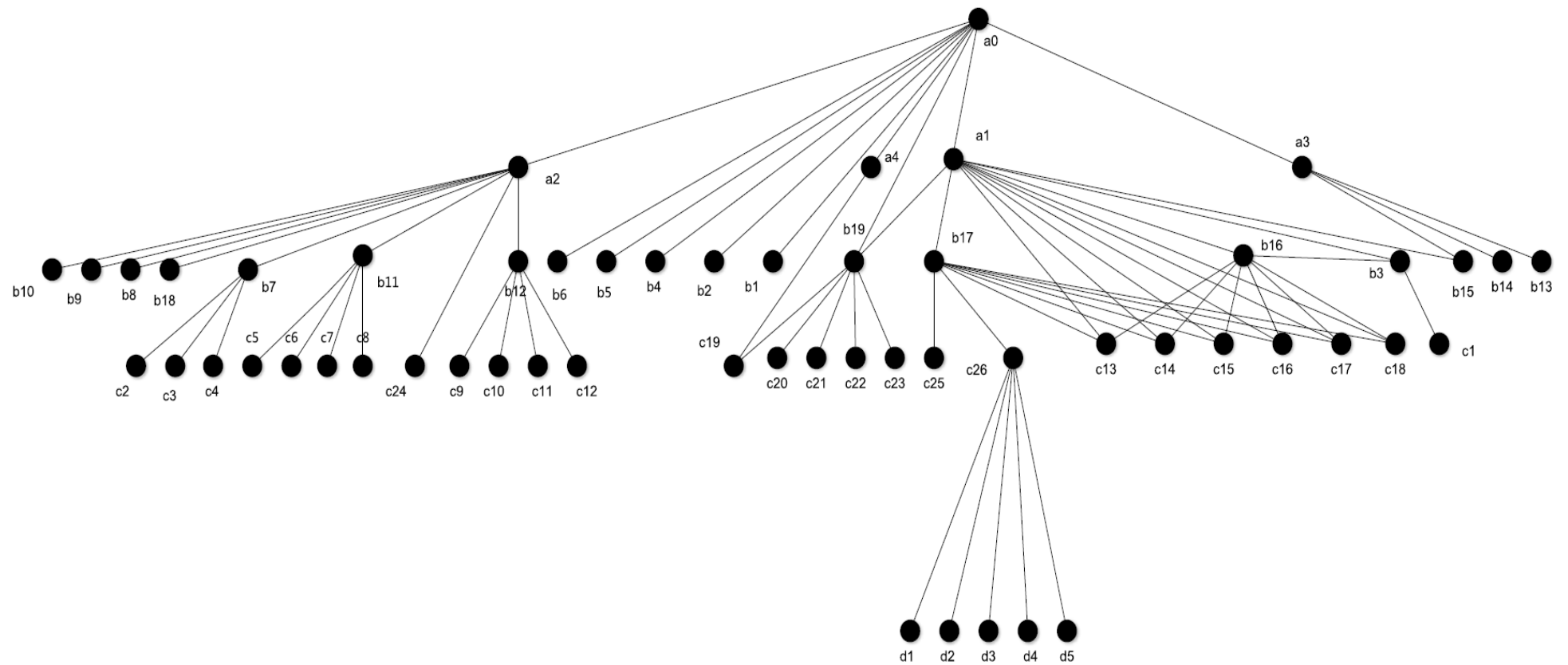


Рис. 2 – Граф действующей организационной структуры управления КТЭЦ-2

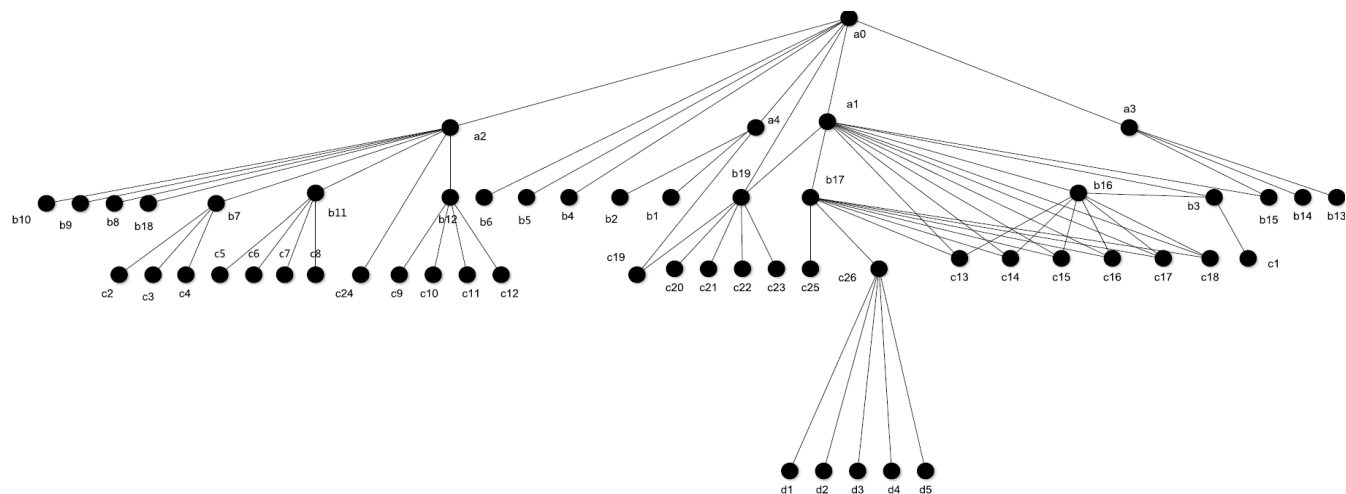


Рис. 3.1 – Граф структуры управления с оптимизированной группой критериев сбалансированности

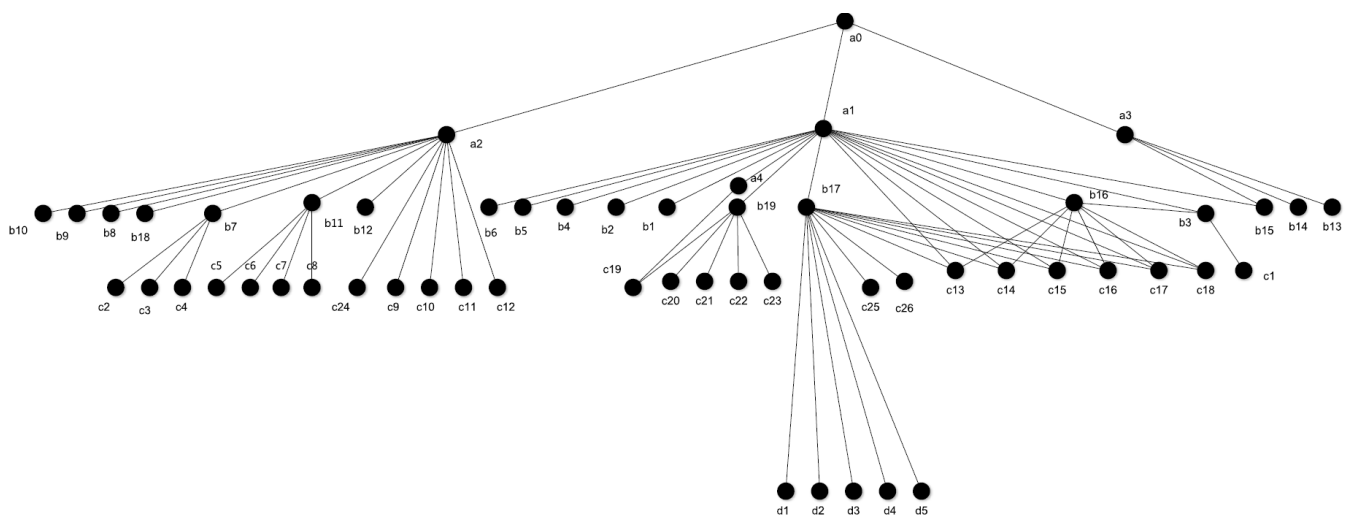


Рис. 3.2 – Граф структуры управления с оптимизированной группой критериев целостности

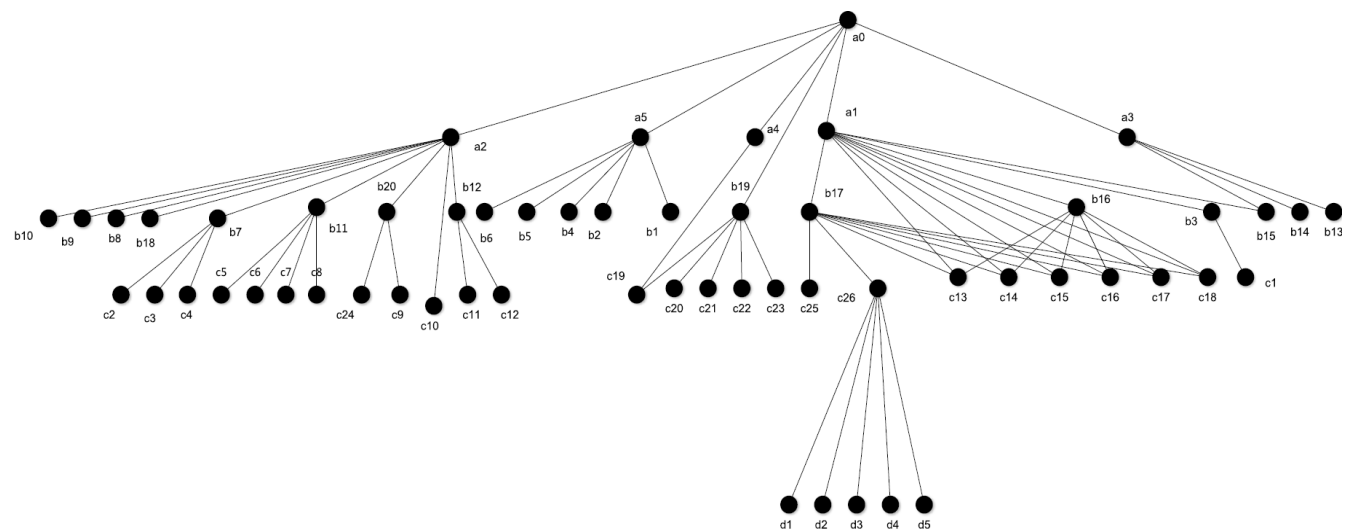


Рис. 3.3 – Граф структуры управления с оптимизированной группой критериев управляемости

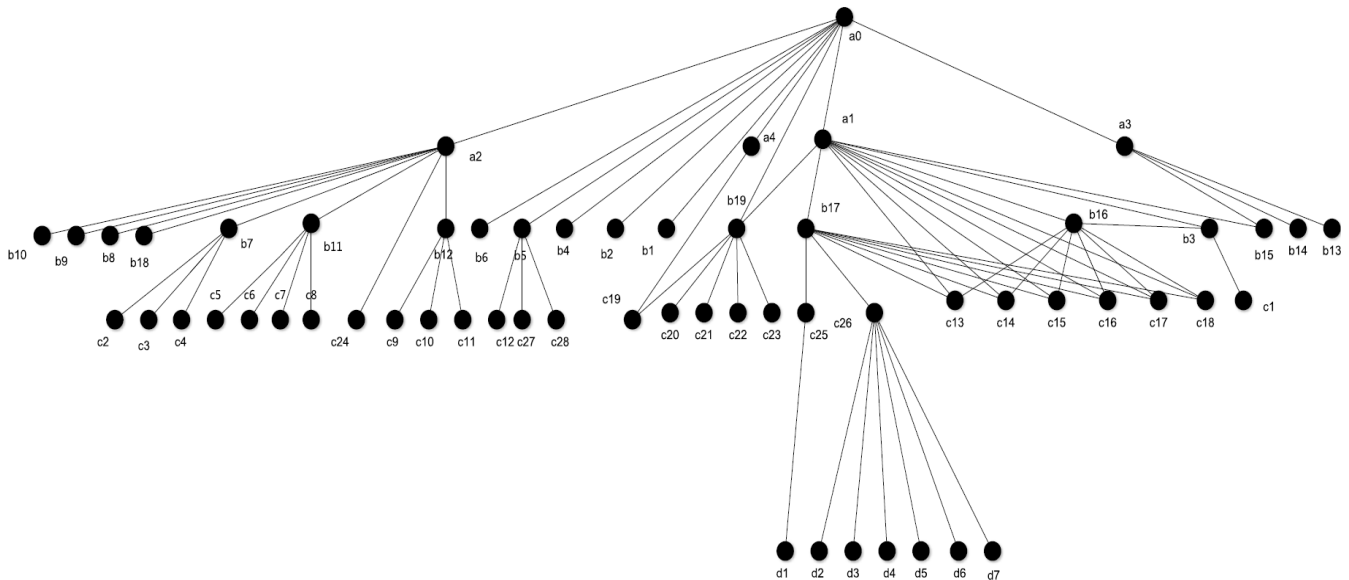


Рис. 3.4 – Граф структуры управления с оптимизированной группой критериев устойчивости

Таблица 2 – Значения локальных критериев качества сравниваемых структур

| Наименование величин                            | Структуры управления |                |                |                |                |                |                | Операция оптимизации |
|-------------------------------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| Сбалансированность структур                     | G <sub>1</sub>       | G <sub>2</sub> | G <sub>3</sub> | G <sub>4</sub> | G <sub>5</sub> | G <sub>6</sub> | G <sub>7</sub> |                      |
| Информационная нагрузка первого руководителя    | 1,42                 | 1,4            | 1,2            | 1,1            | 1,42           | 1,42           | 1,42           | min                  |
| Максимальная информационная нагрузка            | 1,42                 | 1,7            | 1,5            | 1,1            | 1,42           | 1,42           | 1,42           | min                  |
| Степень неравномерности информационной нагрузки | 5                    | 3              | 4              | 4              | 5              | 5              | 5              | min                  |
| Число центров структуры                         | 2                    | 3              | 3              | 2              | 1              | 2              | 2              | min                  |
| Диаметр структуры                               | 7                    | 5              | 5              | 7              | 5              | 7              | 7              | min                  |
| Радиус структуры                                | 4                    | 3              | 3              | 4              | 4              | 4              | 4              | max                  |
| Число каналов управления                        | 66                   | 61             | 64             | 66             | 66             | 70             | 66             | max                  |
| Число контуров управления                       | 13                   | 24             | 25             | 13             | 13             | 15             | 13             | max                  |
| Число внешней устойчивости                      | 13                   | 7              | 8              | 13             | 13             | 13             | 15             | max                  |
| Число внутренней устойчивости                   | 42                   | 32             | 33             | 42             | 42             | 42             | 46             | max                  |

**Построение обобщенного критерия качества организационных структур управления**

В работах [9], [10] используя метод DEA, построен функционал, являющийся комплексным обобщенным показателем эффективности каждой из рассматриваемых организационных структур:

$$f_n = \max_{u_{in}, v_{jn} \in U} \frac{u_{1n}Y_{1n} + u_{2n}Y_{2n} + \dots + u_{kn}Y_{kn}}{v_{1n}X_{1n} + v_{2n}X_{2n} + \dots + v_{mn}X_{mn}} \quad (8)$$

где  $n$  – номер структуры,  $u_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) и  $v_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) – положительные весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из максимизируемых и минимизируемых локальных показателей качества структур,  $Y_i$  – максимизируемые локальные критерии качества: радиус структуры, критерии управляемости и устойчивости;  $X_j$  – минимизируемые локальные критерии качества: критерии сбалансированности, целостности и число центров структуры. Весовые коэффициенты принимаются произвольными и неизвестными.

Ограничения формулируются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{u_{11}Y_{11} + u_{21}Y_{21} + u_{31}Y_{31} + u_{41}Y_{41} + u_{51}Y_{51}}{v_{11}X_{11} + v_{21}X_{21} + v_{31}X_{31} + v_{41}X_{41} + v_{51}X_{51}} \leq 1 \\ \dots \\ \frac{u_{17}Y_{17} + u_{27}Y_{27} + u_{37}Y_{37} + u_{47}Y_{47} + u_{57}Y_{57}}{v_{17}X_{17} + v_{27}X_{27} + v_{37}X_{37} + v_{47}X_{47} + v_{57}X_{57}} \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

где  $N = 7$  – количеству рассматриваемых структур;  $Y_i$  – максимизируемые локальные критерии,  $X_i$  – минимизируемые локальные критерии [4], [9], [10].

Решение задачи для каждой структуры управления дает значение соответствующего критерия.

С помощью программного обеспечения Efficiency Measurement System находятся обобщенный глобальный показатель суперэффективности  $F_i$ , ранжированный на интервале  $[0, \infty]$ , и значения весовых коэффициентов локальных критериев (Рис. 4).

|   | DMU | Score   | X1 (I)<br>(V) | X2 (I)<br>(V) | X3 (I)<br>(V) | X4 (I)<br>(V) | X5 (I)<br>(V) | Y1<br>(O)<br>(V) | Y2<br>(O)<br>(V) | Y3<br>(O)<br>(V) | Y4<br>(O)<br>(V) | Y5<br>(O)<br>(V) | Benchmarks | (S)<br>X1 (I) | (S)<br>X2 (I) | (S)<br>X3 (I) | (S)<br>X4 (I) | (S)<br>X5 (I) | (S)<br>Y1 (O) | (S)<br>Y2 (O) | (S)<br>Y3 (O) | (S)<br>Y4 (O) | (S)<br>Y5 (O) |
|---|-----|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | F1  | 107,69% | 0,00          | 0,00          | 0,50          | 0,50          | 0,00          | 0,23             | 0,19             | 0,26             | 0,13             | 0,26             |            | 3             |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| 2 | F2  | 133,33% | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 1,00          | 0,00          | 1,33             | 0,00             | 0,00             | 0,00             | 0,00             |            | 0             |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| 3 | F3  | 120,79% | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,67          | 0,33          | 0,00             | 0,00             | 1,21             | 0,00             | 0,00             |            | 0             |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| 4 | F4  | 100,00% | 0,23          | 0,20          | 0,18          | 0,19          | 0,20          | 0,00             | 0,00             | 0,00             | 0,15             | 0,85             | 1 (1,00)   | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,32          | 0,32          | 1,00          | 0,00          | 0,00          |
| 5 | F5  | 131,47% | 0,94          | 0,00          | 0,06          | 0,00          | 0,00          | 0,00             | 0,00             | 1,31             | 0,00             | 0,00             |            | 0             |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| 6 | F6  | 100,00% | 0,18          | 0,00          | 0,00          | 0,05          | 0,77          | 0,06             | 0,03             | 0,19             | 0,01             | 0,71             | 1 (1,00)   | 0,00          | 4,00          | 2,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          |
| 7 | F7  | 100,00% | 0,29          | 0,38          | 0,33          | 0,00          | 0,00          | 0,20             | 0,18             | 0,22             | 0,15             | 0,25             | 1 (1,00)   | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 2,00          | 4,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          |

Рис. 4 – Результаты расчетов весовых коэффициентов

**Выводы**

1) Действующая и оптимизированные по группам критериев организационные структуры управления эффективны, так как все глобальные критерии суперэффективности  $F_i \geq 100\%$ . Все локальные критерии значимы.

2) Максимальная эффективность получена для организационной структуры №2  $F_2 = 133,33\%$ . Типовая организационная структура управления является наиболее эффективной за счет влияния двух локальных критериев качества: радиуса и числа центров структуры.

3) На втором месте по эффективности находится модифицированная структура №5, что достигается за счет оптимизации группы локальных критериев целостности. Глобальный критерий  $F_5 = 131,47\%$ , что незначительно отличается от лучшего результата.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Волкова В.Н. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: Учеб. Пособие / В.Н. Волкова, А.А. Емельянов. – М.: Финансы и статистика, 2006. С. 27 - 38

2. Дилигенский М.В. Структурный синтез локально оптимальных организационных структур управления с обратными связями / М.В. Дилигенский // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII межд. конф. – Самара: САМНЦ РАН, 2006. - С. 57 – 65.

3. Дилигенский Н.В. Многокритериальная оценка сравнительной эффективности организационных систем управления / Н.В. Дилигенский, М.В. Цапенко // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VIII межд. конф. – Самара: САМНЦ РАН, 2006 - С. 66-72

4. Гаврилова А.А. Повышение эффективности управления энергетическим производством на основе комплексных критериев деятельности. / А.А. Гаврилова // Сб. материалов VII межд. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» ИПУ РАН. – М., 2013.- с.328-334.

5. Гаврилова А.А. Повышение эффективности управления энергетическим комплексом как фактор социально-экономического развития Поволжского региона / А.А. Гаврилова, А.Г. Салов // Межд. форум «Россия как трансформирующееся общество: экономика, культура, управление», г. Оренбург, акад. журнал «Интеллект, инновации, инвестиции», спец. выпуск 2011, с.24-29

6. Калининградская ТЭЦ-2: // Интер РАО – Электрогенерация. [Электронный ресурс]. URL: <https://iraogeneration.ru/stations/kalininradg/>. (дата обращения: 01.04.2020).

7. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили, – М.: СИНЕГ, 2000. 521 с.

8. Салов А.Г. Анализ эффективности функционирования структур управления энергетическими предприятиями / А.Г. Салов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. «Технические науки».- Новочеркасск, 2008, №1 (143) – с.32-37.

9. Salov A.G. A comprehensive approach to optimization of industrial enterprises management structure. / A.G. Salov, A.A. Gavrilo, L.A. Sagitova // SHS Collection of Proceedings of the III International Scientific and technical Conference. Prom-engineering-2017 (ICIE-2017) C-Pb, 2017. - 4с, DOI: 10/1051/shsconf/2017350141

10. Salov A.G. Optimization of power plants management structure based on the generalized criteria of the efficiency. / A.G. Salov, A.A. Gavrilo, Yu.V. Chirkova // SHS Collection of Proceedings of the III International Scientific and technical Conference. Prom-engineering-2017 (ICIE-2017) C-Pb, 2017. - 6с, DOI: 10/1051/shsconf/2017350145

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Volkova V. N. Teorija sistem i sistemnyj analiz v upravlenii organizacijami: Spravochnik: Ucheb. Posobie [System Theory and System Analysis in Organization Management: A Textbook] / V. N. Volkova, A. A. Emelyanov-Moscow: Finansy i statistika, 2006, pp. 27-38 [in Russian]

2. Diligensky M. V. Strukturnyj sintez lokal'no optimal'nykh organizacionnykh struktur upravlenija s obratnymi svyazjami [Structural synthesis of locally optimal organizational management structures with feedback] / M. V. Diligensky // Problemy upravlenija i modelirovanija v slozhnykh sistemakh: Trudy VIII mezhd. konf [Problems of management and modeling in complex systems: Proceedings of the VIII International Conference]-Samara: SAMSC RAS, 2006, pp. 57-65 [in Russian]

3. Diligensky N. V. Mnogokriterial'naja ocenka sravnitel'noj ehffektivnosti organizacionnykh sistem upravlenija [Multi-criteria assessment of the comparative effectiveness of organizational management systems] / N. V. Diligensky, M. V. Tsapenko // Problemy upravlenija i modelirovanija v slozhnykh sistemakh: trudy VIII mezhd. konf [Problems of control and modeling in complex systems: proceedings of the VIII International Conference]-Samara: SAMSC RAS, 2006, pp. 66-72 [in Russian]



4. Gavrilova A. A. Povyshenie ehffektivnosti upravlenija ehnergeticheskim proizvodstvom na osnove kompleksnykh kriteriev dejatel'nosti [Improving the efficiency of energy production management based on comprehensive performance criteria] / A. A. Gavrilova // Sb. materialov VII mezhd. konf. «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» IPU RAN [Collection of materials of the VII International Conference. "Management of the development of large-scale systems" IPU RAS. - M., 2013, pp. 328-334 [in Russian]
5. Gavrilova A. A. Povyshenie jeffektivnosti upravlenija jenergeticheskim kompleksom kak faktor social'no-jekonomicheskogo razvitija Povolzhskogo regiona [Improving the efficiency of energy complex management as a factor of socio-economic development of the Volga Region] / A. A. Gavrilova, A. G. Salov // International Forum "Russia as a Transforming Society: Economy, Culture, Management", Orenburg. Akad. zhurnal «Intellect, innovacii, investicii» [Academic Journal "Intelligence, innovation, investments"], spec. issue 2011, pp. 24-29 [in Russian]
6. Kaliningradsckaja TEhC-2: [Kaliningrad CHPP-2] [Electronic resource] // Inter RAO-Electric power plants. URL: <https://irao-generation.ru/stations/kalinigrad/>. (accessed: 01.04.2020) [in Russian]
7. Prangishvili, I. V. Sistemnyj podkhod i obshhesistemnye zakonomernosti [System approach and system-wide regularities] / I. V. Prangishvili-Moscow: SINEG, 2000. 521 p. [in Russian]
8. Salov A. G. Analiz ehffektivnosti funkcionirovanija struktur upravlenija ehnergeticheskimi predpriyatijami [Analysis of the efficiency of the functioning of the management structures of energy enterprises] / A. G. Salov // Izvestija vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. «Tekhnicheskie nauki» [Bulletin of higher educational institutions. The North Caucasus region. "Technical Sciences"].- Novoherkassk, 2008, No. 1 (143), pp. 32-37 [in Russian]
9. Salov A.G. A comprehensive approach to optimization of industrial enterprises management structure. / A.G. Salov, A.A. Gavrilova, L.A. Sagitova // SHS Collection of Proceedings of the III International Scientific and technical Conference.Prom-engineering-2017 (ICIE-2017) C-Pb, 2017. - 4c, DOI: 10/1051/shsconf/2017350141
10. Salov A.G. Optimization of power plants management structure based on the generalized criteria of the efficiency. / A.G. Salov, A.A. Gavrilova, Yu.V. Chirkova // SHS Collection of Proceedings of the III International Scientific and technical Conference.Prom-engineering-2017 (ICIE-2017) C-Pb, 2017. - 6s, DOI: 10/1051/shsconf/2017350145

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.013>**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН БОБОВЫХ ТРАВ**

Научная статья

**Рожков Г.А.<sup>1,\*</sup>, Перекопский А.Н.<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (bauermw[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье представлено обоснование актуальности процесса скарификации семян многолетних бобовых трав. Обозначена цель исследований. Предложено сравнение нескольких видов предпосевной обработки семян многолетних бобовых трав на примере козлятника восточного. Представлены машины, их характеристики и недостатки, которые в настоящее время применяют для обработки семян перед посевом и экспериментальный образец агрегата для скарификации семян многолетних трав, а также результаты экспериментальных исследований при разной частоте вращения, прямой и обратной подаче рабочего материала и времени воздействия на него.

**Ключевые слова:** бобовые травы, козлятник, семена, скарификация, всхожесть.

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF PRE-SOWING TREATMENT OF LEGUME SEEDS**

Research article

**Rozhkov G.A.<sup>1,\*</sup>, Perekopsky A.N.<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, branch of the Federal Research Center of Agriculture All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization, Saint-Petersburg, Russia

\* Corresponding author (bauermw[at]mail.ru)

**Abstract**

The article presents the rationale for the relevance of the process of scarification of seeds of perennial legumes. The study indicates the purpose of the research and proposes a comparison of several types of pre-sowing treatment of seeds of perennial legumes using Galega orientalis as an example. The study also touches on the characteristics, and disadvantages of the machines that are currently used for pre-sowing seed treatment, and an experimental sample of the unit for scarification of seeds of perennial grasses, as well as the results of experimental studies at different rotation speeds, direct and reverse feed of the working material and the length of the pressure exerted on it.

**Keywords:** legumes, Galega orientalis, seeds, scarification, germination.

**Введение**

Продовольственная безопасность государства зависит, в основном, от его способности и возможности само обеспечения продовольственной продукцией. Так как производство молока и мяса напрямую зависит от количества и качества потребляемого корма животными, производство высокопитательных кормов является актуальной задачей, а увеличение в рационах крупного рогатого скота количества высококачественного сена и сенажа из однолетних и многолетних злаково-бобовых смесей позволит повысить обеспеченность животных белком, минеральными и витаминными компонентами, что положительно скажется на продуктивности животных в виде молочной продукции и продуктивной массы. Основной причиной повышения значения такого показателя, как расход семян бобовых трав в процессе их посева являются их твердокаменность и высокая прочность поверхностной плёнки, она сдерживает набухание зёрен, а также не позволяет им прорасти [1, С. 16], [2, С. 34]. Как правило, такое развитие событий приводит к большой временной паузе в процессе всхода семян, а в крайнем случае даже к частичной потере ранее посеянных семян. Козлятник восточный – многолетнее растение семейства бобовых, травостой используется 10-15 лет. Зелёная масса богата витаминами, каротином, содержит все нужные аминокислоты, много лейцина и лизина, сахарный минимум 5-6 %. Травостой используется на заготовку зелёного корма, силоса, сена, травяной муки, а также для выпаса [3, С. 25], [4, С. 154].

Целью исследований является повышение эффективности скарификации семян многолетних бобовых трав.

**Методы и принципы исследования**

Семя козлятника восточного имеет средний размер 1.5х3.5 мм, при этом обладая низким удельным весом, но при этом существенной твёрдостью оболочки, что предъявляет особые требования к его обработке.

Семенной материал должен быть чистым от сорняков, иметь высокую всхожесть и энергию прорастания и соответствовать требованиям ГОСТ Р 52325 – 2005 года. Поскольку семена, предназначенные для посева, должны быть доведены до стандарта, необходимо проводить проверку посевных качеств подготовленных семян в лабораторных условиях. От каждых 10 тонн партии отбирается 1 средняя проба массой 250 грамм. По результатам проверки семян выдаются результаты анализа или протокол испытания. Основными приёмами предпосевной подготовки семян является скарификация, протравливание, обработка микроэлементами, инокуляция.

Семена козлятника имеют труднопроницаемую для воды и воздуха оболочку. Твёрдость семян зачастую достигает 30%, поэтому скарификация является обязательной. Важно отрегулировать скарификаторы и клеверотерки, чтобы семена не дробились. Маленькие партии семян можно обработать вручную наждачной бумагой. Скарификация повышает всхожесть до 82-95 %. Необходимо помнить, что скарифицированные семена долго не хранятся и быстро теряют всхожесть [5], [6], [7].

В данном эксперименте предлагается сравнивать несколько видов механического типа предпосевной обработки семян многолетних бобовых трав на примере козлятника восточного:

1 - классический способ обработки, со временем воздействия на семена 10 мин.;

2 - экспериментальный способ, штифтовым, экспериментальным устройством с трёх рядными рабочими органами и нанесённой режущей поверхностью, время воздействия 1-2 сек. где:

2.1 - прямая подача сырья на 3х частотах вращения (500-1000-1500 об/мин);

2.2 - направленная подача сырья на трёх частотах вращения (500-1000-1500 об/мин).

Опыты были проведены с 3-х кратной повторностью и получением контрольной партии семенного материала для испытаний на всхожесть.

Для получения экспериментальных данных о возможности применения нового способа обработки семян многолетних бобовых трав, на примере козлятника восточного, был изготовлен экспериментальный образец машины – скарификатора с трёх рядными рабочими органами и возможностью изменения частоты вращения за счёт частотного преобразователя напряжения. Экспериментальный образец агрегата для скарификации семян многолетних трав представлен на рисунке 1.



Рис. 1 – Экспериментальный образец агрегата для скарификации семян многолетних трав:

а – усовершенствованный опытный образец машины для предпосевной обработки семян многолетних бобовых трав, повторяющий количество рабочих органов изначального образца; б – усовершенствованный опытный образец машины для предпосевной обработки семян многолетних бобовых трав, с максимальным количеством задействованных рядов рабочих органов

Основные машины, которые выполняют скарификацию и применяются в большинстве сельскохозяйственных предприятий и могут обеспечивать обработку семян многолетних трав представлены в таблице 1. Однако, они совсем не лишены недостатков и имеют низкое качество обработки семян, так как время контакта семян с рабочими органами превышает, увеличивается количество травмированных семян и т.д.

Опытный образец планируется сравнивать с популярными моделями на рынке с/х техники, а именно: СКР 300 (фрикционно-дисковое), СК 300 (инерционное).

Таблица 1 – Основные характеристики существующих скарификаторов и экспериментального образца

| Модель устройства         | Производительность, кг/ч | Мощность на привод, кВт |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| СКР 300                   | 300                      | 3                       |
| СК 300                    | 300                      | 1,1                     |
| Экспериментальный образец | 360                      | до 1                    |

В нашем исследовании планируется проверить следующие рабочие гипотезы: возможность воздействия на семена многолетних бобовых трав вращающихся (с различными частотами) рабочих органов, за счёт сил инерции, позволяющие подготавливать продукт за минимальное время с максимальной эффективностью; выявление зависимости количества и частоты вращения рабочих органов на качество предпосевной обработки семян многолетних бобовых трав, обрабатываемых с помощью экспериментального скарифицирующего устройства; выявление зависимости от изменения угла подачи сырья на качество предпосевной обработки семян многолетних бобовых трав, обрабатываемых с помощью экспериментального скарифицирующего устройства [8], [9, С. 118], [10]. А также возможность изменения количества рабочих органов в ходе эксперимента для выявления чётких зависимостей качества обработки семян от количества рабочих органов и скоростей их вращения.

### Основные результаты

Эксперимент №1, обработка семян классическим способом, время воздействия 10 мин. На семенном материале после опыта с классическим способом обработки, видны повреждения различные по своей глубине и степени, при этом росток здоровый, крепкий, всхожесть составила 68%.

Эксперимент №2.1, частота вращения 950-1450 об/мин, прямая подача сырья - на семенном материале после проведения эксперимента по заданным параметрам, видны неглубокие, ярко выраженные риски без повреждения зародыша. В результате видны здоровые, крепкие ростки, а всхожесть составила 70%.

Эксперимент №2.2, частота вращения 950-1450 об/мин, встречная подача сырья - после проведения эксперимента по заданным параметрам, на семенном материале видны более глубокие риски, но без повреждения зародыша, хорошо видно изменение характера повреждений. В результате видны крепкие ростки, пробившиеся в местах повреждения оболочки семян, всхожесть составила 67%. Семенной материал после обработки и результаты всхожести представлены на рисунке 2.

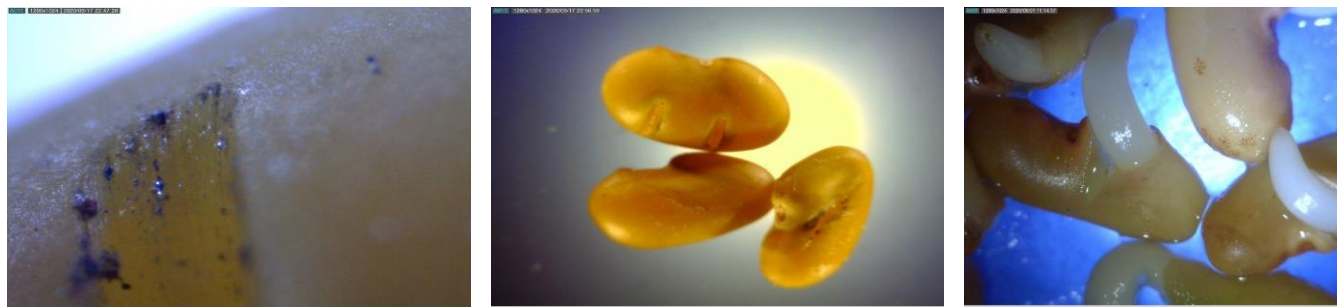


Рис. 2 – Семенной материал после обработки и результаты всхожести

Также были проведены дополнительные опыты открытыми и закрытыми рабочими органами:

- эксперимент с открытыми рабочими органами, с частотой вращения 16000 об/мин, время воздействия 10 сек. После проведения эксперимента по заданным параметрам видны значительные повреждения, семена повреждены избыточно, но жизнеспособны, виден битый зародыш, получивший избыточные повреждения в процессе обработки. Всхожесть составила порядка 4%.

- эксперимент с закрытыми рабочими органами, с ограничением траектории после контакта с рабочими органами и частотой вращения 16000 об/мин, время воздействия 10 сек. В ходе эксперимента семена получили повреждения не совместимые с дальнейшим использованием, всхожесть составила 0%.

### Заключение

Для семян с твёрдой оболочкой, таких, как у козлятника и других многолетних бобовых трав, сменной материал целесообразно сначала подвергать скарификации, для облегчения попадания влаги внутрь семени. Создавать микротрещины в оболочке семени нужно достаточно аккуратно, с не превышающим усилием так, чтобы не повредить жизнеспособность семенного материала и создать условия для ускоренного поступления воды внутрь семени, а как следствие, более высокой всхожести. Наибольшую всхожесть семян удалось получить в эксперименте с частотой вращения 950-1450 об/мин, прямой подачей сырья – где после обработки видны неглубокие, ярко выраженные риски без повреждения зародыша и в результате получены здоровые, крепкие ростки, а всхожесть составила 70%.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Попов В.Д. Организационно-технологические аспекты эффективности заготовки кормов в хозяйствах ленинградской области / В.Д. Попов, А.Н. Перекопский, В.Н. Горнак // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2003. – № 75. – С. – 14 – 21.
2. Сагалбеков У.М. Проблемы семеноводства многолетних трав / У.М. Сагалбеков // Аграрный сектор. – 2010. – № 1 (3) – с.34-35.
3. Попов В.Д. Пути развития кормовой базы в северо-западном регионе России / В.Д. Попов, В.М. Могильницкий, А.Н. Перекопский и др. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2001. – № 72. – С. – 22 – 27.
4. Перекопский А.Н. Ресурсосберегающие технологии производства кормов в условиях Северо-Западного региона РФ / А.Н. Перекопский // В сборнике: Экология и сельскохозяйственная техника. материалы 4-й научно-практической конференции. 2005. – С. – 152 – 159.
5. Оразбаев С. Влияние скарификации на твердосемянность многолетних бобовых трав / С. Оразбаев, Б. Салакшинова, Г. Мендибаева и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. № – 12 – 2 (19). – Стр. – 14 – 16.
6. Хасанов Э.Р. Универсальный пневматический скарификатор / Э.Р. Хасанов, Р.Р. Камалетдинов // Патент на изобретение RU 2683484 C1, 28.03.2019. Заявка № 2018126566 от 18.07.2018.
7. Rafiei Z. Assessment of effective factors on breaking seed dormancy in *Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb / Z. Rafiei, V. Rouhi // Acta Horticulturae. Vol. 1249, 2019, Pages 167-173.
8. Murugesan P. Hybrid seed germination in oil palm (*Elaeis guineensis*) affected by innovative dormancy breaking techniques / P. Murugesan, M. Shareef // Indian Journal of Agricultural Sciences Vol. 84, p. 1542-1545.
9. Хасанов Э.Р. Обоснование показателей качества работы скарификатора семян козлятника / Э.Р. Хасанов, Д.И. Маскулов, Р.З. Мусин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. – № 3 (51). С. 114 – 120.
10. Myint T. Germination of seed of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) as affected by different mechanical scarification methods / T. Myint, W. Chanprasert, S. Srikul // Seed Science and Technology. Vol. 38, 2010, P. 635-645.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Popov V. D. Organizacionno-tehnologicheskie aspekty ehffektivnosti zagotovki kormov v khozjajstvakh leningradskoj oblasti [Organizational and Technological Aspects of the Efficiency of Feed Procurement in the Farms of the Leningrad Region] / V. D. Popov, A. N. Perekopsky // Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva [Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop Production and Animal Husbandry]. 2003. - No. 75, pp. 14-21 [in Russian]
2. Sagalbekov U. M. Problemy semenovodstva mnogoletnikh trav [Problems of Seed Production of Perennial Herbs] / U. M. Sagalbekov // Agrarny sektor [Agricultural Sector]. – 2010. - № 1 (3), pp. 34-35 [in Russian]

3. Popov V. D. Puti razvitiya kormovojj bazy v severo-zapadnom regione Rossii [Ways of Developing the Feed Base in the North-Western Region of Russia] / V. D. Popov, V. M. Mogilnitsky, A. N. Perekopsky et al. // *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva* [Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop Production and Animal Husbandry]. 2001. - No. 72, pp. 22-27 [in Russian]
4. Perekopsky A. N. Resursosberegajushhie tekhnologii proizvodstva kormov v uslovijakh Severo-Zapadnogo regiona RF [Resource-Saving Technologies of Feed Production in the Conditions of the North-Western Region of the Russian Federation] / A. N. Perekopsky // *V sbornike: Ehkologija i sel'skokhozjajstvennaja tekhnika. materialy 4-jj nauchno-prakticheskijj konferencii* [In the Collection: Ecology and Agricultural Machinery. Proceedings of the 4th Scientific and Practical Conference]. 2005, pp. 152-159 [in Russian]
5. Orazbayev S. Vlijanie skarifikacii na tverdosemjannost' mnogoletnikh bobovykh trav [The Effect of Scarification on the Hard-Seeding of Perennial Legumes] / S. Orazbaev, B. Salakshinova, G. Mendibaeva et al. // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skijj zhurnal* [International Research Journal]. – 2013. № – 12 – 2 (19), pp.14-16 [in Russian]
6. Khasanov E. R. Universal'nyj pnevmaticheskijj skarifikator [Universal Pneumatic Scarifier] / E. R. Khasanov, R. R. Kamaletdinov // Patent for invention RU 2683484 C1, 28.03.2019. Application no. 2018126566, dated 18.07.2018 [in Russian]
7. Rafiei Z. Assessment of effective factors on breaking seed dormancy in *Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb / Z. Rafiei, V. Rouhi // *Acta Horticulturae*. Vol. 1249, 2019, Pages 167-173.
8. Murugesan P. Hybrid seed germination in oil palm (*Elaeis guineensis*) affected by innovative dormancy breaking techniques / P. Murugesan, M. Shareef // *Indian Journal of Agricultural Sciences* Vol. 84, p. 1542-1545.
9. Khasanov E. R. Obosnovanie pokazatelej kachestva raboty skarifikatora semjan kozljatnika [Justification of indicators of the quality of the work of the goatgrass seed scarifier] / Je.R. Hasanov, D.I. Maskulov, R.Z. Musin // *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University]. 2019. – № 3 (51). P. - 114-120.
10. Myint T. Germination of seed of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) as affected by different mechanical scarification methods / T. Myint, W. Chanprasert, S. Srikul // *Seed Science and Technology*. Vol. 38, 2010, P. 635-645.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.014>**ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРИИ ВОЗВРАТОВ ПУАНКАРЕ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТОБРАЖЕНИЙ АРНОЛЬДА**

Научная статья

**Ильичев В.Ю.\***

ORCID: 0000-0003-1017-5544,

Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

\* Корреспондирующий автор (patrol8[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Целью работы является разработка программы для реализации классического и модифицированного методов отображений Арнольда, позволяющей исследовать влияние начальных параметров отображений на факт возникновения или отсутствия возвратов, трактуемых соответствующей теоремой Пуанкаре.

Программа предназначена для работы с изображениями, поэтому для создания её кода выбран язык Python с подключением дополнительных модулей, хорошо зарекомендовавший себя при проведении предыдущих исследований автора и демонстрирующий удобство обработки матриц, сформированных из пикселей изображений.

Приводятся результаты, полученные с использованием разработанной программы; выработаны рекомендации по сферам применения рассмотренных алгоритмов обработки изображений. Созданная программа выложена в свободном доступе на сайте автора.

**Ключевые слова:** возвраты Пуанкаре, отображение Арнольда, синергетика, топология, язык Python, модуль Numpy, теория хаоса.

**NUMERICAL IMPLEMENTATION OF POINCARÉ RECURRENCE THEORY USING ARNOLD MAPPINGS**

Research article

**Ilyichev V.Yu.\***

ORCID: 0000-0003-1017-5544,

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russia

\* Corresponding author (patrol8[at]yandex.ru)

**Abstract**

The purpose of the work is to develop a program for implementing classical and modified Arnold mapping methods, which allows to investigate the effect of initial mapping parameters on the fact of the occurrence or absence of returns interpreted by the corresponding Poincaré theorem.

The program is designed to work with images, so to create its code, the Python language is chosen with the connection of additional modules, which has proven itself in previous studies of the author and demonstrates the convenience of processing matrices formed from image pixels.

The results obtained using the developed program are presented; recommendations were made on the scope of application of the considered image processing algorithms. The created program is freely available on the author's website.

**Keywords:** Poincaré returns, Arnold mapping, synergy, topology, Python language, Numpy module, chaos theory.

**Introduction**

One of the most promising and rapidly developing fields of science is synergetics [1], which aims to find an explanation for the phenomena of the self-organization of systems in conditions of seeming chaos. Despite the fact that such phenomena are observed in a huge number of processes of the surrounding reality, from a mathematical and physical point of view they began to be seriously considered only over the past two centuries (earlier this sphere belonged to philosophical and theosophical issues). Scientific and technological progress has now come to a point when it is impossible to investigate the behavior of many complex systems without attracting synergetics. In this regard, many hypotheses and theories appear that consider processes in the complex and form a close connection of sciences (in particular, physics, mathematics, biology, sociology, philosophy). The time has come to unite many scientific industries based on the knowledge of the new universal laws. At the same time, the laws and dependencies already used are not rejected, but there is an understanding of the limited conditions in which they can be applied.

Synergetics uses the principles of topology [2], which considers from the point of view of mathematics the conditions for the transition of systems from one external form to another. One of the greatest scientists, the ancestor of topology, is Henri Poincaré.

This work is a contribution to the study of problems that are the subject of synergetics and computational topology, and are within the scope of scientific interests of the author [3]. Within its framework, it is necessary to develop a tool for studying some laws of Poincaré recurrence theory [4]. This theory states that with some transformations of systems, almost any phase trajectory emanating from a given starting point will pass an infinite number of times in a close neighborhood of the original state.

It should be noted that the returnability of systems in general is one of the main ideas of modern science. The study of such returns allows not only a better understanding of the laws of nature, but also a more accurate prediction of the behavior of complex systems of various kinds (which are currently based on statistics).

For a visual demonstration of this theory (but not to prove it), the so-called Arnold mapping [5] in some cases can be successfully used - a mathematical description of such a transformation of the coordinates of the points of an object, in which for a number of recurrences visible chaos of the system forms, but as a result the system returns to its original state. This mapping is a special case of the Poincaré described homeomorphism (continuous mapping of topological spaces), which is a hyperbolic mapping of the torus [6].



Thus, the goal of the work was formulated - the creation of program code that implements different types of Arnold mapping in application to the processing of image files, and the study of the effect of the initial parameters of the mathematical model on the course and result of the mapping, on the possibility and speed of returning to the original image.

### Methods

Two Arnold mapping methods are considered, suitable for images having equal dimension (resolution, number of pixels) along the  $x$  and  $y$  coordinate axes:

1. classical, in which at each iteration of calculations, the transformation of the coordinates of image pixels (and in the general case, the coordinates of any numerical data forming a matrix) is carried out according to the formulas:

$$x_{i+1} = (2x_i + y_i) \% res \quad (1)$$

$$y_{i+1} = (x_i + y_i) \% res \quad (2)$$

where  $x_i$  and  $y_i$ ,  $x_{i+1}$  and  $y_{i+1}$  are pixel coordinates on the  $i$ -th and  $(i+1)$ -th iterations;  
 $\% res$  is the remainder of the integer division by the image resolution value.

2. modified, in which conversion is carried out according to the formulas:

$$x_{i+1} = (x_i + y_i + \Delta \cos(2\pi y_i)) \% res \quad (3)$$

$$y_{i+1} = (x_i + 2y_i) \% res \quad (4)$$

To use the above transformations, a program in the Python programming language [7] was compiled and posted for free use on the author's website [8]. The program consists of the following units:

1. Importing Matplotlib library functions [9] to generate an array of pixel values from the original image, a Numpy module for processing arrays, and a Math module for using mathematical functions found in equations (1-4).
2. Assigning values to the original parameters ( $\Delta$ , total number of iterations  $t$  and respectively intermediate generated images, image resolution).
3. Reading an image file and converting it to an array of pixel values.
4. Creating arrays to fill with pixel coordinates (before iteration  $x_i$  and  $y_i$ , and after iteration  $x_{i+1}$  and  $y_{i+1}$ ). In the case of obtaining a non-integer coordinate value (which is possible, for example, when calculating by formula (3) at some  $\Delta$  or due to accumulation of calculation error), the fractional part is discarded when generating the pixel coordinate of the image (but in further calculations a full value is used, without discarding the fractional part).
5. Organizing a transformation cycle that is executed a specified number of times  $t$ . After each iteration, the Matplotlib function converts the new pixel matrix to an image file whose name displays the iteration number. Thus, by viewing the received images, you can see the result of each iteration.

### Results

For the numerical experiment, an image file with a resolution of 256x256 pixels was selected. This image, as well as the graphics obtained after some iterations using the classic Arnold mapping, are given in Figure 1.

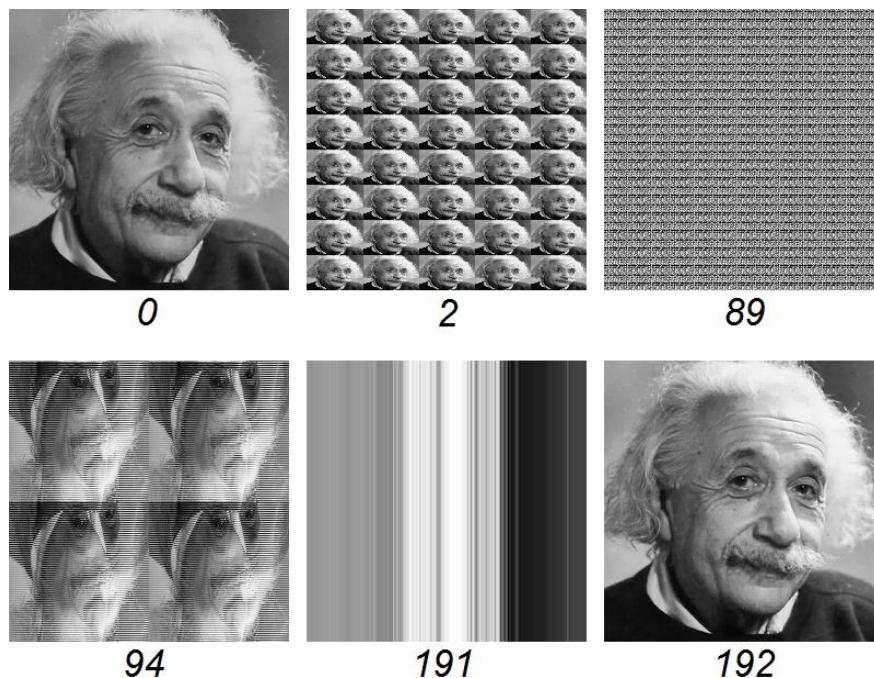


Fig. 1 – Source and intermediate images generated by the program with iteration numbers

Based on the presented results, it can be concluded that the classical Arnold mapping in the case of working with the 256x256 array leads to the return after 192 iterations.

Intermediate iterations visually demonstrate a different measure of chaos. In most of them, the original appearance of the image cannot be recognized in any way. From this we can draw the practical conclusion that the above conversion can be successfully used to encrypt image files or other data arrays [10].

The results of using the modified mapping are highly dependent on the parameter  $\Delta$  included in formulas (3, 4). Numerous calculations using the program (up to 50 thousand iterations for each  $\Delta$ ) showed the following:

1. with  $\Delta$  equal to 0 and other integers, results identical to the classical transformation are obtained.
2. values  $\Delta = 1.5, 2.5, \dots$  increases the number of iterations required to receive a return to 768. The intermediate results of the transformations are very similar to those formed at  $\Delta=0$ .
3. with other values of  $\Delta$ , it was not possible to achieve a return to the original image even in 50 thousand iterations. All intermediate results, except the very first iterations, almost identical in structure. Figure 2 shows for example the results of iterations at  $\Delta=0.33$ .

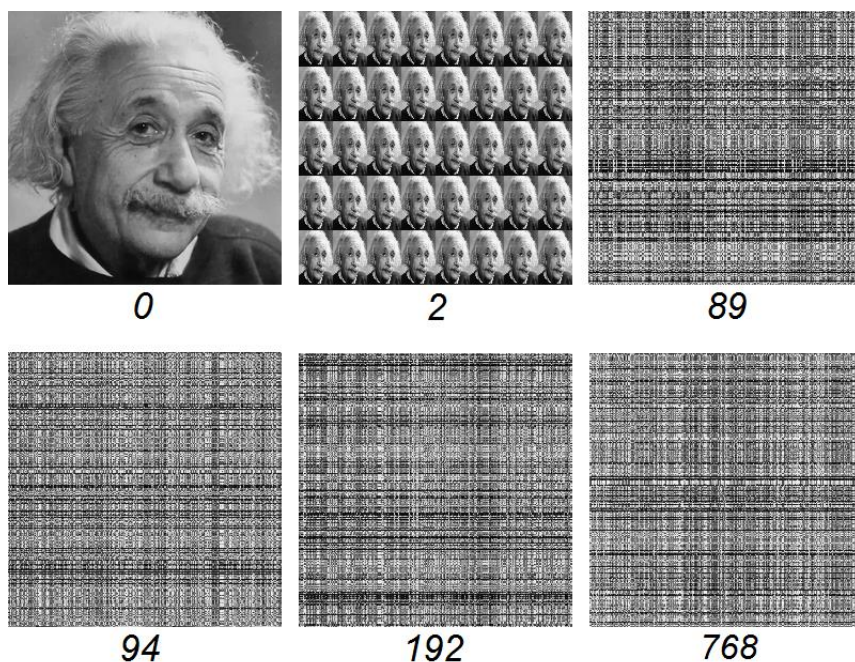


Fig. 2 – Results of iterations in implementation of modified Arnold mapping and intermediate values of  $\Delta$

4. Calculation is carried out at random (but varying in the range from 0 to 1 and multiples of 0.1) values of  $\Delta$ , changing at each iteration. As expected, no return occurred to the original image. Therefore, this case is not suitable for the visual demonstration of Poincaré returns.

5. For processing, png files with compression were used, so the volume of image files containing ordered images (such as iterations 0, 2, 94, 192 in Figure 1) is tens or even hundreds of times smaller than image files perceived as noise (iterations 89, 94, 192, 768 in Figure 2, forming png files of approximately equal size).

### Discussion

From the results obtained, it can be concluded that Poincaré returns are fully performed when implementing the classic Arnold mapping algorithm. For a modified mapping, returns are not performed with all initial values of variables - perhaps they would be possible with more iterations than 50 thousand, but to prove this it will require the creation of a special program and very long calculations. At the described stage of research, such a task was not set.

The second conclusion is that when performing the classical mapping algorithm, the number of iterations to achieve a return of the image to the original view is not a smooth function of the resolution of the image used (Figure 3).



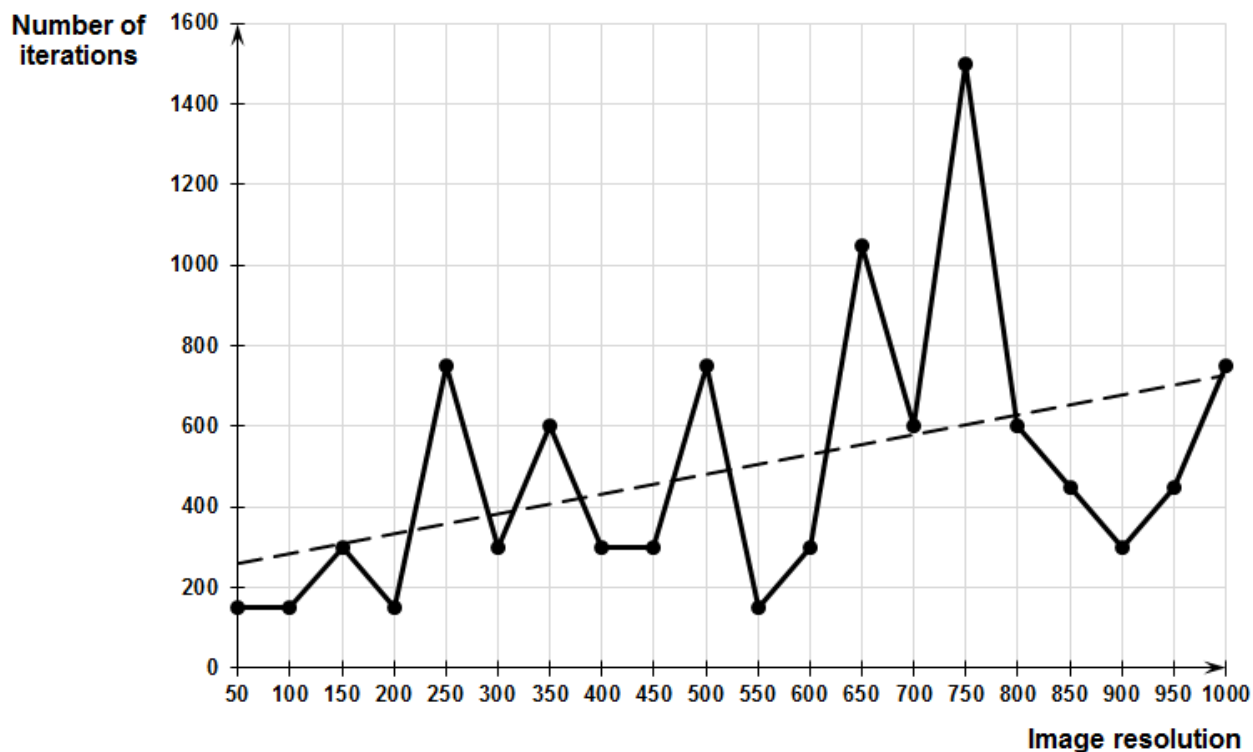


Fig. 3 – The number of iterations required to return to the original image depends on the resolution of the image.

Since the resolution values were chosen, multiples of 50 (which, moreover, are even numbers), for the final conclusion of the revealed pattern, it is also necessary to carry out a "through" calculation at all intermediate resolution values. The developed program allows to perform such a calculation, but it is extremely labor-intensive. However, even for selected discrete resolution levels, you can see that the number of iterations required for return increases on average with increasing image resolution (in Figure 3, a linear trend line is built for this).

In general, the image transformation considered can be characterized simultaneously as having both chaotic and logical (returnability) properties, which is just characteristic of the behavior of many complex systems and forms the basis of chaos theory.

### Conclusion

As a result of the work, the following tasks were solved:

- some of the questions posed to the new science - synergetics - are described and specific goals achieved in the course of the ongoing research are highlighted;
- an algorithm and program code in Python were compiled to demonstrate Poincaré recurrence theory using Arnold mapping methods by processing image files;
- results showing the work of the program and the features of the two mapping methods;
- conclusions were drawn on the prospects of using the developed program for further research.

The created program can also be used to teach the basics of synergetics, chaos theory, topology, to prepare presentations and further improve image transformation processes using additional Python language modules.

### Благодарности

Благодарю коллектив редакции.

### Acknowledgement

Thanks to the editorial staff.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Negmatov I. Synergetics as a new methodological direction in modern times / I. Negmatov // Test Engineering and Management. - 2020. - Vol. 83. - № 5-6. - P. 1798-1802.
2. Porter J.E. 50th spring topology and dynamical systems conference contributed problems in set-theoretic topology / J.E. Porter // Topology Proceedings. - 2017. - P. 351-368.
3. Ilichev V.Y. Development of program for determination of fractal dimensions of images / V.Y. Ilichev // International Research Journal. - 2021. - № 4-1 (106). - P. 6-10.
4. Anishchenko V.S. Poincaré recurrence theory and its applications to nonlinear physics / V.S. Anishchenko, S.V. Astakhov // Physics-USpekhi. - 2013. - Vol. 56. - № 10. - P. 955-972.
5. Hasegawa H.H. Spectral decomposition of the stretching dynamics of the Arnold cat map / H.H. Hasegawa, D.J. Driebe, C.B. Li // Physics Letters A. - 2003. - Vol. 319. - № 3-4. - P. 290-298.

6. Banakh T.O. Ergodic deformations of nonlinear Hamilton systems and local homeomorphism of metric spaces / T.O. Banakh, A.K. Prykarpatsky // Journal of Mathematical Sciences. - 2019. - Vol. 241. - № 1. - P. 27-35.
7. Prokopiev M.S. Development of a programming course for students of a teacher training higher education institution using the programming language Python / M.S. Prokopiev, E.Z. Vlasova, T.V. Tretyakova et al. // Propositos y representaciones. - 2020. - Vol. 8. - № 3. - P. 15.
8. Program for demonstration Poincaré recurrence theory using Arnold mappings. [Electronic resource] URL: <http://turbopython.ru/poincare> (accessed 04.05.2021).
9. Ilichev V.Yu. Development of procedure for determination of characteristics of heated polycarbonate greenhouses / V.Yu. Ilichev // International Research Journal. - 2021. - № 2-1 (104). - P. 132-135.
10. Minati Mishra. High security image steganography with modified Arnold cat map / Minati Mishra, Ashanta Ranjan Routray, Sunit Kumar. // International Journal of Computer Applications. - 2012. - V. 37. - № 9. - P. 16-20.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.015>**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФУТЕРОВКИ ГАЗОХОДОВ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ  
ОГНЕУПОРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Научная статья

**Пашков Е.И.<sup>1</sup>, Пермяков М.Б.<sup>2</sup>, Краснова Т.В.<sup>3,\*</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8015-7897;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-1213-9005;<sup>1, 2, 3</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

\* Корреспондирующий автор (toma.krasnova.70[at]mail.ru)

**Аннотация**

Особенностью огнеупорной футеровки газоходов тепловых агрегатов является их устройство, предполагающее, что движение воздуха и газов в разных частях происходит с разной температурой и скоростью. Соответственно износ теплоизоляции по длине газоходов происходит неравномерно. Это влечёт проблему ремонтов и восстановления газоходов. В статье авторами рассматриваются современные технологии футеровки огнеупорными материалами. Целью исследования является определение перспективных технологий устройства и ремонта огнеупорных футеровок газоходов тепловых агрегатов. Рассмотрены новации в области материалов и технологий устройства футеровок. Авторы приходят к выводу, что современные подходы в организации теплоизоляции позволяют проводить ремонты в сложных условиях без долговременной остановки производственных процессов. Перспективными являются технологии футеровки газоходов огнеупорными массами методом торкретирования. Роботизация процессов торкретирования, применение автоматизированных рук позволит осуществлять ремонт и восстановление теплоизоляционных огнеупорных покрытий без охлаждения теплотехнических агрегатов и снизит трудозатраты, сроки устройства и ремонта футеровки газоходов тепловых агрегатов.

**Ключевые слова:** футеровка, технологии, огнеупорные материалы, тепловые агрегаты, газоходы.**MODERN TECHNOLOGIES IN REFRACTORY LINING OF THERMAL GENERATING UNITS**

Research article

**Pashkov E.I.<sup>1</sup>, Permyakov M.B.<sup>2</sup>, Krasnova T.V.<sup>3,\*</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8015-7897;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-1213-9005;<sup>1, 2, 3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

\* Corresponding author (toma.krasnova.70[at]mail.ru)

**Abstract**

A feature of the refractory lining of thermal generating units is their composition, which assumes that the movement of air and gas in different parts occurs at different temperatures and speeds. Accordingly, the wear of thermal insulation along the length of the ducts is uneven, which leads to the problem of repairs and restoration of gas ducts. In the article, the authors examine modern technologies of lining with refractory materials with the aim of determining promising technologies for the construction and repair of refractory linings of gas ducts of thermal generating units. Innovations in the field of materials and technologies of lining construction are also considered. The authors come to the conclusion that modern approaches to the organization of thermal insulation allow repairs to be carried out in difficult conditions without a long-term shutdown of production processes. The technologies of lining with refractory mixtures via shotcrete prove to be promising. Robotization of shotcrete processes, the use of automated hands will allow for the repair and restoration of heat-insulating refractory coatings without cooling heat-engineering units and will reduce labor costs, the timing of the installation and repair of the lining of the ducts of thermal generating units.

**Keywords:** lining, technologies, refractory materials, thermal generating units, flues.**Введение**

Проблемой эксплуатации и повышения стойкости футеровок тепловых агрегатов занимались многие отечественные исследователи: В. В. Словицкий, А.А. Новопашина, А. И. Хлыстов, А. В. Сычев, О. Б. Воронина, В. Г. Овсянников, В. В. Соколов и другие. А решение организационно-технических вопросов по разработке и внедрению в практику современного огнеупорного футеровочного материала – без обжигового жаростойкого бетона до сих пор не теряют своей актуальности [1]. Отечественная и зарубежная промышленность использует для производства огнеупоров более 150 различных сырьевых материалов, в том числе более 100 веществ неорганического состава [2]. Вопросы безопасности и экологичности промышленного производства актуальны. Несвоевременные и некачественные ремонтные работы могут привести к инцидентам, отказам и аварийным ситуациям [3]. Поэтому проблема использования современных качественных материалов и технологий требует внимания.

Газоходами являются каналы для движения воздуха и продуктов сгорания. В зависимости от материала изготовления они бывают кирпичными, железобетонными и стальными, с устройством внутренней огнеупорной футеровки. С развитием производства огнеупорных материалов, технологии устройства футеровки газоходов совершенствуются.

Целью исследования является определение перспективных технологий устройства и ремонта огнеупорных футеровок газоходов тепловых агрегатов.

## Основная часть

Технологии футеровочных работ имеют разновидности:

- ручное устройство футеровки (путем кладки из огнеупорных материалов и камней);
- использование специализированного инструмента при ручном нанесении растворов;
- заливка огнеупорных бетонов в опалубку;
- машинное нанесение бетонов, растворов методом торкретирования.

Каждая из технологий подходит под определенные режимы работ и конфигурации конструкций футеруемых поверхностей [4]. Сложность при ремонте локальных разрушений футеровок агрегатов обусловлена условиями производственного процесса предприятия и малой продолжительностью остановок оборудования и технологического процесса в целом.

Ручное устройство футеровки – традиционный вид устройства конструкций, имеющих сложные конфигурации, таких как газоходы различных диаметров. Штучные керамические огнеупоры разнообразного состава, как тяжелые, так и легковесные, до сих пор широко используются для выполнения теплоизоляционной части футеровок промышленных печей и других тепловых агрегатов [5]. Футеровку цилиндрических газоходов осуществляют вперевязку на растворе. Футеровка бывает однослойной и многослойной. В первом случае все окаты между собой не перевязываются. Толщину слоев футеровки при диаметре газохода до 2,5 м обычно делают в полкирпича, при диаметре более 2,5 м – в один кирпич. Технологию футеровки газоходов осуществляют в сочетании с легковесными и неформованными материалами, торкрет массами, огнеупорными бетонами. Металлическую поверхность при высоких температурах изолируют асбестовым или каолиновым картоном с последующей укладкой огнеупорного материала. Существуют различные технологии футеровки газоходов: укладка огнеупорных набивных масс, огнеупорная обмазка, монолитная футеровка и торкретирование.

Технология использования огнеупорных набивных масс предполагает применение воздушно-твердеющих и термотвердеющих смесей. Особенностью является требовательность к срокам и условиям хранения готовой массы, способной терять свою пластичность со временем. Так же на качество эксплуатационной стойкости такой футеровки существенно влияют неплотное прилегание пластов набивки между собой, неравномерность набивки, дающее множественность волосяных трещин, ведущих к неравномерности внутренних напряжений футеровки. Надёжность сцепления анкерных болтов с пластической массой гарантирует отсутствие зазоров по периметру, что исключает возможность проникновения газов к кожуху.

Технология огнеупорной обмазки заключается в исполнении герметизирующего покрытия огнеупорной кладки снаружи (для повышения её газонепроницаемости). Огнеупорная обмазка должна иметь высокую адгезию и плотно прилегать к кладке, поверхность её должна исключать наличие усадочных трещин. Для создания долговечной огнеупорной футеровки агрегата необходимо учитывать работу по оптимизации состава огнеупорных обмазок с целью сближения коэффициентов термического расширения затвердевшего жаростойкого раствора с керамическим огнеупором [6].

Технология монолитной футеровки в сравнении с огнеупорной кладкой имеет преимущества. Её применение позволяет сократить трудозатраты, сроки и стоимость строительства. При этом возможно исполнение изделий любых размеров и форм, которые сочетаются с принудительно охлаждаемыми металлическими поверхностями газоходов при проведении горячих ремонтов. Применение современных однокомпонентных и многокомпонентных вяжущих предполагает специальную предварительную подготовку, называемую активацией. Под активацией сухих строительных, а также жидкофазных растворных и бетонных смесей подразумевают различные физические, физико-химические и химические способы воздействия, как на отдельные компоненты, так и на их композиции. Это приводит к интенсификации процессов структурообразования, модифицированию структуры и свойств композиционных материалов [7], [8], [9].

Технологические новации в области футеровочных работ: саморастекание, торкретирование, шоткретирование и т. д., позволяют эффективно применять неформованные огнеупорные материалы в тепловых агрегатах. В первую очередь это касается низко-, ультранизко- и бесцементных огнеупорных неформованных материалов [10]. Технология торкретирования применялась еще в прошлом веке (это был способ сухого торкретирования при помощи специального оборудования, когда сжатым воздухом сухая смесь по шлангу подаётся в сопло, где смешивается с водой, подводимой по другому шлангу, и с силой выбрасывается на заданную поверхность). Такой способ футеровки предполагает послойное наращивание толщины и может эффективно применяться на поверхностях различной конфигурации. Несомненными достоинствами метода торкретирования являются: высокая адгезия, плотность и когезия, оптимальное соотношение воды и цемента, возможность нанесения за один раз слоя значительной толщины. В дальнейшем возник метод «мокрого» торкретирования, где готовая (затворенная) бетонная смесь подавалась в бетононасос и сплошным потоком гидравлическим способом поступала по шлангу в сопло, куда по другому шлангу шел сжатый воздух, разрывающий сплошной поток смеси и транспортирующий её на торкретируемую поверхность. При таком способе качество торкретбетонной смеси достигалось введением различных добавок – пластификаторов (это удорожало стоимость работ). Бетонная смесь уже могла готовиться в другом специализированном месте и доставляться при помощи автобетоносмесителя, но это лишало возможности остановок процесса торкретирования из-за застывания (схватывания) смеси в шланге. Промежуточным пневматическим способом между «сухим» и «мокрым» торкретированием является способ «мокрого» торкретирования в разряженном потоке. Здесь так же есть возможность приготовления бетонной смеси на бетонном заводе, но нет потребности вводить в неё пластификаторы. При этом методе торкретирования происходит высокий отскок смеси. Недостатком являются ограничения по возможности остановок процесса, необходимость нанесения клеящего слоя, применение дополнительно ускорителей схватывания.

Технология факельного торкретирования предполагает подачу (под давлением) торкрет-массы с органическими, либо химическими связующими в горящий факел. К этому способу часто прибегают при профилактических и горячих ремонтах без охлаждения теплотехнического агрегата. Новшеством явилась возможность использования СВС

(самораспространяющегося высокотемпературного синтеза) – материалов, позволяющих при помощи высокопроизводительной торкрет-установки достигать необходимых физико-химических свойств футеровки тепловых агрегатов [11].

Перспективой развития технологий торкретирования может стать актуальное направление использования аддитивных технологий [12]. Роботизация процессов торкретирования, применение автоматизированных рук позволит сделать процесс ремонта и восстановления теплоизоляционных покрытий еще более эффективным в условиях непрерывного производства без охлаждения теплотехнических агрегатов. Модернизация технологических процессов и хозяйственной организации на современном уровне позволит решить так же экологические требования времени. Для сокращения энергозатрат на выполнение работ могут применяться альтернативные источники энергии, такие как: ветер, солнце, движение воды, вторичные энергетические ресурсы и другие [13].

Появление новых технологий сопровождается поиском новых материалов. Примером могут являться неформованные корундовые огнеупоры – мертели и бетоны с корундовым заполнителем. Потенциально представляют интерес полимербетоны, в том числе и с точки зрения их электроизоляционных прочностных свойств в условиях термостарения [14], [15]. Перспективным направлением исследования стали керамические материалы на основе дисперсного карбида кремния на связке алюмомагнитной шпинели. Благодаря объемному экранированию эти материалы устойчивы к окислению и абразивному износу в условиях воздействия высокоскоростного газового потока (скоростью до 300 м/с, в окислительной среде до 2000°С) [16]. А применение плотноспеченного периклазового порошка позволило формировать более плотную и прочную структуру рабочего слоя футеровки. Группой Магнезит разработано связующее, позволяющее наносить торкрет-слой значительной толщины без его сползания со стенок. Нужно отметить, что модернизация производства предприятий – производителей торкрет-масс увеличивает возможности формирования многокомпонентных составов и их стендового испытания [17].

### Вывод

Особенностью огнеупорной футеровки газоходов тепловых агрегатов является их устройство, предполагающее, что движение воздуха и газов в разных частях происходит с разной температурой и скоростью. Соответственно износ теплоизоляции по длине газоходов происходит неравномерно. Это влечёт проблему ремонтов и восстановления газоходов. Часто требуются комбинированные виды футеровки.

Современные подходы в организации теплоизоляции позволяют проводить ремонты в сложных условиях без длительного останова производственных процессов. Перспективными являются технологии футеровки газоходов огнеупорными массами методом торкретирования.

Роботизация процессов торкретирования, применение автоматизированных рук позволит осуществлять ремонт и восстановление теплоизоляционных огнеупорных покрытий без охлаждения теплотехнических агрегатов и снизит трудозатраты, сроки устройства и ремонта футеровки газоходов тепловых агрегатов.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Хлыстов А.И. Повышение эффективности и улучшение качества огнеупорных футеровочных материалов / А.И. Хлыстов // Современные проблемы науки и образования. 2009. № 1. С. 40.
2. Перепелицын В.А. Минерально-сырьевая база производства современных огнеупоров (обзор) / В.А. Перепелицын, И.В. Юкеева, Л.В. Остряков // Огнеупоры и техническая керамика № 5, 2008. С.56-60.
3. Permyakov M. B. Assessment of reliability and accident risk for industrial buildings / M. B. Permyakov, A. N. Ilyin, V. M. Andreev et al. // electronic collection. Editors: A. Volkov, A. Pustovgar and A. Adamtsevich // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 02007. DOI: 10.1051/mateconf/201825102007
4. Краюхин В.И. Жаростойкие бетоны: Составы. Эксплуатация. Восстановление основных свойств после длительной эксплуатации / В.И. Краюхин // Саратов, 2014. 348 с.
5. Хлыстов А.И. Применение огнеупорных обзоров специального назначения для повышения стойкости и долговечности футеровок тепловых агрегатов / А.И. Хлыстов, В.В. Сульдин, Н.С. Журавлев // В сборнике: Теория и практика повышения эффективности строительных материалов. Материалы XIII Международной научно-технической конференции молодых ученых, посвященной памяти профессора В.И. Калашникова. Под общей редакцией М.О. Коровкина, Н.А. Ерошкиной. 2018. С. 168-174.
6. Хлыстов А.И. Новые огнеупорные футеровочные материалы / А.И. Хлыстов, Е.М. Власова, В.А. Широков, В.В. Сульдин // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии. сборник статей. Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. Самара, 2019. С. 38-45.
7. Abzaev Yu.A. The effect of cyclic magnetic treatment of mixing water on the structural state of the phases of cement stone at various times of hardening / Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Safronov V.N. et al. // Bulletin of TGAUU, 2016. 1P.145–154
8. Fediuk R.S. Mechanical Activation of Construction Binder Materials by Various Mills / R.S. Fediuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016/04 Vol.125, 012019.
9. Федюк Р.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов, В.С. Лесовик // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4(37) DOI.org/10.5281/zenodo.2008670
10. Аксельрод Л.М. Стратегические направления развития огнеупорных материалов для металлургии в России / Л.М. Аксельрод // Новые огнеупоры. 2015;(5):17-28. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-5-17-28
11. Словицкий В. В. СВС-материалы для ремонта кладки тепловых агрегатов / В. В. Словицкий, А. В. Гуляева / тез. докладов междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов 7-8 апреля 2016 года г. Москва // Новые огнеупоры. 2016, №3. С. 88.

12. Пермяков М.Б. Аддитивные технологии в строительстве и дизайне архитектурной среды: настоящее и будущее / М.Б. Пермяков, Т.В. Краснова, А.В. Дорофеев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2018. Т. 9. № 2. С. 2-5

13. Permyakov M.B. Alternative energy sources in resolving environmental problems and providing safety of single-industry towns / M.B. Permyakov, T.V. Krasnova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. P. 012026. DOI:10.1088/1757-899X/972/1/012026

14. Ilin A.N. Regularities of changes in material properties for some polymer-concrete ratios / A.N. Ilin, M.B. Permyakov, V.M. Andreev, T.V. Krasnova // E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. 2019. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001009

15. Пашков Е.И. Современные строительные теплоизоляционные материалы / Е.И. Пашков, М.Б. Пермяков, Т.В. Краснова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2020. Т. 11. № 2. С. 15-19.

16. Лукин Е. С. Огнеупорные материалы для применения при высоких температурах / Е. С. Лукин, Н. А. Попова, Л. Т. Павлюкова и др. // тез. докладов междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов 7-8 апреля 2016 года г. Москва // Новые огнеупоры. 2016, №3 С.59

17. Аксельрод Л. М. Торкрет-массы Группы Магнезит нового поколения / Л. М. Аксельрод, М. Ю. Турчин, А. П. Лаптев и др. // тез. докладов междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов 7-8 апреля 2016 года г. Москва // Новые огнеупоры. 2016, №3. С. 29.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Hlystov A.I. Povyshenie jeffektivnosti i uluchshenie kachestva огнеупорных футеровочных материалов [Improving the efficiency and improving the quality of refractory lining materials] / A.I. Hlystov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]. 2009. № 1. P. 40. [in Russian]

2. Perepelitsyn V.A. Mineral'no-syr'evaya baza proizvodstva sovremennykh огнеупоров (obzor) [Mineral and raw materials base for the production of modern refractories (review)] / V.A. Perepelitsyn, I.V. Jukseeva, L.V. Ostrjakov // Огнеупоры и техническая керамика [Refractories and technical ceramics]. № 5, 2008. P.56-60. [in Russian]

3. Permyakov M. B. Assessment of reliability and accident risk for industrial buildings / M. B. Permyakov, A. N. Ilyin, V. M. Andreev et al. // electronic collection. Editors: A. Volkov, A. Pustovgar and A. Adamtsevich // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 02007. DOI: 10.1051/mateconf/201825102007

4. Krajuhin V.I. Zharostojkie betony: Sostavy. Jekspluatacija. Vosstanovlenie osnovnyh svojstv posle dlitel'noj jekspluatacii [Heat-resistant concrete: Compositions. Exploitation. Restoration of basic properties after long-term operation] / V.I. Krajuhin // Saratov, 2014. 348 p. [in Russian]

5. Hlystov A.I. Primenenie огнеупорных обмазок special'nogo naznachenija dlja povyshenija stojkosti i dolgovechnosti футеровок тепловых агрегатов [Application of special-purpose refractory coatings to increase the resistance and durability of linings of thermal units] / A.I. Hlystov, V.V. Sul'din, N.S. Zhuravlev // V sbornike: Teorija i praktika povyshenija jeffektivnosti stroitel'nyh materialov. Materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh, posvjashhennoj pamjati professora V.I. Kalashnikova [In the collection: Theory and practice of increasing the efficiency of building materials. Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, dedicated to the memory of Professor V.I. Kalashnikov] / Under the general editorship of M.O. Korovkina, N.A. Eroshkina. 2018. P. 168-174. [in Russian]

6. Hlystov A.I. Novye огнеупорные футеровочные материалы [New refractory lining materials] / A.I. Hlystov, E.M. Vlasova, V.A. Shirokov, V.V. Sul'din // V sbornike: Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'nye tehnologii. sbornik statej [In the collection: Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technologies. Digest of articles] / Edited by M.V. Shuvalova, A.A. Pishchuleva, A.K. Strelkov. Samara, 2019. P. 38-45. [in Russian]

7. Abzaev Yu.A. The effect of cyclic magnetic treatment of mixing water on the structural state of the phases of cement stone at various times of hardening / Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Safronov V.N. et al. // Bulletin of TGAUU, 2016.1 P.145-154

8. Fediuk R.S. Mechanical Activation of Construction Binder Materials by Various Mills / R.S. Fediuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016/04 Vol.125, 012019.

9. Fedjuk R.S. Sovremennye sposoby aktivacii vjazhushhego i betonnyh smesej (obzor) [Modern methods of activating a binder and concrete mixtures (review)] / R.S. Fedjuk, A.V. Mochalov, V.S. Lesovik // Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU [Bulletin of the FEFU Engineering School]. 2018. № 4(37) DOI.org/10.5281/zenodo.2008670 [in Russian]

10. Aksel'rod L.M. Strategicheskie napravlenija razvitiya огнеупорных материалов dlja metallurgii v Rossii [Strategic directions for the development of refractory materials for metallurgy in Russia] / L.M. Aksel'rod // Novye огнеупоры [New refractories]. 2015;(5):17-28. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-5-17-28 [in Russian]

11. Slovikovskij V. V. SVS-materialy dlja remonta kladki teplovых агрегатов [SHS-materials for repair of masonry of thermal units] / V. V. Slovikovskij, A. V. Guljaeva / тез. докладов междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов 7-8 апреля 2016 года г. Москва // Novye огнеупоры [abstracts. reports international. conf. refractories and metallurgists April 7-8, 2016 Moscow // New refractories]. 2016, №3. P. 88. [in Russian]

12. Permjakov M.B. Additivnye tehnologii v stroitel'stve i dizajne arhitekturnoj sredy: nastojashhee i budushhee [Additive technologies in construction and design of the architectural environment: present and future] / M.B. Permjakov, T.V. Krasnova, A.V. Dorofeev // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovaniya. 2018. Vol. 9. № 2. P. 2-5 [in Russian]

13. Permyakov M.B. Alternative energy sources in resolving environmental problems and providing safety of single-industry towns / M.B. Permyakov, T.V. Krasnova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. P. 012026. DOI:10.1088/1757-899X/972/1/012026

14. Ilin A.N. Regularities of changes in material properties for some polymer-concrete ratios / A.N. Ilin, M.B. Permyakov, V.M. Andreev, T.V. Krasnova // E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. 2019. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001009
15. Pashkov E.I. Sovremennye stroitel'nye teploizoljacionnye materialy [Modern building thermal insulation materials] / E.I. Pashkov, M.B. Permjakov, T.V. Krasnova // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija [Actual problems of modern science, technology and education]. 2020. Vol. 11. № 2. P. 15-19. [in Russian]
16. Lukin E. S. Ogneupornye materialy dlja primeneniya pri vysokih temperaturah [Refractory materials for use at high temperatures] / E. S. Lukin, N. A. Popova, L. T. Pavljukova et al. // tez. dokladov mezhdunar. konf. ogneuporshhikov i metallurgov 7-8 aprelja 2016 goda g. Moskva // Novye ogneupory [thesis. reports international. conf. refractories and metallurgists April 7-8, 2016 Moscow // New refractories]. 2016, №3 P.59 [in Russian]
17. Aksel'rod L. M. Torkret-massy Gruppy Magnezit novogo pokolenija [Shotcrete masses of the Magnesite Group of a new generation] / L. M. Aksel'rod, M. Ju. Turchin, A. P. Laptev et al. // tez. dokladov mezhdunar. konf. ogneuporshhikov i metallurgov 7-8 aprelja 2016 goda g. Moskva // Novye ogneupory [Tez. reports international. conf. refractories and metallurgists April 7-8, 2016 Moscow // New refractories]. 2016, №3. P. 29. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.016>**ПЛАТФОРМЫ LOW-CODE И NO-CODE КАК СПОСОБ СДЕЛАТЬ ПРОГРАММИРОВАНИЕ БОЛЕЕ ДОСТУПНЫМ ДЛЯ ШИРОКОЙ ОБЩЕСТВЕННОСТИ**

Обзорная статья

**Магомадов В.С.\***

ORCID: 0000-0002-7542-6896,

Чеченский государственный университет, Грозный, Россия

\* Корреспондирующий автор (vmagomadov[at]gmail.com)

**Аннотация**

Сфера программирования находится в постоянном процессе развития. На рынке появляются новые технологии, которые обещают преобразовать то, как программирование осуществляется на сегодняшний день. Платформы, известные как low-code и no-code, являются такими технологиями, которые, по мнению некоторых специалистов, могут значительным образом изменить сферу разработки программного обеспечения. В данной статье, рассматриваются эти технологии с точки зрения их сторонников, а также, тех, кто не считают, что эти платформы принесут серьезные изменения в процесс программирования. Кроме того, рассматриваются преимущества подобных технологий и то, в каком контексте они могут быть наиболее эффективно использованы. В статье также описываются наиболее популярные платформы low-code и no-code, используемые теми или иными компаниями.

**Ключевые слова:** программирование, код, low-code, no-code, разработка, языки программирования.

**LOW-CODE AND NO-CODE PLATFORMS AS A WAY OF MAKING PROGRAMMING MORE ACCESSIBLE TO THE GENERAL PUBLIC**

Review article

**Magomadov V.S.\***

ORCID: 0000-0002-7542-6896,

Chechen State University, Grozny, Russia

\* Corresponding author (vmagomadov[at]gmail.com)

**Abstract**

The field of programming is in a constant process of development. New technologies are emerging on the market that promise to transform the way programming is done today. Platforms known as low-code and no-code are technologies that, according to experts, can significantly change the field of software development. The current article examines these technologies from the point of view of their supporters, as well as those who do not believe that these platforms will bring major changes to the process of programming. In addition, the study assesses the advantages of such technologies and the context in which they can be most effectively used. Also, it describes the most popular low-code and no-code platforms used by various companies.

**Keywords:** programming, code, low-code, no-code, development, programming languages.

**Введение**

Программирование всегда было трудным занятием, требующим много времени и усилий, чтобы овладеть им. Обычно требуются годы, чтобы человек стал достаточно компетентным в этой области и смог решать проблемы. Однако, в последние несколько лет появились некоторые технологии, которые обещают сделать программирование намного проще. Некоторые из этих платформ позволяют разрабатывать приложения с минимальным объемом кода; другие позволяют делать то же самое без необходимости написания кода вообще [1].

Идея сделать процесс написания кода проще и, таким образом, сделать его более доступным для широкой публики существует уже довольно давно. Многие компании заинтересованы в вышеупомянутых платформах, потому что они могут сделать разработку приложений менее трудоемкой и более рентабельной. В настоящее время ведутся дебаты о том, могут ли эти платформы заменить традиционное программирование или нет. Некоторые считают, что за ними будущее программирования; другие, однако, не согласны, утверждая, что эти платформы могут быть полезны, когда речь идет о разработке некоторых базовых однообразных приложений, но они ограничены, когда речь идет о написании сложных программ, и из-за этого традиционный способ написания программного обеспечения не может быть заменен, по крайней мере, в ближайшее время [1].

Данная область является новой и количество научных статей, исследующих ее, ограничено. Существуют исследования, рассматривающие каждую из платформ индивидуально в том или ином контексте, н-р, применение платформ low-code в создании автоматизированных систем.

**Программирование посредством no-code**

Программирование посредством no-code – это способ написания программного обеспечения без фактического написания кода. Сторонники этой методики утверждают, что она дает людям без предшествующего опыта программирования возможность разрабатывать приложения, которые традиционно разрабатывались путем написания кода. Это достигается с помощью визуального программирования, где пользователям предоставляется графический пользовательский интерфейс, позволяющий им перетаскивать компоненты для манипулирования кодом [2].

Многие рассматривают программирование без кода как естественный следующий шаг в эволюции разработки программного обеспечения. Они указывают на то, что все широко используемые сегодня языки программирования, такие как Java, C#, Python, JavaScript и т. д. были разработаны, чтобы сделать программирование проще, то есть разработчики смогли отойти от ассемблера (это, конечно же, не означает, что он не используется в наши дни), который был слишком трудным для понимания даже для программистов, не говоря уже о людях, не имеющих навыков



программирования. Вышеупомянутые языки упрощали программирование, абстрагируясь от сложностей, связанных с машинным кодом. Таким образом, следующий логический шаг состоит в том, чтобы сделать программирование еще проще путем использования платформ no-code [3].

Идея разработки программного обеспечения без кода не является совсем уж новой, и такого рода технологии существовали даже в 90-е годы, но по сравнению с сегодняшними платформами no-code они были довольно ограниченными. В то время, одна из самых популярных технологий такого рода была известна как CASE (computer-aided software engineering). Однако, инструменты, которые были включены в CASE, нельзя рассматривать как инструменты no-code, поскольку их основной целью было помочь программистам в выполнении некоторых задач разработки, но не в написании кода. Можно также сказать, что такие технологии, как Adobe Dreamweaver и Visual Basic, также являются инструментами no-code, но они требуют навыков написания кода [4].

### **Программирование при помощи инструментов low-code**

Разработка при помощи low-code требует от пользователей определенный уровень владения навыками написания кода, хотя требуется его гораздо меньше, чем при традиционной разработке приложений. Профессиональные разработчики и программисты используют low-code для быстрой разработки несложных приложений, чтобы они могли уделить основное внимание на разработку более сложных программ, которые имеют большее влияние и большую ценность для организации. Сотрудники, не являющиеся ИТ-специалистами, обладающие некоторыми знаниями в области программирования, также используют инструменты low-code для разработки простых приложений или добавления функций внутри существующего приложения [5].

Инструменты low-code нацелены на то, чтобы решить проблему нехватки разработчиков, снижая кривую обучаемости и привлекая людей с нетехническим образованием, которые могут иметь небольшой опыт в программировании. Low-code описывает использование различных визуальных, гибких и основанных на правилах инструментов разработки и предварительно настроенных элементов для ускорения процесса разработки приложений и прототипирования. Многие аспекты разработки системы могут быть приведены в действие посредством low-code для устранения избыточности и затрат. Благодаря инструментам low-code разработчики больше не должны индивидуально кодировать каждый пользовательский интерфейс, рабочий процесс или процедуру нового приложения. Системы могут быть построены с меньшим риском написания кода, и самые опытные разработчики могут сосредоточиться на более сложных задачах [6].

### **Основные отличия**

Грань между платформами low-code и no-code не всегда является ясной. Многие аналитики технологических продуктов считают платформы no-code частью рынка low-code, поскольку даже самые сильные платформы требуют определенный уровень знаний в написании кода для отдельных частей разработки и развертывания приложений. В основном, поставщики этих услуг устанавливают большую часть различий между платформами low-code и no-code, поскольку они позиционируют свои продукты для различных групп клиентов [7].

В целом, можно сказать, что платформы no-code – это специализированный тип платформ low-code, в которых необходимые визуальные компоненты выполняют отраслевые функции, определенное направление бизнеса или поддерживают корпоративный бренд конкретной компании. Платформы low-code, однако, могут потребовать помощи собственных разработчиков для внесения небольших изменений в код бэкенда, чтобы новое приложение соответствовало другим бизнес-программам [8].

### **Популярные платформы low-code и no-code**

#### **Salesforce**

Salesforce имеет долгую историю внедрения платформ, ориентированных исключительно на нетехнических бизнес-пользователей, и её решения low-code и no-code не являются исключением. Платформа Salesforce теперь включает в себя ряд инструментов компании, предназначенных для помощи в разработке бизнес-приложений, включая Salesforce Lightning, Force.com, и облачная платформа приложений Salesforce. Мобильный издатель компании позволяет разработчикам публиковать приложения в магазинах приложений Apple и Google [9].

#### **OutSystems**

OutSystems рассматривает растущий спрос на непрерывную разработку, предлагая решение, в котором используется искусственный интеллект, чтобы помочь разработчикам создавать приложения с помощью визуальной среды разработки, основанной на моделях. Доступ пользователей основан на персоне, что позволяет разрабатывать на уровне комфорта пользователей, начиная от профессиональных и заканчивая начинающими разработчиками. Сервисы платформы, улучшенные с помощью искусственного интеллекта, обеспечивают автоматизацию для улучшения жизненного цикла приложений. Платформа использует шаблоны, а также настраиваемые приложения [9].

#### **Microsoft Power Apps**

Microsoft Power Apps, основная платформа разработки low-code и no-code от компании Microsoft, предназначена для того, чтобы помочь пользователям создавать мобильные и веб-приложения. Это решение тесно интегрировано с рядом продуктов Microsoft, построенных на Common Data Service, которая подключается к бизнес-данным, хранящимся либо в базовой платформе данных (Microsoft Dataverse), либо в различных сетевых и локальных источниках данных (SharePoint, Microsoft 365, Dynamics 365, SQL Server) [9].

### **Барьеры**

Платформы low-code и no-code имеют много преимуществ, но с ними также появляются и некоторые проблемы. Многие лучшие подходы только появляются и являются относительно незрелыми. При традиционном программировании существует огромный опыт и надежные сообщества. Во многих отношениях платформы low-

code/no-code находятся в зачаточном состоянии, хоть разработка, управляемая моделями и существует уже давно, особенно с платформами по управлению бизнес-процессами [10].

Вот некоторые из наиболее важных проблем для low-code и no-code:

1. Изменение культуры организации: платформы low-code и no-code требуют изменения культуры организации, будь то крупное предприятие или стартап, а это требует видения и одобрения со стороны руководства [11].
2. Изучение платформ требует времени и усилий: no-code и low-code повышают скорость и производительность, но это нелегко. Эти платформы не являются тривиальными, и развитие определенного уровня знаний требует времени. Сложные конструкции программирования, такие как вложенные циклы, не являются простыми на любой платформе [11].
3. Ресурсы и поддержка сообщества ограничены: многие платформы являются относительно незрелыми. Существуют миллионы разработчиков – иногда десятки миллионов – для обычных языков программирования. Многие курсы, книги и материалы легко доступны для таких языков, как Java или C#. Совершенно другой сценарий для платформ low-code и no-code – особенно для более поздних платформ [11].
4. Ценообразование может сбивать с толку: корпоративные платформы low-code и no-code, как правило, неоправданно дороги. Платформы среднего и малого рынка менее затратные, но, как правило, менее масштабируемые. Привлечение нескольких платформ для комплексного решения еще больше усложняет вопросы ценообразования [11].

### Заключение

Маловероятно, что low-code и no-code заменят традиционную разработку приложений, но то, как эти инструменты снижают барьеры для входа, играет важную роль, в первую очередь, делая процесс проще и доступнее для нетехнических людей. Разработчики всегда будут востребованы, но с платформами low-code и no-code любой, у кого есть хорошая идея, сможет выполнить ее самостоятельно. Эти платформы изменят разработку приложений в более широкой схеме, позволив процессу работать более эффективно. Разработчики будут сосредоточены на более сложных аспектах написания кода, поскольку платформы low-code и no-code уже могут помочь разобраться в основах процесса.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Рыков И. А. Что такое low-code/no-code платформа и CRM, CRM+, ERP [Электронный ресурс] / И. А. Рыков // Хабр. – 2019. – URL: <https://habr.com/ru/post/456710/> (дата обращения: 24.04.2021).
2. Иванов С. Что такое no-code и как он устроен [Электронный ресурс] / С. Иванов // Хекслет. – 2020. – URL: <https://ru.hexlet.io/blog/posts/что-такое-no-code-i-kak-on-ustroen> (дата обращения: 24.04.2021).
3. Белайчук А. Все, что нужно знать о BPMS и цифровизации сегодня [Электронный ресурс] / А. Белайчук // Comindware. – 2020. – URL: <https://clck.ru/VPqRC> (дата обращения: 24.04.2021).
4. Стельмах С. Как подходы Low-code и No-code вписываются в стратегию DevOps [Электронный ресурс] / С. Стельмах // itweek. – 2019. – URL: <https://www.itweek.ru/management/article/detail.php?ID=205698> (дата обращения: 24.04.2021).
5. Онищенко Г. Самая большая подборка сервисов и инструментов zero-code и low-code [Электронный ресурс] / Г. Онищенко // Rusbase. – 2020. – URL: <https://rb.ru/opinion/zero-and-low-code-podborka/> (дата обращения: 24.04.2021).
6. Глащенко А. Low-code платформы: панацея или рискованная ставка? [Электронный ресурс] / А. Глащенко // Cuba.platform. – 2019. – URL: <https://www.cuba-platform.ru/blog/low-code-platforms-a-dangerous-bet/> (дата обращения: 24.04.2021).
7. Ходырев А. Как решить задачу внутренней автоматизации на low-code платформе [Электронный ресурс] / А. Ходырев // Elma 365. – 2020. – URL: <https://elma365.com/ru/webinars/kak-reshit-zadachy-vnutrennei-avtomatizacii-na-low-code-platforme/> (дата обращения: 24.04.2021).
8. Гутрова О. Нехватку программистов закроют low-code платформы? [Электронный ресурс] / О. Гутрова // CNews Клуб. – 2021. – URL: [https://club.cnews.ru/blogs/entry/nehvatku\\_programmistov\\_zakroyut\\_lowcode\\_platforny\\_](https://club.cnews.ru/blogs/entry/nehvatku_programmistov_zakroyut_lowcode_platforny_) (дата обращения: 24.04.2021).
9. Лаврова И. No-code как отличная альтернатива для быстрого решения бизнес-задач [Электронный ресурс] / И. Лаврова // vc.ru. – 2020. – URL: <https://vc.ru/dev/122820-no-code-kak-otlichnaya-alternativa-dlya-bystrago-resheniya-biznes-zadach> (дата обращения: 24.04.2021).
10. Браун А. Citizen developers: новая эпоха или хорошо забытое старое [Электронный ресурс] / А. Браун // i-Sys Labs. – 2020. – URL: <https://www.i-sys.ru/blog/citizen-developers/> (дата обращения: 24.04.2021).
11. Катков Д. Как технологии No Code и Zero Coding упрощают и удешевляют проверку бизнес-гипотез [Электронный ресурс] / Д. Катков // DK. – 2020. – URL: <https://deniskatkov.ru/kak-tehnologii-no-code-i-zero-coding-uproshhayut-i-udeshevlyayut-proverku-biznes-gipotez/> (дата обращения: 24.04.2021).

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Rykov I. A. Chto takoye low-code/no-code platforma i CRM, CRM+, ERP [What is a low-code / no-code platform and CRM, CRM +, ERP] [Electronic resource] / I. A. Rykov // Khabr. – 2019. – URL: <https://habr.com/ru/post/456710/> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
2. Ivanov S. Chto takoye no-code i kak on ustroyen [What is no-code and how it works] [Electronic resource] / S. Ivanov // Khekslet. – 2020. – URL: <https://ru.hexlet.io/blog/posts/что-такое-no-code-i-kak-on-ustroen> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
3. Belaychuk A. Vse, chto nuzhno znat' o BPMS i tsifrovizatsii segodnya [Everything you need to know about BPMS and digitalization today] [Electronic resource] / A. Belaychuk // Comindware. – 2020. – URL: <https://clck.ru/VPqRC> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]

4. Stel'makh S. Kak podkhody Low-code i No-code vpisyvayutsya v strategiyu DevOps [How Low-code and No-code approaches fit into the DevOps strategy] [Electronic resource] / S. Stel'makh // itweek. – 2019. – URL: <https://www.itweek.ru/management/article/detail.php?ID=205698> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
5. Onishchenko G. Samaya bol'shaya podborka servisov i instrumentov zero-code i low-code [The largest selection of zero-code and low-code services and tools] [Electronic resource] / G. Onishchenko // Rusbase. – 2020. – URL: <https://rb.ru/opinion/zero-and-low-code-podborka/> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
6. Glashchenko A. Low-code platformy: panatseya ili riskovannaya stavka? [Low-code platforms: a panacea or a risky bet?] [Electronic resource] / A. Glashchenko // Cuba.platform. – 2019. – URL: <https://www.cuba-platform.ru/blog/low-code-platforms-a-dangerous-bet/> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
7. Khodyrev A. Kak reshit' zadachu vnutrenney avtomatizatsii na low-code platforme [How to solve the problem of internal automation on a low-code platform] [Electronic resource] / A. Khodyrev // Elma 365. – 2020. – URL: <https://elma365.com/ru/webinars/kak-reshit-zadachy-vnutrennei-avtomatizacii-na-low-code-platforme/> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
8. Gutrova O. Nekhvatku programmistov zakroyut low-code platformy? [Low-code platforms will close the lack of programmers?] [Electronic resource] / O. Gutrova // CNews Klub. – 2021. – URL: <https://clck.ru/VPqXN> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
9. Lavrova I. No-code kak otlichnaya al'ternativa dlya bystrogo resheniya biznes-zadach [No-code as an excellent alternative for a quick solution of business problems] [Electronic resource] / I. Lavrova // vc.ru. – 2020. – URL: <https://vc.ru/dev/122820-no-code-kak-otlichnaya-al'ternativa-dlya-bystrogo-resheniya-biznes-zadach> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
10. Braun A. Citizen developers: novaya epokha ili khorosho zabytoye staroye [Citizen developers: a new era or well forgotten old] [Electronic resource] / A. Braun // i-Sys Labs. – 2020. – URL: <https://www.i-sys.ru/blog/citizen-developers/> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]
11. Katkov D. Kak tekhnologii No Code i Zero Coding uproshchayut i udeshevlyayut proverku biznes-gipotez [How No Code and Zero Coding technologies simplify and reduce the cost of testing business hypotheses] [Electronic resource] / D. Katkov // DK. – 2020. – URL: <https://deniskatkov.ru/kak-tehnologii-no-code-i-zero-coding-uproshhayut-i-udeshevlyayut-proverku-biznes-gipotez/> (accessed: 24.04.2021). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.017>**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА**

Научная статья

**Медведев П.В.<sup>1</sup>, Федотов В.А.<sup>2,\*</sup>, Соловых С.Ю.<sup>3</sup>, Лукьянова Е.С.<sup>4</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3692-9722;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

\* Корреспондирующий автор (vital\_asm[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье представлены основы функционирования информационно-измерительных систем для оптимизации процесса переработки зерна пшеницы. На качество продуктов переработки зерна оказывают влияние как погодные климатические факторы, так и технологии помола. Современное развитие техники в сфере информационных технологий позволяют модернизировать существующие информационно-измерительные системы переработки зерна и выработать новые за счет разработки алгоритмов анализа физических характеристик зерновой массы. Для исследований проводили пробные помолы зерна пшеницы разных сортов на лабораторной мельнице. Для повышения выхода готового продукта используется цифровизация подбора оптимальных режимов сепарации зерна. Полученные математические модели дали возможность спрогнозировать качество разделения зерновых в сепараторах самых различных типов. Перспективным является повышение информативности гранулометрического анализа за счет использования современных интеллектуальных (информационно-измерительных) систем. Для классификации пшеницы по мукомольным свойствам предложено пользоваться показателем твердозерности зерна. В исследованиях пользовались компьютерным зрением и искусственными нейронными сетями для нахождения и систематизации частиц помола зерна по геометрическим свойствам. Учитывались характеристики контуров изображений частиц помола. При сравнении получаемых разработанной информационно-измерительной системой значений с гостовскими методами определена погрешность описываемой системы, для оценки твердозерности она составляет не более 3,5 %.

**Ключевые слова:** твердозерность, зерно пшеницы, вальцовые установки, размол зерна.

**ON THE DEVELOPMENT OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS FOR GRAIN PROCESSING**

Research article

**Medvedev P.V.<sup>1</sup>, Fedotov V.A.<sup>2,\*</sup>, Solovykh S.Yu.<sup>3</sup>, Lukyanova E.S.<sup>4</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3692-9722;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Orenburg State University, Orenburg, Russia

\* Corresponding author (vital\_asm[at]mail.ru)

**Abstract**

The article presents the basics of the functioning of information and measurement systems for optimizing wheat grain processing. The quality of grain processing products is influenced by both weather and climatic factors, as well as grinding technologies. The modern development of technology in the field of information technology allows for modernizing the existing information and measurement systems of grain processing and create new ones by developing algorithms for analyzing the physical characteristics of the grain mass. For research purposes, trial grinding of wheat grains of different varieties was carried out in a laboratory mill. To increase the yield of the finished product, the research uses the digitalization of the selection of optimal grain separation modes. The obtained mathematical models made it possible to predict the quality of grain separation in separators of various types. The promising method of increasing the informativeness of granulometric analysis proved to be the use of modern intelligent (information and measurement) systems. For the classification of wheat by milling properties, it is proposed to use the indicator of grain hardness. The researchers used computer vision and artificial neural networks to find and systematize grain grinding particles by their geometric properties taking into account the characteristics of the contours of the images of the grinding particles. When comparing the values obtained by the developed information and measurement system with the GOST methods, the study defines the error of the described system, which, for the evaluation of grain hardness, is not higher than 3.5 %.

**Keywords:** hard grain, wheat grain, roller plants, grain grinding.

**Введение**

Поскольку более 40 % пшеницы твердых яровых сортов возделывается в Оренбургской области, в 2020 году правительством Российской Федерации было решено провести эксперимент на ее территории, расширив сельхоз площади этого зерна для нужд пищевой промышленности – до 400 тыс. га [1]. Твердые сорта пшеницы предпочтительно выращивать в условиях жаркого климата, в то же время такая пшеница более чувствительна к засухам. Из всех районов Оренбургской области таким условиям наиболее полно удовлетворяет Восточная зона [2]. Урожайность твердой пшеницы Оренбургской области в 2020 году составила 268,5 тыс. тонн, что составило 10,5 ц/га [3]. Помимо погодных климатических факторов производство больших объемов зерна пшеницы сопряжено с возникающими трудностями при ее переработке [4].

Один из путей повышения выхода готового продукта – компьютеризация выбора оптимальных режимов работы сепараторов зерна. Поэтому очень важно разработать модели процессов сепарации, которые могли бы повысить эффективность производства [5]. Структурно-функционально-энергетический анализ сепараторов различных видов позволил установить, что каждый из них может рассматриваться как одна из разновидностей технических систем массового обслуживания. В системах такого рода протекают случайные процессы. Отсюда и возникла необходимость проанализировать характер случайностей (неопределенностей) процессов сепарации [6]. Перспективно использование

в технологии помола пшениц, особенно твердых сортов, информационно-измерительных систем, позволяющих повысить качество продуктов переработки зерна и на ранних стадиях прогнозировать качество.

### Материалы и методы исследования

Изучению подвергалось зерно пшеницы 14 сортов Оренбургской области. С целью получения образцов размола зерна были проведен пробные помолы зерна на лабораторной мельнице. Размалывалось по 10 кг зерна каждого образца. Помол произведен при пяти драных системах с отбором верхних сходов [7]. Фрактографический анализ производили на лабораторной установке из цифровой камеры Sony IMX, мини-компьютера Raspberry Pi 4, которым осуществлялась обработка изображений. Анализ изображений производился разработанным программным обеспечением на основе библиотеки алгоритмов технического зрения OpenCV под управлением операционной системы Arch Linux, DeepLearning4j - одним из свободных комплектов для обучения глубоких нейронных сетей [8], [9].

### Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов выяснилось, что результат разделения зерновых смесей во многих известных сепараторах определяется случайностями двух видов. Одна из них обусловлена взаимодействиями частиц при высоких концентрациях на сепарирующем органе. В этом случае одни частицы мешают другим беспрепятственно пройти разделение (например, в отверстиях решета). Другая составляющая неопределенности проявляется при отсутствии массовой составляющей, когда сепарируются одиночные частицы при сверхнизкой концентрации зернового потока. В этом случае также результат разделения заранее неизвестен, так как положение вытянутой зерновки в сепарирующем элементе случайно (например, в отверстии решета). Между этими составляющими случайностей существует глубокая взаимосвязь. Она проявляется при постепенном повышении производительности сепарации от сверхнизких значений до реальных, когда результат сепарации вначале зависит только от одной индивидуальной составляющей при постепенном возрастании. В существующих подходах к моделированию процессов сепарации рассматривается или только индивидуальная составляющая (классические модели движения одиночных зерновок через рабочие органы), или только массовая (кинетические модели процессов сепарации). Из этого следует, что модели первого вида при реальных производительностях завышают результат сепарации (не учитывается влияние массовой составляющей), а модели второго вида - занижают (не учитывается влияние индивидуальной составляющей) [10].

Для повышения точности прогнозирования результатов сепарации предлагается моделировать изучаемые процессы при помощи аппарата теории массового обслуживания. Исследование показали, что результат сепарации естественным образом зависит от индивидуальной и массовой составляющих случайности процесса сепарации. При этом оно предсказывает существование двух групп сепараторов, одна из которых допускает возможность разделения по одной частице, другая - не допускает. К первой группе относятся большинство известных типов сепараторов, а ко второй - только дисковый триер и решетные модули высокой интенсивности, которые отличаются несколько большими размерами отверстий решет, чем сепарируемые частицы. Полученные математические модели дают возможность спрогнозировать качество разделения зерновых в сепараторах самых различных типов, и в частности первой группы. Для этого требуется создать методику и найти алгоритм расчета его составляющих.

Для такого расчета необходимо исследовать такое состояние в модели сепарирующей системы массового обслуживания, когда производительность стремится к нулю. Физически это случай сепарации на одиночных частицах, и поэтому он требует использования классических моделей известных сепараторов, т. е. таких моделей, которые не что иное, как известные уравнения динамики. Традиционно их считают детерминированными. Однако эти уравнения не являются ни детерминированными, ни стохастическими. Действительно, если зафиксировать эти параметры, то частицы получают одну единственную траекторию; а если в широких пределах варьировать начальными условиями и физическими свойствами зерновых компонентов смесей, и режимами работы, то получим большое разнообразие траекторий зерновых частиц, причем попавших в разные фракции сепаратора. Это разнообразие можно рассматривать как многочисленные реализации стохастического процесса и подтверждение того, что классические модели - вырожденные состояния случайного процесса, протекающего в сепарирующих системах массового обслуживания.

Цифровизации в зерноперерабатывающей промышленности включают в себя методы оценки качества зерна по различным физико-химическим показателям. Перспективным является повышение информативности гранулометрического анализа за счет интеллектуальных (информационно-измерительных) систем. В практике мукомольной промышленности для классификации зерна часто пользуются показателем стекловидности, однако данный показатель не в полной мере характеризует мукомольные достоинства у пшениц разных сортов. Ввиду чего для количественной оценки прочностных свойств зерна предлагается пользоваться показателем твердозерности. Прямые методы определения этого показателя твердомерами трудоемки и потому практически не нашли применения в широкой практике.

В исследованиях пользовались компьютерным зрением и искусственными нейронными сетями для нахождения и классификации частиц помола зерна по геометрическим свойствам. Методика прогнозирования прочностных свойств зерна по показателю твердости основывается на анализе характеристик контуров изображений частиц помола (патенты РФ № 2433398, № 2442132, № 2433398). Алгоритм анализа включает в себя следующие действия: из центров тяжести фигур выделяют отрезки к периметру фигуры, вычисляют средневзвешенное значение их длин (X, в микрометрах) и коэффициент вариации (Y, безразмерная величина). Совместный учет показателей позволяет прогнозировать некоторые технологические характеристики качества зерна. Анализ образцов 14 сортов пшеницы Оренбургской области обнаружил значимые связи с показателем твердозерности (Z, в кг/мм<sup>2</sup>) зерна.

Установлена зависимость вида

$$Z = 0,16 \cdot X + 0,27 \cdot Y + 0,88 \quad (1)$$

При сравнении получаемых в модели значений с гостовскими методами была определена погрешность описываемого метода для оценки твердозерности не более 3,5 %. Альтернативная методика прогнозирования прочностных свойств зерна использует классификацию частиц помола искусственными нейронными сетями по признаку схожести с геометрическими фигурами: круг, квадрат, треугольник и пр. (свидетельство о гос.рег. прогр. № 2011610605).

### Заключение

На основе таких моделей разработано программное обеспечение информационно-измерительной системы технологической линии очистки зерна. С его помощью удалось улучшить прогностическую способность качества разделения смесей в линиях очистки зерна и оптимизировать очистку партии зерна в заданных режимах работы конкретного сепаратора. Выведены закономерности формирования прочностных свойств зерна пшеницы на основе анализа продуктов помола зерна. Предложена методика прогнозирования показателя твердости зерна за счет использования современных средств информатизации зерноперерабатывающей отрасли хозяйства.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Медведев, П. В. Комплексная оценка потребительских свойств зерна и продуктов его переработки / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 7-1 (38). - С. 77-80.
2. Беркутова, Н. С. Микроструктура пшеницы / Н. С. Беркутова, И. А. Швецова. - М.: Колос, 1977. - 122 с.
3. Shewry P.R. Wheat / P.R. Shewry // J. Exp. Bot., 60 (2009).
4. Bradsky G. Learning OpenCV / G. Bradsky, A. Kaehler. 2008.
5. Федотов В. А. Информационно-измерительная система определения потребительских свойств пшеницы / В. А. Федотов, П. В. Медведев // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2013. - № 3. - С. 140-145.
6. Нечаев А. П. Пищевая химия / А. П. Нечаев, С. Е. Траубенберг, А. А. Кочеткова и др. ; Под ред. А. П. Нечаева. - СПб.: ГИОРД, 2001. - 592 с.
7. Тарасенко, Ф. П. Прикладной системный анализ (наука и искусство решения проблем): Учебник / Ф. П. Тарасенко. - Томск; Издательство Томского университета, 2004. - 128 с.
8. Медведев, П. В. Информационно-измерительные системы управления потребительскими свойствами зернопродуктов / П. В. Медведев, В. А. Федотов // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд : монография. - Оренбург: ООО «Агентство «Пресса», 2013. - С. 35-51.
9. Шепелев, А. Ф. Товароведение и экспертиза электротоваров: учебное пособие для вузов / А. Ф. Шепелев, И. А. Печенежская. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. - 192 с.
10. Manley M. Agric / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. // Food Chem, 57 (2009).

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Medvedev, P. V. Kompleksnaya ocenka potrebitel'skikh svoi'stv zerna i produktov ego pererabotki [Comprehensive assessment of consumer properties of grain and its processed products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Mezhdunarodny`i` nauchno-issledovatel'skii` zhurnal [International Research Journal]. - 2015. - № 7-1 (38). - P. 77-80. [in Russian]
2. Berkutova, N. S. Mikrostruktura pshenitsy` [Microstructure of wheat] / N. S. Berkutova, I. A. Shvetcova. - M.: Kolos, 1977. - 122 p. [in Russian]
3. Shewry P.R. Wheat / P.R. Shewry // J. Exp. Bot., 60 (2009).
4. Bradsky G. Learning OpenCV / G. Bradsky, A. Kaehler. 2008.
5. Fedotov V. A. Informatsionno-izmeritel`naia sistema opredeleniia potrebitel'skikh svoi'stv pshenitsy` [Information and measurement system for determining the consumer properties of wheat] / V. A. Fedotov, P. V. Medvedev // Vestneyk Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. - 2013. - № 3. - P. 140-145. [in Russian]
6. Nechaev A. P. Pishchevaia himiia [Food chemistry] / A. P. Nechaev, S. E. Traubenberg, A. A. Kochetkova et al. ; ed. A. P. Nechaeva. - SPb.: GIORД, 2001. - 592 p. [in Russian]
7. Tarasenko, F. P. Prikladnoi` sistemny`i` analiz (nauka i iskusstvo resheniia problem): Uchebnik [Applied System Analysis (the science and art of Problem solving): Textbook] / F. P. Tarasenko. - Tomsk; Tomsk university Publishing house, 2004. - 128 p. [in Russian]
8. Medvedev, P. V. Informatsionno-izmeritel`ny`e sistemy` upravleniia potrebitel'skimi svoi'stvami zernomuchny`kh tovarov [Information and measurement systems for managing consumer properties of grain products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov // Sovremennye tendentsii v` ekonomike i upravlenii: novy`i` vzgliad : monografiia [Modern trends in economics and management: a new look: monograph]. - Orenburg: ООО «Агентство «Пресса», 2013. - P. 35-51. [in Russian]
9. Shepelev, A. F. Tovarovedenie i e`kspertiza e`lektrotovarov: uchebnoe posobie dlia vuzov [Commodity science and expertise of electrical goods: a textbook for universities] / A. F. Shepelev, I. A. Pechenezhskaia. - Rostov-na-Donu: Feniks, 2002. - 192 p. [in Russian]
10. Manley M. Agric / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. // Food Chem, 57 (2009).

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.018>**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА  
В НЕЧЕТКИХ СИСТЕМАХ**

Научная статья

**Леденева Т.М.<sup>1</sup>, Решетников А.Д.<sup>2,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3944-2266;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8217-3815;<sup>1,2</sup> Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

\* Корреспондирующий автор (reshetnikov.alex93[at]gmail.com)

**Аннотация**

Нечеткие системы используются для моделирования, анализа данных, прогнозирования, принятия решений, управления в различных предметных областях, в том числе, связанных с техническими приложениями. По сути, нечеткая система является универсальным аппроксиматором, причем известно, что любую сложную систему можно аппроксимировать нечеткой системой с любой заданной точностью, если подходящим образом подобрать функциональное представление нечетких логических связей, которые участвуют в модели. На данный момент сформировался ряд стандартных подходов, но на фоне развития разделов теории нечетких множеств и нечеткой логики, которые связаны с функциональным представлением нечетких операций (различные семейства треугольных норм и конорм и порожденные ими импликации, функции агрегирования, нечеткие гибридные операции), возникает проблема применимости существующих теоретических результатов к усовершенствованию методологической основы проектирования нечетких систем. В статье рассматривается схема нечеткого логического вывода, приводятся результаты экспериментального исследования и рекомендации по выбору функционального представления компонент. Научная значимость полученных результатов заключается в том, что представленные способы формирования механизма нечеткого логического вывода позволяют улучшить аппроксимирующие свойства нечетких систем.

**Ключевые слова:** нечеткая система, нечеткий логический вывод, треугольные нормы и конормы.**ASPECTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE FUZZY INFERENCE MECHANISM IN FUZZY SYSTEMS**

Research article

**Ledeneva T.M.<sup>1</sup>, Reshetnikov A.D.<sup>2,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3944-2266;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8217-3815;<sup>1,2</sup> Voronezh State University, Voronezh, Russia

\* Corresponding author (reshetnikov.alex93[at]gmail.com)

**Abstract**

Fuzzy systems are used for modeling, data analysis, forecasting, decision-making, and management in various subject areas, including those related to technical applications. A fuzzy system is a universal approximator, and it is known that any complex system can be approximated by a fuzzy system with any given accuracy if the functional representation of the fuzzy logic connectives that participate in the model is selected in a suitable way. At the moment, a number of standard approaches have been formed; however, against the background of the development of the sections of the theory of fuzzy sets and fuzzy logic, which are related to the functional representation of fuzzy operations (various families of triangular norms and conorms and the implications generated by them, aggregation functions, fuzzy hybrid operations), there arises the problem of the applicability of existing theoretical results to the improvement of the methodological basis for the design of fuzzy systems. The article examines the scheme of fuzzy logical inference, presents the results of an experimental study, and provides recommendations for choosing the functional representation of components. The scientific significance of the obtained results lies in the fact that the presented methods of creating a fuzzy inference mechanism will improve the approximating properties of fuzzy systems.

**Keywords:** fuzzy system, fuzzy inference, triangular norms and conorms.**Введение**

К настоящему времени нечеткие системы заняли устойчивую позицию среди информационных технологий, которые принято считать интеллектуальными. Ядром нечеткой системы является база знаний, причем для представления знаний используется продукционная модель, поэтому под нечеткими системами подразумеваются, прежде всего, *нечеткие продукционные системы*. Нечеткая продукционная система имеет структуру, представленную на рис. 1.

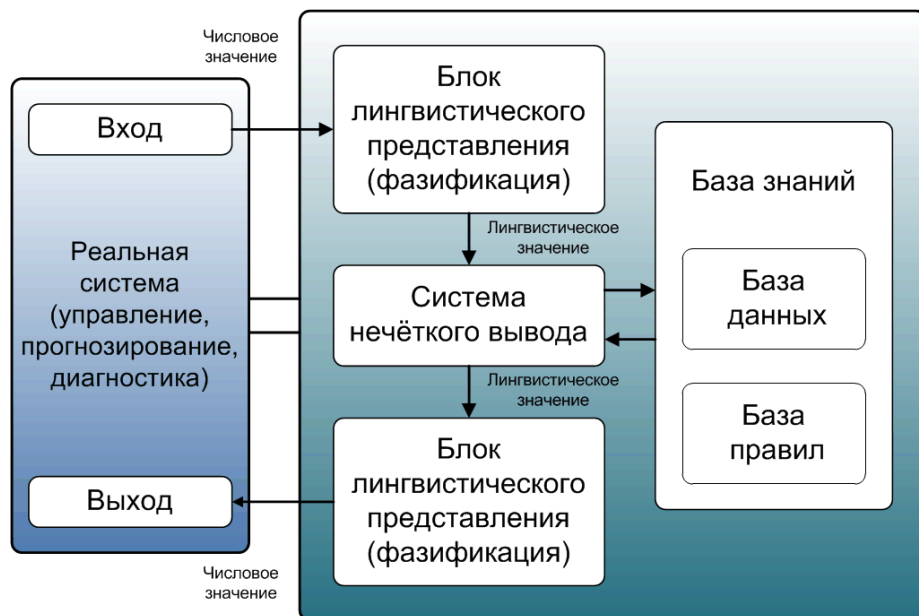


Рис. 1 – Структура нечеткой системы

Наиболее распространенные подходы к проектированию нечетких систем основаны на моделях Мамдани, Такаги-Сугено, Ларсена, Цукамото. Первые две модели реализованы в Fuzzy Logic Tool Box MATLAB, также нечеткие системы можно разрабатывать в FuzzyTech и FuzzyClips.

Проблема повышения качества аппроксимации для нечетких систем рассматривалась многими исследователями. Поскольку база знаний и, в частности, база правил являются ядром всякой нечеткой системы, отвечая за конкретное приложение, то обеспечение их качества является одним из направлений совершенствования нечетких систем [1], [2], [3]. Качество базы правил обеспечивается как на уровне формирования лингвистических шкал, так и относительно самой базы правил, ее наполнения и структуры. В [4] сформирован перечень требований к лингвистической шкале, которые повышают качество нечетких моделей: оптимальный уровень гранулированности, различимость термов, полнота, комплементарность и др. Широкое использование получают автоматизированные процедуры настройки лингвистических шкал на основе процедур кластеризации, в основе которых лежит задача минимизации отклонений тестовых данных от модельных значений, формируемых нечеткой системой. Для решения данной задачи используются генетические и другие эвристические алгоритмы [5]. В [6] предложены варианты правил, учитывающие форму кластеров. В [3], [7], [8] отмечается, что наибольшее влияние на качество аппроксимации, помимо качества базы правил, оказывает представление нечетких логических операций в системе логического вывода и выбор метода дефазификации.

Пусть  $x$  – входная переменная со значениями во множестве  $X$ ,  $y$  – выходная переменная со значениями во множестве  $Y$ , причем для каждой из переменных также построены лингвистические шкалы, включающие множество термов  $S_x$  и  $S_y$  соответственно. Функционирование нечеткой системы осуществляется следующим образом:

1. На вход системы поступает числовое значение  $x' \in X$  наблюдаемой переменной  $x$ , которое в блоке фазификации преобразуется в нечеткое множество, используемое в дальнейшем наряду с базой правил системой нечеткого логического вывода.

2. В системе логического вывода на основе композиционного правила вывода и базы правил формируется нечеткое множество, соответствующее выходной переменной  $y$ .

В блоке дефазификации осуществляется переход от выходного нечеткого множества к числовому значению, которое соответствует выходной переменной  $y' \in Y$ . Наиболее часто в приложениях используются следующие методы дефазификации: *метод центра тяжести, метод центра площади, метод левого (правого) модального значения*.

Цель статьи заключается в экспериментальном исследовании влияния функционального представления нечетких логических связей в механизме нечеткого логического вывода на уровень аппроксимирующих свойств нечетких систем.

В разделе 1 дается представление о механизме нечеткого логического вывода, функционирование которого определяется способом задания операций композиции и импликации, схем и функций агрегирования. Вариант реализации механизма логического вывода представлен кортежем. Раздел 2 посвящен функциональному представлению нечетких логических связей в механизме логического вывода. К основным операциям относятся треугольные нормы и конормы, которые моделируют связи *и* и *или* в нечетких моделях. Перечислены основные классы этих операций, а также новое семейство (10). На основе данных операций формируются импликация и операции композиции. В данном разделе рассматриваются все известные на данный момент классы импликаций. Известно, что выбор импликации оказывает существенное влияние на качество аппроксимации, и этот факт установлен в предыдущих исследованиях авторов [3], [7]. Формирование значения выходной переменной осуществляется с использованием функции агрегирования, соответствующей выбранной схеме агрегирования. Таким образом, в разделе 2 формируется информационная среда для построения множества алгоритмов (или механизмов) логического вывода. В разделе 3 осуществляется экспериментальное исследование различных алгоритмов вывода с целью исследования качества аппроксимации для тестовых баз правил. Качество аппроксимации оценивается среднеквадратической ошибкой отклонения. В данном разделе представлены некоторые результаты проведенного исследования.



## 1. Механизм нечеткого логического вывода

Основой механизма нечеткого логического вывода является схема правильных рассуждений *modus ponens* (рис. 2).

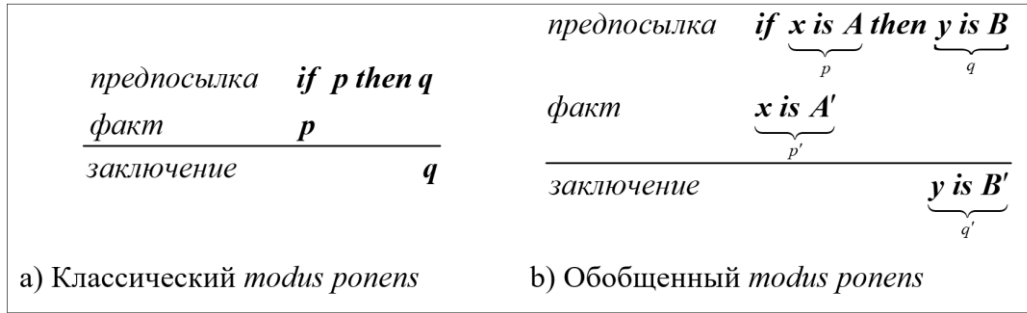


Рис. 2 – Схемы правильных рассуждений

Значение  $B'$  выходной переменной  $y$ , соответствующее значению  $A'$  входной переменной  $x$ , при наличии правила **если  $x$  есть  $A$ , то  $y$  есть  $B$** , определяется по формуле  $B' = A' \circ (A \rightarrow B)$  (здесь символом  $\circ$  обозначена операция композиции,  $\rightarrow$  – импликация), которая может быть записана в виде

$$B'(y) = \max_x T(A'(x), I(A(x), B(y))),$$

где  $\circ$  соответствует  $(\max - T)$ -композиции;  $T$  – треугольная норма;  $I$  – импликация, представляющая продукционное правило  $A \rightarrow B$ ;  $A(x), A'(x), B(y), B'(y)$  – функции принадлежности соответствующих нечетких множеств.

Поскольку операция композиции и импликация могут быть определены неоднозначно и должны быть определенным образом специфицированы, то выбор конкретных представлений определяет некоторый алгоритм, который реализует нечеткий логический вывод.

Совокупность правил  $R_i = A_i \rightarrow B_i$  образует базу правил  $R = \{R_i\}_{i=1, \dots, N}$ , поэтому при формировании выходного нечеткого множества  $B'$  важно определиться со схемами и операциями операции агрегирования. В [3] определены следующие основные схемы агрегирования:

- i)  $(\forall i = 1, \dots, N) (B'_i = A_i \circ R_i) \Rightarrow B' = \text{Agg}(B'_1, \dots, B'_N) \Rightarrow y' = \text{defuz}(B')$ ,
- ii)  $(\forall i = 1, \dots, N) (B'_i = A_i \circ R_i) \Rightarrow y'_i = \text{defuz}(B'_i) \Rightarrow y' = \text{Agg}(y'_1, \dots, y'_N)$ ,
- iii)  $R = \text{Agg}(R_1, \dots, R_N) \Rightarrow B' = A' \circ R \Rightarrow y' = \text{defuz}(B')$ .

Заметим, что в случае i) вывод осуществляется отдельно, для каждого правила формируется выходное нечеткое множество, а затем осуществляется их агрегирование на основе операций, предназначенных для нечетких множеств. В случае ii), в отличие от предыдущего, каждое выходное нечеткое множество подвергается дефазификации, а затем осуществляется агрегирование полученных числовых значений. Случай iii) предполагает, что на основе бинарных отношений, соответствующих нечетким продукционным правилам, вначале строится обобщенное бинарное отношение, а затем на его основе формируется выходное нечеткое множество. Таким образом, выбор схемы агрегирования обуславливает использование тех функций и операций агрегирования, которые работают с определенным типом математических структур.

Вариант реализации механизма логического вывода (*Fuzzy inference system*) представим кортежем  $FIS = \langle I, T, Sh, Agg \rangle$ , где  $I$  – нечеткая импликация;  $T$  – треугольная норма;  $Sh, Agg$  – соответственно схема и операция агрегирования.

В рамках проведенного экспериментального исследования рассматриваются варианты  $FIS$  с различными представлениями компонент, которые, по сути, определяют некоторый алгоритм функционирования нечеткой системы.

## 2. Функциональное представление нечетких логических связей

### 2.1 Треугольные нормы и конормы [9]

Треугольной нормой ( $t$ -нормой) называется монотонная, коммутативная и ассоциативная бинарная операция  $T: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ , такая что для любого  $x \in [0, 1]$  имеем  $T(1, x) = T(x, 1) = x$ .

Треугольной конормой ( $t$ -конормой) называется бинарная операция  $S: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ , такая, что для всех  $x, y, z \in [0, 1]$  выполняются свойства коммутативности, ассоциативности, монотонности, а также свойство  $S(x, 0) = x$  для любого  $x \in [0, 1]$ .

Системы  $\langle [0,1], T, \leq \rangle$  и  $\langle [0,1], S, \leq \rangle$  являются абелевыми полугруппами с нейтральным элементом 0 и 1 соответственно и отношением порядка  $\leq$ . Характеристическим свойством треугольных норм и конорм является возможность их представления с помощью аддитивных (а также мультипликативных) генераторов [10], [11], [12].

Для непрерывной треугольной нормы  $T$  можно рассматривать *остаточную треугольную норму*  $\hat{T}$ , определяемую следующим образом [9]:

$$\forall x, y \in [0,1] \left( \hat{T}(x, y) = \sup \{ \alpha \in [0,1] : T(\alpha, x) \leq y \} \right).$$

Операции  $T$  и  $S$  называются двойственными, если существует операция сильного отрицания  $n: [0,1] \rightarrow [0,1]$ , такая что  $n(T(x, y)) = S(n(x), n(y))$ .

Примеры двойственных треугольных норм и конорм, полученных разными исследователями, представлены в табл. 1. Классические операции  $T_M$  и  $S_M$  не удовлетворяют только законам комплементарности. Однако эти операции являются малочувствительными к исходной информации, что сказывается на качестве нечетких моделей. Для остальных пар нечетких операций, приведенных в таблице, не выполняются законы дистрибутивности и идемпотентности, что сокращает возможности равносильных преобразований. Формулы (10) являются обобщениями треугольных норм и конорм в классе рациональных функций при условии, что соответствующие аддитивные генераторы представлены дробно-линейной функцией [10]. Преимуществом операций (6)-(10) является наличие параметров. Их настройка на тестовых примерах позволяет обеспечить гибкость нечетких моделей и их адаптацию к конкретной задаче.

Таблица 1 – Основные классы треугольных норм и конорм

| №  | $T(x, y)$                                                                                                                                                     | $S(x, y)$                                                                                                  |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | $T_M(x, y) = \min(x, y)$                                                                                                                                      | $S_M(x, y) = \max(x, y)$                                                                                   |
| 2  | $T_P(x, y) = xy$                                                                                                                                              | $S_P(x, y) = x + y - xy$                                                                                   |
| 3  | $T_L(x, y) = \max(0, x + y - 1)$                                                                                                                              | $S_L(x, y) = \min(1, x + y)$                                                                               |
| 4  | $T_D(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } (x, y) \in [0,1]^2 \\ \min(x, y), & \text{иначе} \end{cases}$                                                    | $S_D(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x, y) \in [0,1]^2 \\ \max(x, y), & \text{иначе} \end{cases}$ |
| 5  | $T_0(x, y) = \frac{xy}{x + y - xy}$                                                                                                                           | $S_{-1}(x, y) = \frac{x + y - 2xy}{1 - xy}$                                                                |
| 6  | $T_\alpha(x, y) = \frac{xy}{\alpha + (1 - \alpha)(x + y - xy)}, \alpha > 0$                                                                                   | $S_\beta(x, y) = \frac{(\beta - 1)xy + x + y}{1 + \beta xy}, \beta > -1$                                   |
| 7  | $T_h(x, y) = \frac{xy}{h + (1 - h)(x + y - xy)}, h > 0$                                                                                                       | $S_h(x, y) = \frac{x + y + (h - 2)xy}{h + (h - 1)xy}, h > 0$                                               |
| 8  | $T_\lambda(x, y) = \max(0, x + y - 1 - \lambda(1 - x)(1 - y)), \lambda > -1$                                                                                  | $S_\lambda(x, y) = \min(1, x + y + \lambda xy), \lambda > -1$                                              |
| 9  | $T_w(x, y) = \max\left(0, \frac{x + y + wxy - 1}{1 + w}\right), w > -1$                                                                                       | $S_w(x, y) = \min\left(1, x + y - \frac{w}{1 - w}xy\right), w > -1$                                        |
| 10 | $T_\tau(x, y) = \max\left\{0, \frac{\tau^2(x + y - 1) + (1 + 2\tau)xy}{(\tau^2 + 2\tau) + (x + y - xy)}\right\}$<br>$\tau \in (-\infty, -2) \cup (0, \infty)$ | $S_\rho(x, y) = \min\left\{1, \frac{x + y + 2\rho xy}{1 - \rho^2 xy}\right\}$<br>$\rho \in (-1, 1]$        |

На рис. 3 представлены графики некоторых треугольных норм  $T_\tau$  и конорм  $S_\rho$ , позволяющие увидеть особенности их поверхностей.

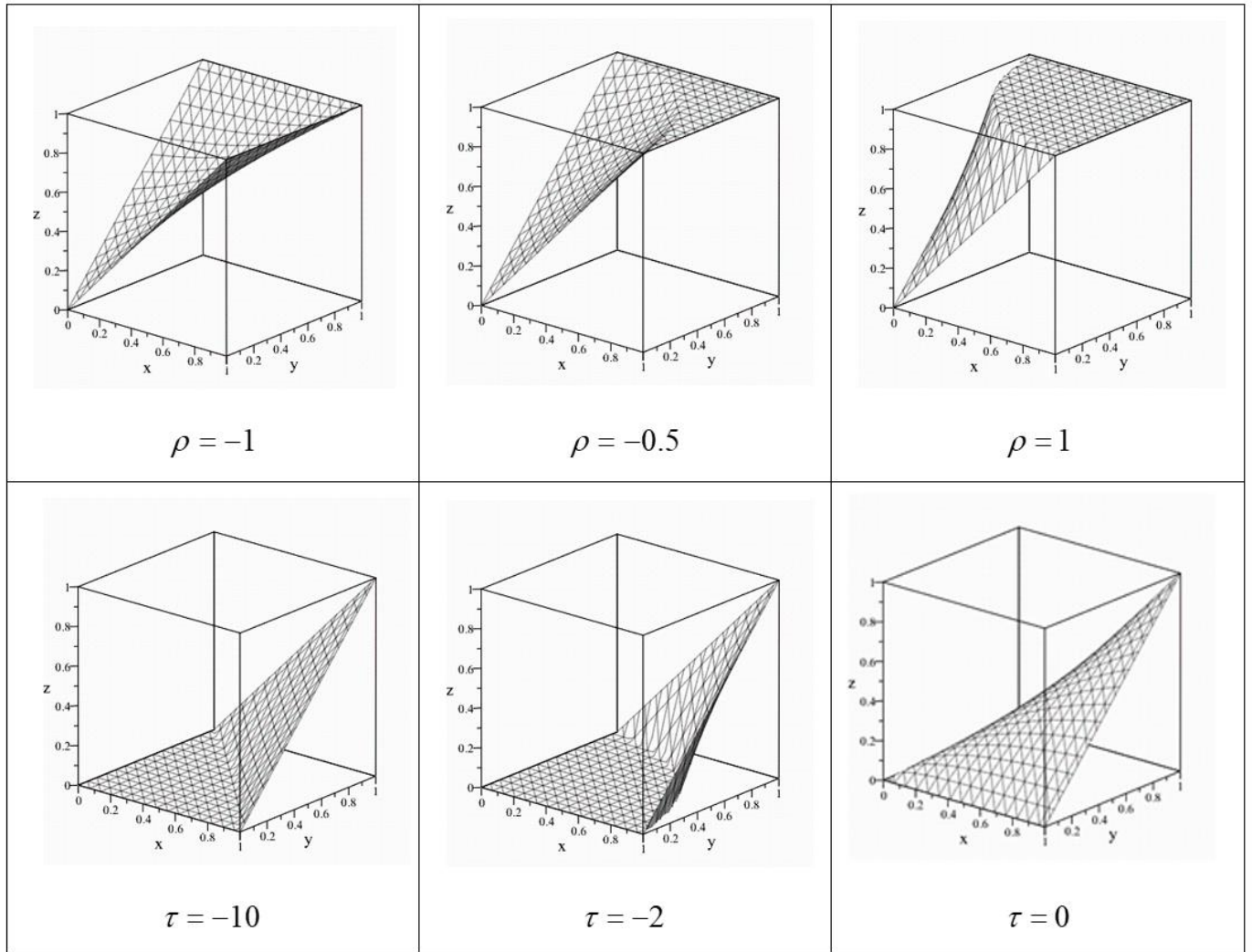


Рис. 3 – Графики треугольных норм и конорм (10)

В нечетких системах треугольная норма используется как функция агрегирования, формализующая связку  $и$ , а также для определения операции композиции. Пусть  $R_1 \in F(X \times Y)$ ,  $R_2 \in F(Y \times Z)$  – нечеткие бинарные отношения с функциями принадлежности  $\mu_{R_1}(x, y)$ ,  $\mu_{R_2}(y, z)$ . В общем виде операции композиции определяются с помощью треугольных норм и конорм следующим образом:

( $\max-T$ )-композиции с функциями принадлежности

$$\mu_{[\max-T](R_1, R_2)}(x, z) = \max_{y \in Y} T(\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z));$$

( $\min-S$ )-композиция с функцией принадлежности

$$\mu_{[\min-S](R_1, R_2)}(x, z) = \min_{y \in Y} S(\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z)).$$

В известных алгоритмах логического вывода используется максиминная композиция, что обусловлено наличием у нее некоторых замечательных свойств, среди которых отметим следующие: ассоциативность, дистрибутивность относительно  $\max$ -объединения (но не дистрибутивна относительно  $\min$ -пересечения); монотонность. Помимо максиминной композиции, используется (но крайне редко) максумультипликативная композиция с функцией принадлежности

$$\mu_{[\max-T_p](R_1, R_2)}(x, z) = \mu_{[\max-\bullet](R_1, R_2)}(x, z) = \max_{y \in Y} \{\mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(y, z)\}.$$

Для треугольных норм, также как и для конорм, можно построить ранжирование значений для фиксированных  $x$  и  $y$ . Это позволяет сравнивать выходные нечеткие множества, полученные с помощью различных композиций.

## 2.2 Нечеткая импликация

Нечеткая импликация играет важнейшую роль для формализации продукционных правил вида *если X, то Y* (*если-то-правил*). Самый простой способ порождения нечеткой импликации – обобщение булевой импликации, при этом в точках (0,0), (0,1), (1,0), (1,1) должно выполняться определение четкой импликации. Однако возможно использование и других булевых функций.

В [13] определены следующие классы нечетких импликаций:

1) Импликации, представимые треугольными нормами, среди которых наиболее известными являются импликации Mamdani

$$I_{Mamdani_1}(x, y) = \min\{x, y\}, \quad I_{Mamdani_2}(x, y) = x \cdot y.$$

2) Импликации, представимые остаточной треугольной нормой, примерами которых являются

$$\text{импликация Godel } I_{Godel}(x, y) = \begin{cases} 1, & x \leq y, \\ y, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\text{импликация Goguen } I_{Goguen}(x, y) = \begin{cases} \min\{1, y/x\}, & \text{если } x \neq 0, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

3) Импликации, полученные обобщением булевой импликации вида

$$I(x, y) = S(n(x), y),$$

где  $S$  – треугольная конорма. Для стандартного отрицания  $n(x) = 1 - x$  данная формула преобразуется в следующую

$$I(x, y) = S(1 - x, y).$$

Используя классическую дизъюнкцию  $S_m(x, y)$ , получим импликацию *Dienes* вида  $I_{Diene}(x, y) = \max\{1 - x, y\}$ . Треугольная конорма  $S_p(x, y)$  (табл. 1) позволяет получить импликацию *Mizumoto*  $I_{Mizumoto}(x, y) = 1 - x + xy$ . На основе треугольной конормы  $S_M(x, y)$  получается импликация *Lukasiewicz*  $I_{Lukasiewicz}(x, y) = \min\{1 - x + y, 1\}$ . Известно, что для пары двойственных операций  $T_0$  и  $S_{-1}$  помимо стандартного отрицания «действует» параметрическое отрицание вида  $n_t(x) = \frac{1-x}{1+(t-1)x}$ ,  $t > 0$ . На основе конормы  $S_{-1}$  и данного отрицания можно определить импликацию *Sugeno*

$$I_{Sugeno}(x, y) = S_{-1}\left(\frac{1-x}{1+(t-1)x}, y\right) = \frac{1-x-y+(t+1)xy}{1+(t-1)x-y+xy}.$$

4) Импликации, полученные на основе нечеткой эквиваленции, имеют представление

$$E(x, y) = T(I(x, y), I(y, x)),$$

где  $T$  – треугольная норма,  $I$  – импликация. Известными нечеткими эквиваленциями являются следующие:

$$E_{Gödel}(x, y) = \begin{cases} 1, & x = y \\ \min\{x, y\}, & \text{иначе} \end{cases}; \quad E_{Lukasiewicz}(x, y) = 1 - x - y + 2xy.$$

Используя определения треугольных норм и конорм из табл. 1 и соответствующих им операций отрицания, можно рассматривать и другие представления эквиваленций.

5) Импликации, полученные на основе функции расстояния, представляются в виде

$$I(x, y) = T(x, 1 - d(x, y)),$$

где  $d(x, y)$  – функция расстояния.

6) QM-импликации основаны на следующем представлении:

$$x \rightarrow y = \bar{x} \vee (x \wedge y),$$

тогда переходя к нечетким операциям, получим

$$I(x, y) = S(n(x), T(x, y)).$$

Для основных норм и соответствующих им конорм имеем QM-импликации следующего вида:

$$I_m(x, y) = \max\{1 - x, \min\{x, y\}\}; \quad I_p(x, y) = 1 - x(1 - xy);$$

$$I_L(x, y) = \min\{1 - x + \max\{x + y - 1, 0\}, 1\}.$$

Известно, что выбор импликации оказывает наибольшее влияние на качество аппроксимации для нечетких систем. В [13] определены некоторые условия, которые обуславливают «хорошее поведение» импликаций.

### 2.3 Операции агрегирования

Под функцией агрегирования будем понимать преобразование, которое векторной оценке ставит в соответствие скалярную величину, при этом различают конъюнктивную, дизъюнктивную и компромиссную стратегии агрегирования. Дизъюнктивная стратегия моделируется  $T$ -нормами, конъюнктивная –  $S$ -конормами. Основу компромиссной стратегии составляют операции осреднения [14]. Перспективный класс для моделирования нечетких систем образуют порядковые операторы агрегирования ( $OWA$ -оператор – Ordered Weighted Averaging Operator), поскольку с помощью весовых коэффициентов, ассоциированных с данными операторами, можно моделировать стратегии агрегирования, отношение к риску и энтропию, а также формировать принципы согласования решений (например, при агрегировании учитывать не все правила, а *большинство, почти все, как можно больше* и т.д. – такой принцип согласования решений называется *принципом нечеткого большинства*) [15].

В зависимости от схемы агрегирования сформулируем несколько вариантов реализации механизма нечеткого логического вывода для системы с  $n$  входными переменными и одной выходной переменной.

#### Алгоритм 1 вывода, основанный на агрегировании правил

Шаг 1. Составить функцию принадлежности  $\mu_{A'}(x_1, \dots, x_n)$  нечеткого множества  $A'$ , которое соответствует значению  $x'$  входной переменной  $X$ .

Шаг 2. Составить функцию принадлежности импликации  $\mu_{A_i \rightarrow B_i}(x_1, \dots, x_n, y) = \mu_{I(A_i, B_i)}(x_1, \dots, x_n, y)$ , которая соответствует правилу  $R_i$ .

Шаг 3. Составить функцию принадлежности нечеткого множества, описывающего комбинацию правил в виде

$$\mu_{Agg(R_1, \dots, R_m)}(x_1, \dots, x_n, y) = Agg(\mu_{R_1}(x_1, \dots, x_n, y), \dots, \mu_{R_m}(x_1, \dots, x_n, y)).$$

Шаг 4. Для заданного нечеткого множества  $\mu_{A'}(x_1, \dots, x_n)$  с учетом выбранной операции композиции вычислить выходное нечеткое множество  $\mu_{B'}(y) = \max T(\mu_{A'}(x_1, \dots, x_n), \mu_{R_i}(x_1, \dots, x_n, y))$ .

#### Алгоритм 2 вывода, основанный на агрегировании выходных нечетких множеств, соответствующих отдельным правилам

Шаги 1 и 2 реализуются так же, как в первом алгоритме.

Шаг 3. Для заданного нечеткого множества  $\mu_{A'}(x_1, \dots, x_n)$  с учетом выбранной операции композиции для каждого правила вычислить выходное нечеткое множество  $B'_i$  с функцией принадлежности

$$\mu_{B'_i}(y) = \max T(\mu_{A'}(x_1, \dots, x_n), \mu_{R_i}(x_1, \dots, x_n, y)).$$

Шаг 4. С учетом выбранной операции агрегирования вычислить выходное нечеткое множество  $B$  с функцией принадлежности

$$\mu_B(y) = Agg(\mu_{B'_1}(y), \dots, \mu_{B'_m}(y)).$$

#### Алгоритм 3 вывода, основанный на агрегировании значений выходной переменной, соответствующих отдельным правилам

Шаги 1 и 2 реализуются так же, как в первом алгоритме.

Шаг 3 реализуется так же, как во втором алгоритме.

Шаг 4. К каждому нечеткому множеству  $B'_i$  применить выбранный метод деаггрегации и получить соответствующее значение  $y'_i$ .

Шаг 5. Вычислить  $y' = Agg(y'_1, \dots, y'_n)$  с использованием операций агрегирования из класса средних.

Заметим, что в каждом из алгоритмов используется свой класс операций агрегирования.

### 3. Экспериментальные исследования различных реализаций механизма нечеткого логического вывода

Существующее многообразие представлений нечетких логических операций обуславливает необходимость их обоснованного выбора при проектировании нечетких систем. В наиболее известном методе логического вывода, который, например, имеется в MatLab выходное нечеткое множество определяется формулой (вывод Мамдани)

$$\mu_{B'}(y) = \max_{x \in X} \min(\mu_{A'}(x), \min(\mu_A(x), \mu_B(y)))$$

Однако эксперименты показывают, что формула может быть улучшена. На рис. 4 представлен график зависимости средней ошибки аппроксимации при различных реализациях системы нечеткого логического вывода на тестовых базах правил. Всего было сгенерировано 1024 метода логического вывода, в которых наряду с определением *FIS* также исследовались различные методы дефазификации. Зеленым и синим цветом отмечены позиции метода Мамдани, но с различными методами дефазификации. Видно, что за счет выбора подходящих компонент системы нечеткого логического вывода можно обеспечить высокий уровень качества аппроксимации, что подтверждает истинность теоремы об аппроксимации для нечетких систем [8].

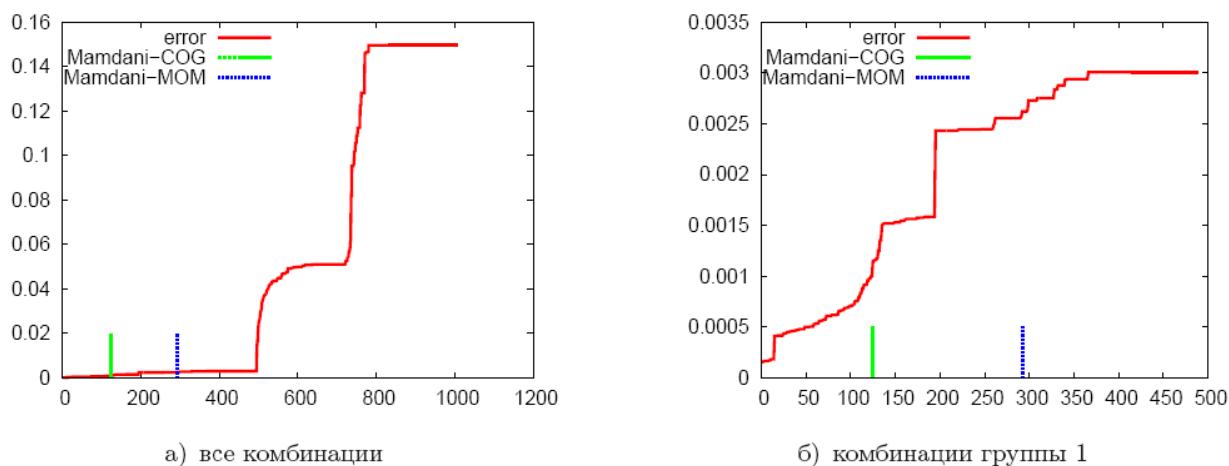
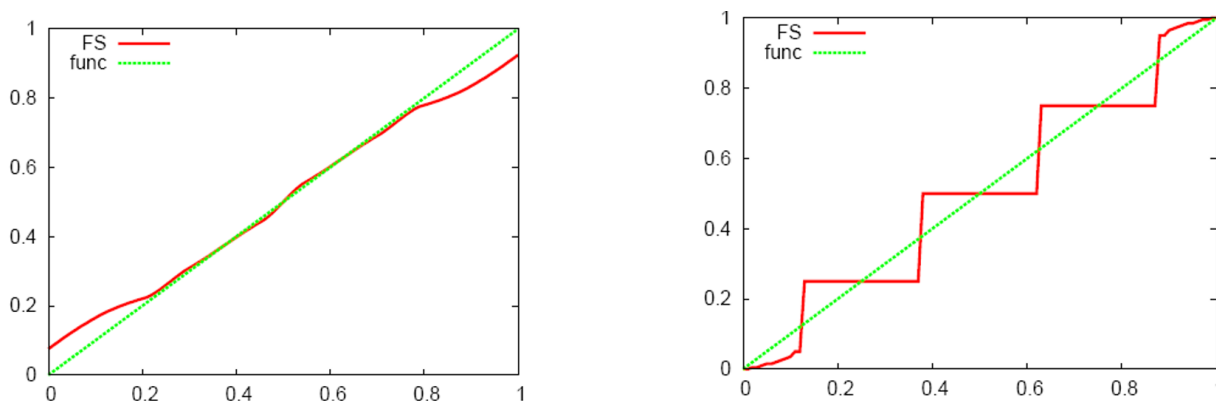


Рис. 4 – Графики усредненной ошибки аппроксимации для сгенерированных методов нечеткого логического вывода (всего 1024 метода, используется набор тестовых баз правил)

Перечислим некоторые результаты экспериментов.

а) На рис. 5 представлены кривые, которые порождаются системами логического вывода с различными импликациями.



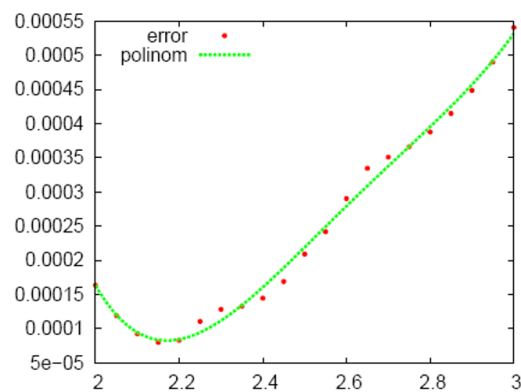
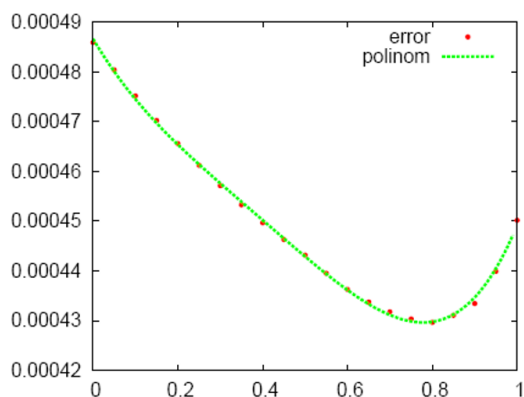
$$T^*(x, y) = \max \{0, (1-t)(x + y - 1) + txy\},$$

$$I_5^B(x, y) = \min \{1 - x + (1-t)y + txy, 1\}$$

$$t = 0.8$$

Рис. 5 – Графики аппроксимирующей кривой (красная линия) для различных импликаций при фиксированном выборе других компонент логического вывода

б) Целесообразно использовать параметрические операции импликации, которые за счет настройки параметра позволяют обеспечить хорошее качество аппроксимации. На рис. 6 представлен график зависимости ошибки от значений параметра параметрической импликации. Видно, что при определенных значениях параметра ошибка минимальна.



$$I_{\tau}(x, y) = \max \{0, (1 - \tau)(x + y - 1) + \tau xy\},$$

$$\tau \in [0, 1]$$

$$I_{\tau}(x, y) = \min \{1 - x + (1 - t)y + txy, 1\},$$

$$t > 2$$

Рис. 6 – Зависимость ошибки аппроксимации от значений параметров импликаций

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что импликации  $I_{Mamd} = \min(x, y)$  и  $I_{Lars} = x \cdot y$  действительно являются хорошими и совместно с методом дефазификации *COG* обеспечивают качественную аппроксимацию, но параметрические импликации могут показывать лучшие результаты и за счет настройки параметров гибко реагировать на особенности решаемой прикладной задачи.

с) На качество аппроксимации также оказывает влияние операция агрегирования. В проведенном исследовании рассматривалась схема, в которой осуществлялось агрегирование правил. На рис. 7 представлена визуализация базы правил в случае, если их агрегирование осуществлялось с помощью операции  $\min$  и на основе аддитивной взвешенной свертки с весовыми коэффициентами, которые отражают значимость отдельных правил.

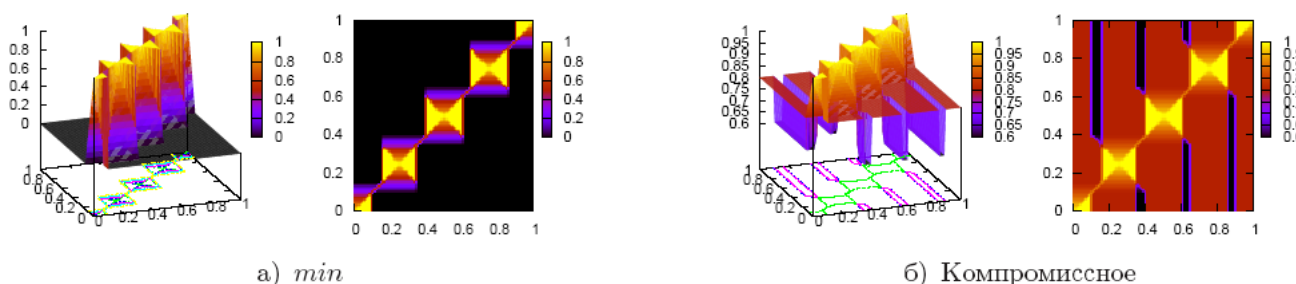


Рис. 7 – Графическое представление базы правил для различных случаев операции агрегирования

Таким образом, за счет подходящего выбора компонент механизма логического вывода можно получить более качественную реализацию нечеткой системы с точки зрения ее аппроксимирующих свойств.

#### 4. Практическая реализация

Результаты проведенного исследования использовались при разработке нечетких систем, среди которых экспертная система для принятия решений при проектировании системы вентиляции и кондиционирования воздуха; нечеткая система диагностики типа анемии на основе показателей крови; нечеткая система для прогнозирования прироста древесины при определении территории с лучшими почвенно-климатическими условиями для выращивания некоторых пород деревьев; нечеткая система для оценки кредитоспособности; нечеткая система управления целенаправленным движением мобильного объекта. Остановимся подробнее на описании экспертной системы, которая на основе измеренных датчиками или смоделированных значений показателей воздушной среды оценивает степень комфортности соответствующего помещения [16]. Основным параметром, оценивающим уровень комфорта/дискомфорта в помещении, является индекс комфортности  $PMV$ , который можно рассчитать в каждой точке объема. Данный индекс зависит от ряда параметров:  $DR$  – параметр, характеризующий наличие сквозняка в помещении, и зависящий, в том числе, от степени турбулентности воздуха;  $PD_1$  – параметр, оценивающий дискомфорт, вызванный градиентом температуры по высоте помещения;  $PD_2$  – параметр, оценивающий дискомфорт, вызванный значением температуры в зоне пола;  $PD_3$  – параметр, который оценивает дискомфорт, вызванный асимметрией теплового излучения. В зависимости от значения перечисленных параметров в каждой точке объема можно определить категорию комфортности  $A, B$  или  $C$ , причем упорядочение этих категорий имеет вид  $A \succ B \succ C$ , т.е. категория  $A$  имеет самый высокий приоритет, а  $C$  – самый низкий. Категория  $D$  соответствует дискомфорту.

Используемая в настоящее время методика позволяет сделать вывод о категории комфортности на основе интервальных значений показателей. Однако при этом возникает проблема на границах интервалов, когда значение

может быть отнесено и к данной, и к соседней категории. В разработанной экспертной системе проблема, связанная с применением противоречивых правил принятия решений, решается за счет использования инструментов нечеткого моделирования, с помощью которых уровень комфортности определяется однозначно. Если уровень комфортности определен в каждой точке, то система сформирует комплексную оценку комфортности помещения на основе современных подходов к агрегированию информации.

При работе с экспертной системой выполняется следующая последовательность действий:

1. Проект помещения разбивается на значимые и незначимые зоны; в каждой из зон определяется количество точек ( $N$ ), в которых осуществляется замер всех наблюдаемых параметров.
2. С помощью нечеткой системы формируется массив категорий комфортности в каждой из  $N$  точек.
3. Осуществляется формирование набора инструментов (фиксация параметров, выбор операции агрегирования, определение вектора весов и др.) для нахождения обобщенной оценки комфортности для каждой зоны.
4. Вычисляется обобщенная оценка для всего помещения в целом с учетом разработанных рекомендаций по выбору функций агрегирования.

Наиболее трудоемкий процесс создания данной экспертной системы был связан с разработкой нечеткой системы, при этом в основу механизма нечеткого логического вывода были положены результаты и выводы проведенных исследований, которые изложены выше. Для формирования базы правил использовалась существующая методика оценки комфортности, но при формировании лингвистических шкал параметров осуществлялся переход от заданного интервала к нечеткой переменной  $\alpha$  с треугольной функцией принадлежности. Ее модальное значение в точности определяет интервал значений исходного параметра, соответствующий данной категории. В терминах новых переменных была разработана база правил. Примеры правил представлены ниже.

$R_4$  : если  $\alpha_{|PVM|} \approx 0.65$  или  $\alpha_{|DR|} \approx 0.7$  или  $\alpha_{|PD|} \approx 0.87$ , то Категория = C ;

$R_8$  : если  $\alpha_{|PVM|} \approx 0.75$  и  $(\alpha_{|DR|} \approx 0.8$  или  $\alpha_{|DR|} \approx 0.9)$  и  $(\alpha_{|PD|} \approx 0.93$  или  $\alpha_{|PD|} \approx 0.96)$ , то Категория = B ;

$R_9$  : если  $\alpha_{|PVM|} \approx 0.9$  и  $\alpha_{|DR|} \approx 0.9$  или  $\alpha_{|PD|} \approx 0.93$ , то Категория = B ;

$R_{11}$  : если  $\alpha_{|PVM|} \approx 0.9$  и  $\alpha_{|DR|} \approx 0.9$  или  $\alpha_{|PD|} \approx 0.96$ , то Категория = A .

Используя нечеткую систему для каждой точки помещения можно определить соответствующую категорию. К особенностям подхода относятся: возможность учета требований к различным зонам в помещении; многоальтернативность и гибкость при формировании обобщенной оценки проекта.

### Заключение

Нечеткие продукционные системы в отличие от обычных имеют ряд особенностей: формат правил может быть различным; для представления приближенных (неточных, нечетких) значений системных переменных используется лингвистический подход; алгоритмы формирования фронта готовых продуктов упрощаются за счет использования для каждого правила оценок истинности. Однако в случае нечетких продукционных систем возникают другие проблемы, решение которых существенно влияет на эффективность и качество результата логического вывода. К таким проблемам, в частности, относится выбор представлений нечетких логических связей, методов дефазификации и фазификации, способов объединения результатов вывода, полученных для различных продукционных правил. Большинство этих вопросов решаются в представленной статье. Показано, что вариантов реализации нечеткого логического вывода может быть достаточно много, при этом целесообразно использовать параметрические формы, которые позволяют настраивать параметр на информационную среду конкретной прикладной задачи и обеспечить лучшее качество ее решения.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Dadone, P. Design Optimization of Fuzzy Logic Systems / P. Dadone. – Blacksburg, 2001. – 197 p.
2. Kandel A. Fuzzy Control Systems / A. Kandel, G. Landholz. – Boca Raton: CRC Press, 1994. – 656 p.
3. Ledeneva, T. Special Aspects of the Fuzzy Inference Mechanism / T. Ledeneva // Proceedings – 2020 2<sup>nd</sup> International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020. – 2020. – P. 128-132.
4. Pegat, A. Fuzzy modelling and control. / A. Pegat. – Moscow: BINOM, 2009. – 798 p.
5. Mishra, S. K. An empirical study of the performance of heuristic methods for clustering / S. K. Mishra, V. V. Raghavan // Pattern Recognition in Practice. – 1994. – P. 425–436.
6. Леденева, Т.М. Об одном подходе к формированию базы знаний для сегментации временных рядов / Т.М. Леденева, М.А. Сергиенко // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2017. – №3. – С. 156-164.
7. Татаркин, Д.С. Исследование моделей нечеткого логического вывода / Д.С. Татаркин, Т.М. Леденева // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2006. – №2. – С. 110-118.



8. Wang L.-X. Fuzzy systems are universal approximators / L.-X. Wang // IEEE 1992 Intern. Conf. Fuzzy Systems. – San Diego, 1992. – P. 1163-1170.
9. Klement E. Triangular norms. Position paper II: general constructions and parameterized families / E. Klement, R. Mesiar, E. Pap // Fuzzy Set and Systems. – 2004. – №145. – P. 411-438.
10. Ledeneva, T. Additive generators of fuzzy operations in the form of linear fractional functions / T. Ledeneva // Fuzzy Set and System. – 2020. – № 386. – P. 1-24. DOI: 10.1016/j.fss.2019.03.005.
11. Ledeneva, T. New Family of Triangular Norms for Decreasing Generators in the Form of a Logarithm of a Linear Fractional Function / T. Ledeneva // Fuzzy Sets and Systems. – 2020. DOI: 10.1016/j.fss.2020.11.020
12. Ledeneva, T. Analysis of additive generators of fuzzy operations represented by rational functions / T. Ledeneva // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – №973. doi :10.1088/1742-6596/973/1/012037.
13. Леденева, Т.М. О нечетких импликациях, полученных обобщением булевой функции / Т.М. Леденева, А.В. Грибовский // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Математика. – 2003. – №2. – С. 189-196.
14. Леденева, Т.М. Агрегирование информации в оценочных системах / Т.М. Леденева, С.Л. Подвальный // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – №4. – С. 155-164.
15. Леденева, Т.М. Обработка нечеткой информации. / Т.М. Леденева. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2006. – 233 с.
16. Леденева, Т.М. Экспертная система для оценки проектов воздушного распределения / Т.М. Леденева, А.Д. Решетников // Сб. труд. Междунар. науч.-техн. конф. «Математические методы в технике и технологиях», – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 119-126.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Dadone, P. Design Optimization of Fuzzy Logic Systems / P. Dadone. – Blacksburg, 2001. – 197 p.
2. Kandel A. Fuzzy Control Systems / A. Kandel, G. Landholz. – Boca Raton: CRC Press, 1994. – 656 p.
3. Ledeneva, T. Special Aspects of the Fuzzy Inference Mechanism / T. Ledeneva // Proceedings – 2020 2<sup>nd</sup> International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020. – 2020. – P. 128-132.
4. Pegat, A. Fuzzy modelling and control. / A. Pegat. – Moscow: BINOM, 2009. – 798 p.
5. Mishra, S. K. An empirical study of the performance of heuristic methods for clustering / S. K Mishra, V. V Raghavan // Pattern Recognition in Practice. – 1994. – P. 425–436.
6. Ledeneva, T.M. Ob odnom podhode k formirovaniyu bazy znaniy dlja segmentacii vremennyh rjadov [On one approach to building a knowledge base for time series segmentation] / T.M. Ledeneva, M.A. Sergienko // Vestn. Voronezh. gos. un-ta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii [Bulletin of Voronezh State University. System analysis and information technologies]. – 2017. – №3. – P. 156-164. [in Russian]
7. Tatarkin, D.S. Issledovanie modelej nechetkogo logicheskogo vyvoda [Investigating Fuzzy Inference Models] / D.S. Tatarkin, T.M. Ledeneva // Vestn. Voronezh. gos. un-ta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii [Bulletin of Voronezh State University. System analysis and information technologies]. – 2006. – №2. – P.110-118. [in Russian]
8. Wang L.-X. Fuzzy systems are universal approximators / L.-X. Wang // IEEE 1992 Intern. Conf. Fuzzy Systems. – San Diego, 1992. – P. 1163-1170.
9. Klement E. Triangular norms. Position paper II: general constructions and parameterized families / E. Klement, R. Mesiar, E. Pap // Fuzzy Set and Systems. – 2004. – №145. – P. 411-438.
10. Ledeneva, T. Additive generators of fuzzy operations in the form of linear fractional functions / T. Ledeneva // Fuzzy Set and System. – 2020. – № 386. – P. 1-24. DOI: 10.1016/j.fss.2019.03.005.
11. Ledeneva, T. New Family of Triangular Norms for Decreasing Generators in the Form of a Logarithm of a Linear Fractional Function / T. Ledeneva // Fuzzy Sets and Systems. – 2020. DOI: 10.1016/j.fss.2020.11.020.
12. Ledeneva, T. Analysis of additive generators of fuzzy operations represented by rational functions / T. Ledeneva // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – №973. doi :10.1088/1742-6596/973/1/012037.
13. Ledeneva, T.M. O nechetkih implikacijah, poluchennyh obobshheniem bulevoj funkcii [On fuzzy implications obtained by generalisation of a Boolean function] / T.M. Ledeneva, A.V. Gribovsky // Vestn. Voronezh. gos. un-ta. Serija: Matematika [Bulletin of Voronezh State University. Mathematics]. – 2003. – №2. – P. 189-196. [in Russian]
14. Ledeneva, T.M. Agregirovanie informacii v ocenocnyh sistemah [Aggregation of information in evaluation systems] / T.M. Ledeneva, S.L. Podvalny // Vestn. Voronezh. gos. un-ta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii [Bulletin of Voronezh State University. System analysis and information technologies]. – 2016. – №4. – P. 155-164. [in Russian]
15. Ledeneva T.M. Obrabotka nechetkoj informacii [Processing of fuzzy information] / T.M. Ledeneva. – Voronezh: Voronezh State University, 2006. 233 p. [in Russian]
16. Ledeneva T.M. Jekspertnaja sistema dlja ocenki proektov vozduhoraspredelenija [Expert system for evaluating air distribution projects] / T.M. Ledeneva, A.D. Reshetnikov // Sb. trud. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah» [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Mathematical Methods in Engineering and Technology"], – СПб.: Publishing House of the Polytechnic University, 2017. – P. 119-126. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.019>

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НЕЧЕТКИХ И ИНТЕРВАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТА

Научная статья

Леденев М.Ю.<sup>1</sup>, Сергиенко М.А.<sup>2</sup>, \*<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1322-9624;<sup>1, 2</sup> Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

\* Корреспондирующий автор (sergienko-m-a[at]yandex.ru)

## Аннотация

В статье рассматривается задача календарного планирования работ проекта при условии, что продолжительности работ заданы приближенно в форме нечетких треугольных чисел. Согласно принципу декомпозиции, нечеткое число может быть представлено совокупностью  $\alpha$ -срезов, что позволяет использовать интервальную арифметику для организации вычислений. В качестве базового алгоритма для определения временных параметров рассматривается алгоритм для сети, основанный на нахождении максимальных (критических) путей в бесконтурном графе. Предложен алгоритм расчета временных параметров сетевой модели проекта в форме интервальных чисел, которые являются  $\alpha$ -срезами соответствующих нечетких чисел. Отличительной особенностью алгоритма является то, что ранние и поздние времена наступления событий содержат в явном виде параметр  $\alpha$ . При заданном  $\alpha$  формируется конкретное множество ранних и поздних времен наступления событий. Кроме того, зная коэффициенты неопределенности нечетких чисел, можно перейти к представлению временных параметров нечеткими числами. В статье приведены подробные расчеты для иллюстративного примера. Алгоритм позволяет реализовать стратегию «мягкого» планирования проекта.

**Ключевые слова:** проект, интервальное число, нечеткое число,  $\alpha$ -срез.

## AN ALGORITHM FOR CALCULATING FUZZY AND INTERVAL ESTIMATIONS OF THE TIME PARAMETERS OF NETWORK MODEL OF A PROJECT

Research article

Ledenev M.Yu.<sup>1</sup>, Sergienko M.A.<sup>2</sup>, \*<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1322-9624;<sup>1, 2</sup> Voronezh State University, Voronezh, Russia

\* Corresponding author (sergienko-m-a[at]yandex.ru)

## Abstract

The article deals with the problem of calendar planning of project activities, provided that the duration of work is given approximately in the form of fuzzy triangular numbers. According to the decomposition principle, a fuzzy number can be represented by a set of  $\alpha$ -slices, which allows for using interval arithmetic for organizing calculations. As a basic algorithm for determining the time parameters, the authors consider an algorithm for a network based on finding the maximum (critical) paths in an acyclic graph. The study proposes an algorithm for calculating the time parameters of the network model of the project in the form of interval numbers, which are  $\alpha$ -slices of the corresponding fuzzy numbers. A distinctive feature of the algorithm is that the early and late times of the occurrence of events explicitly contain the  $\alpha$  parameter. For a given  $\alpha$ , a specific set of early and late event occurrence times is formed. In addition, knowing the uncertainty coefficients of fuzzy numbers, one can proceed to the representation of time parameters by fuzzy numbers. The article provides detailed calculations for an illustrative example. The algorithm allows for implementing a strategy of "soft" project planning.

**Keywords:** project, interval number, fuzzy number,  $\alpha$ -slice.

## Введение

Повышение сложности современных проектов обуславливает развитие эффективных методов планирования, обеспечивающих оптимизацию всего процесса реализации проекта. По оценкам исследователей [1]: только 44% проектов обычно завершаются вовремя; в среднем проекты занимают 222% от начальной запланированной продолжительности, 70% проектов сокращают исходный объем работ; 30% проектов закрываются досрочно. Развитие теории управления сложными комплексами работ является актуальным направлением исследований. К основным методам сетевого планирования относят следующие: МКП – метод критического пути с детерминированной технологией сетевого планирования [2]; PERT (Program Evaluation and Review Technique) – технология оценки планов реализации проекта с учетом случайного времени выполнения операций [2]; GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) – стохастическая сетевая технология, обобщающая классический сетевой график [3]. Для небольших по объему проектов еще до появления методов сетевого планирования использовалась ленточная диаграмма Ганта, которая позволяет оценить текущее состояние проекта и загруженность исполнителей. Существующий на данный момент инструментарий управления проектами в форме программных систем и сред (например, *Open Plan*, *Primavera Project Planner*, *Microsoft Project*, *Spider Project* и др.) позволяет руководителю эффективно управлять процессом реализации работ, а также маневрировать ресурсами в условиях полной информированности о продолжительности работ. Однако в реальной ситуации продолжительность работ может быть задана только приближенно на основе накопленного опыта или экспертных оценок. Наличие фактора неопределенности обуславливает развитие подходов к решению задач планирования работ проекта с учетом приближенных моделей обработки информации. Метод PERT работает в предположении, что продолжительность работы является случайной величиной, и позволяет определить вероятность того, что проект будет реализован в течение заданного времени. В [4] представлен метод нахождения нечеткого критического пути. В [5,6] предложены подходы для календарного планирования работ проекта на основе гауссовых нечетких чисел, однако сложность вычислений препятствует их широкому практическому использованию.

Цель статьи заключается в представлении алгоритма планирования, ориентированного на представление продолжительности работ проекта в форме треугольных нечетких чисел. Особенностью подхода является то, что нечеткое число представляется в виде совокупности  $\alpha$ -срезов, что позволяет использовать для вычислений интервальную арифметику.

### 1. Математическая модель проекта

Под *проектом* понимается комплекс работ, которые выполняются в определенной последовательности и требуют для своего выполнения времени и ресурсного обеспечения [1].

На этапе структурного моделирования, с одной стороны, проект разбивается на совокупность работ (операций), для каждой из которых осуществляется оценка необходимого для ее выполнения времени, с другой стороны, устанавливается логическая последовательность работ и формируется математическая модель в форме ориентированного графа [7].

На этапе календарного планирования определяются моменты начала и окончания каждой работы, и выявляются те из них (критические), которые потребуют пристального внимания при реализации проекта для его успешного окончания в директивный срок. Выявление не критических работ необходимо для нахождения резервов времени проекта.

Введем основные понятия сетевого моделирования, базируясь на [7], [8].

Сеть – это бесконтурный взвешенный ориентированный граф, в котором имеется одна вершина, имеющая только выходящие дуги, и одна вершина, имеющая только входящие дуги. Сеть также называется сетевым графиком.

В сетевом графике каждой дуге соответствует работа, продолжительность которой определяет вес дуги. Каждая вершина есть событие, которое заключается в том, что работы, соответствующие входящим дугам, завершены, а работы, соответствующие выходящим дугам, готовы к выполнению.

Вершина без входящих дуг называется исходным событием, а без выходящих – завершающим событием сети.

Каждому событию  $i$  можно поставить в соответствие следующие параметры [8]:  $t_{erl}(i)$  – *раннее время наступления  $i$ -го события* – время, раньше которого событие  $i$  наступить не может, иначе не будут завершены работы, которые ему предшествуют;  $t_{lst}(i)$  – *позднее время наступления  $i$ -го события* – время, позже которого событие  $i$  наступить не должно, иначе увеличится время, необходимое для реализации проекта.

Заметим, что  $t_{erl}(i) \leq t_{lst}(i)$ , при этом величина  $R(i) = t_{lst}(i) - t_{erl}(i)$  называется *резервом времени  $i$ -го события*.

Зафиксируем событие  $i$ . Очевидно, что для его наступления необходимо, чтобы все работы, которые ему предшествуют, были завершены. Тогда раннее время  $t_{erl}(i)$  можно интерпретировать как длину максимального пути из исходного события в данное событие  $i$ .

Длина максимального пути из исходного события в завершающее – это время, необходимое для реализации всего проекта, так как время завершения всего комплекса работ не может быть меньше, чем суммарная продолжительность всех работ вдоль самого длинного пути. Это время называется *критическим* и обозначается  $T_{max}$ . Сетевой график может иметь несколько критических путей. Все они имеют одинаковую длину  $T_{max}$ .

Позднее время  $t_{lst}(i)$  наступления  $i$ -го события можно интерпретировать как разность между длиной критического пути и длиной критического пути из  $i$ -го события в завершающее событие сети. Работы и события, принадлежащие критическому пути, также называются *критическими*. Особенность критических работ заключается в том, что они не имеют резервов времени, поэтому невыполнение срока окончания любой из критических работ приводит к увеличению критического времени  $T_{max}$ .

Имеет место следующее утверждение [2]: для того, чтобы событие  $i$  принадлежало критическому пути необходимо и достаточно, чтобы раннее и позднее времена наступления этого события совпадали, то есть  $t_{erl}(i) = t_{lst}(i)$ .

К временным параметрам сетевого графика также относятся резервы времени работ [8].

### 2. Алгоритм определения временных параметров проекта

Шаг 1. *Топологическая сортировка сети.*

Получить правильную нумерацию вершин сетевого графика, при этом исходное событие сети получает номер 0, а завершающее – номер  $n$ .

Шаг 2. *Определение ранних времен наступления событий.*

Положить  $t_{erl}(0) = t_{erl}(1) = \dots = t_{erl}(n)$ . Двигаясь по пронумерованной сети в порядке возрастания вершин, для каждой вершины  $j$  определить

$$t_{erl}(j) = \max_{i \in \Gamma^{-1}(j)} \{t_{erl}(i) + t_{ij}\},$$

где  $\Gamma^{-1}(j) = \{i : i \rightarrow j\}$  – множество вершин, из которых дуги ведут в  $j$ .

Шаг 3. *Определение критического пути.*

Положить  $T_{\max} = t_{\text{erl}}(n)$ , где  $n$  – завершающее событие сети. Для определения критического пути выполнить следующие действия: из всех дуг, входящих в завершающее событие  $n$ , выделить те дуги  $(i, j)$ , которые удовлетворяют условию  $t_{\text{erl}}(j) - t_{\text{erl}}(i) = t_{ij}$ . Затем рассматриваются те вершины, из которых выходят выделенные дуги, и снова из входящих в них дуг выделяются те, которые удовлетворяют тому же условию. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто исходное событие сети. Путь из исходного события в завершающее событие, составленный из выделенных дуг, является критическим.

Шаг 4. *Определение поздних времен наступления событий.*

Положить  $t_{\text{lst}}(n) = t_{\text{erl}}(n) = T_{\max}$ . Двигаясь по сети от завершающего события в порядке убывания номеров вершин, определить для каждого  $i$ -го события

$$t_{\text{lst}}(i) = \min_{j \in \Gamma(i)} \{t_{\text{lst}}(j) - t_{ij}\},$$

где  $\Gamma(i) = \{j : i \rightarrow j\}$  – множество вершин, в которые ведут дуги из  $i$ .

### 3. Календарное планирование в условиях неопределенности

#### 3.1. Модели представления приближенной информации

К наиболее распространенным формам представления приближенной информации относятся интервальные и нечеткие числа [9].

Под интервальным числом подразумевается любой промежуток  $[a, b]$  при  $a < b$  с включенными или исключенными границами, так что интервалы, полуинтервалы и отрезки, по сути, являются интервальными числами.

Пусть  $[a, b]$  и  $[d, e]$  – интервальные числа, тогда определим арифметические операции над ними следующим образом [10]:

$$\begin{aligned} [a, b] + [d, e] &= [a + d, b + e], \quad [a, b] - [d, e] = [a - e, b - d], \\ [a, b] \cdot [d, e] &= [\min\{ad, ae, bd, be\}, \max\{ad, ae, bd, be\}], \\ \frac{[a, b]}{[d, e]} &= \left[ \min\left\{\frac{a}{d}, \frac{a}{e}, \frac{b}{d}, \frac{b}{e}\right\}, \max\left\{\frac{a}{d}, \frac{a}{e}, \frac{b}{d}, \frac{b}{e}\right\} \right]. \end{aligned}$$

Будем считать, что  $[a, b] < [c, d]$ , если  $\begin{cases} a < c, \\ b < d. \end{cases}$

Являясь одним из основных понятий нечеткой математики, нечеткие числа используются для формализации приближенной информации вида « $x$  приблизительно равно  $a$ ». Нечеткое число  $A$  – это число с плохо определенными границами, поэтому для его задания необходимо задать параметр  $a$  (модальное значение) и поведение на границах. Будем рассматривать нечеткие треугольные числа с функцией принадлежности вида

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 + \frac{x-a}{l}, & a-l \leq x < a, \\ 1, & x = a, \\ 1 - \frac{x-a}{r}, & a < x \leq a+r, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $l, r$  – соответственно левый и правый коэффициенты неопределенности.

Заметим, что нечеткое треугольное число является нечетким подмножеством числовой прямой и однозначно задается набором параметров  $a, l, r$ , поэтому его часто обозначают тройкой  $(a, l, r)$ .

Для произвольного нечеткого множества  $A$  с функцией принадлежности  $\mu_A$   $\alpha$ -срезом называется обычное множество

$$A_\alpha = \{x : \mu_A(x) \geq \alpha\}.$$

В соответствии с теоремой декомпозиции [8], каждое нечеткое множество можно представить совокупностью  $\alpha$ -срезов.

$\alpha$ -Срез треугольного нечеткого числа  $(a, l, r)$  представляет собой промежуток  $[l_\alpha, r_\alpha]$ , где  $l_\alpha$  – это корень уравнения  $1 + \frac{x-a}{l} = \alpha$ ,  $r_\alpha$  – корень уравнения  $1 - \frac{x-a}{r} = \alpha$ . Вычисляя корни, получим  $A_\alpha = [a - l(1-\alpha), a + r(1-\alpha)]$ .

Перебирая последовательные значения  $\alpha \in (0, 1]$  с определенным шагом, нечеткое число  $A$  можно представить множеством

$$A = \left\{ \left( [a - l(1-\alpha), a + r(1-\alpha)] / \alpha \right) \right\}_{\alpha \in (0, 1]}.$$

Заметим, что при  $\alpha = 0$  получим самый «широкий» интервал  $[a - l, a + r]$ ; при возрастании  $\alpha$  от 0 до 1 интервал сужается, и при  $\alpha = 1$  превращается в точку.

Имеет место следующее утверждение: пусть  $A$  и  $B$  – нечеткие числа,  $\alpha$ -срезы которых есть  $A_\alpha = [a - l_A(1-\alpha), a + r_A(1-\alpha)]$  и  $B_\alpha = [b - l_B(1-\alpha), b + r_B(1-\alpha)]$ . Если  $A_0 \prec B_0$ , то при любом  $\alpha \in (0, 1]$  имеем  $A_\alpha \prec B_\alpha$ .

$$\text{Заметим, что } A_0 \prec B_0 \Leftrightarrow [a - l_A, a + r_A] \prec [b - l_B, b + r_B] \Leftrightarrow \begin{cases} a - l_A < b - l_B, \\ a + r_A < b + r_B. \end{cases}$$

Один из подходов к определению нечетких операций базируется на интервальной арифметике [10]. Пусть  $A$  и  $B$  – нечеткие числа,  $A_\alpha$  и  $B_\alpha$  – их  $\alpha$ -срезы,  $*$  – символ арифметической операции, тогда для любых  $\alpha \in (0, 1]$  имеет место следующее определение:

$$A * B = \bigcup_{\alpha \in (0, 1]} (A * B)_\alpha,$$

где  $(A * B)_\alpha = A_\alpha * B_\alpha$ ,  $0 \notin B_\alpha$  для всех  $\alpha \in (0, 1]$ .

Таким образом, арифметические операции над нечеткими числами сводятся к арифметическим операциям над соответствующими  $\alpha$ -срезами.

### 3.2 Алгоритм расчета временных параметров проекта на основе продолжительностей работ, заданных интервальными числами

Пусть продолжительности работ заданы в форме треугольных нечетких чисел  $\tilde{t}_{ij} = (t_{ij}, l_{ij}, r_{ij})$ . Зафиксируем  $\alpha \in (0, 1]$  и перейдем к  $\alpha$ -срезам  $(\tilde{t}_{ij})_\alpha = [t_{ij} - l_{ij}(1-\alpha), t_{ij} + r_{ij}(1-\alpha)]$ . Также введем интервальные числа

$$(\tilde{t}_{erl}(i))_\alpha = [t_{erl}(i) - l_i^{erl}(1-\alpha), t_{erl}(i) + r_i^{erl}(1-\alpha)]$$

и

$$(\tilde{t}_{lst}(i))_\alpha = [t_{lst}(i) - l_i^{lst}(1-\alpha), t_{lst}(i) + r_i^{lst}(1-\alpha)],$$

определяющие  $\alpha$ -срезы следующих параметров:  $\tilde{t}_{erl}(i)$  – раннее время наступления  $i$ -го события и  $\tilde{t}_{lst}(i)$  – позднее время наступления  $i$ -го события. Поскольку классический алгоритм расчета временных параметров использует нулевые метки, то введем интервальное число

$$(\tilde{0})_\alpha = \left[ 0 - \min_{(i,j)} \{l_{ij}\} \cdot (1-\alpha), 0 + \min_{(i,j)} \{r_{ij}\} \cdot (1-\alpha) \right].$$

Изложим модифицированный алгоритм.

Шаг 1 (*упорядочивание событий*). Данный шаг не учитывает форму представления информации, поэтому он реализуется так же, как в классическом случае, т.е. выполняется топологическая сортировка, в результате которой вершинам приписываются «правильные» номера, упорядочивающие события сетевого графика, при этом исходное событие сети получает номер 0, а завершающее – номер  $n$ .

Шаг 2 (определение ранних времен наступления событий). Зафиксировать  $\alpha \in (0,1]$ . Положить  $(\tilde{t}_{erl}(0))_\alpha = (\tilde{0})_\alpha$ . Рассматривая вершины-события в порядке возрастания их номеров, для каждого события  $j$  определить раннее время наступления по формуле

$$\begin{aligned} (\tilde{t}_{erl}(j))_\alpha &= \max_{i \in \Gamma^{-1}(j)} \{ (\tilde{t}_{erl}(i))_\alpha + (\tilde{t}_{ij})_\alpha \} = \\ &= \max_{i \in \Gamma^{-1}(j)} \left\{ [t_{erl}(i) - l_i^{erl}(1-\alpha), t_{erl}(i) + r_i^{erl}(1-\alpha)] + [t_{ij} - l_{ij}(1-\alpha), t_{ij} + r_{ij}(1-\alpha)] \right\} = \\ &= \max_{i \in \Gamma^{-1}(j)} \left\{ [(t_{erl}(i) + t_{ij}) - (1-\alpha)(l_i^{erl} + l_{ij}), (t_{erl}(i) + t_{ij}) + (1-\alpha)(r_i^{erl} + r_{ij})] \right\}. \end{aligned}$$

где  $\Gamma^{-1}(j) = \{i : i \rightarrow j\}$  – множество вершин, из которых дуги ведут в  $j$ .

Шаг 3 (определение критического пути). Положить

$$T_{\max} = (\tilde{t}_{erl}(n))_\alpha = [t_{erl}(n) - l_n^{erl}(1-\alpha), t_{erl}(n) + r_n^{erl}(1-\alpha)],$$

где  $n$  – завершающее событие сети. Для определения критического пути выполнить следующие действия: положить  $j = n$ , и выделить те дуги  $(i, j)$ , которые удовлетворяют условию

$$\begin{aligned} &(\tilde{t}_{erl}(j))_\alpha - (\tilde{t}_{erl}(i))_\alpha = \\ &= [t_{erl}(j) - l_j^{erl}(1-\alpha), t_{erl}(j) + r_j^{erl}(1-\alpha)] - [t_{erl}(i) - l_i^{erl}(1-\alpha), t_{erl}(i) + r_i^{erl}(1-\alpha)] = \\ &= [(t_{erl}(j) - t_{erl}(i)) - (1-\alpha)(l_j^{erl} + r_i^{erl}), (t_{erl}(j) - t_{erl}(i)) + (1-\alpha)(l_i^{erl} + r_j^{erl})] \approx \\ &\approx (\tilde{0})_\alpha = [0 - \min_{(i,j)} \{l_{ij}\} \cdot (1-\alpha), 0 + \min_{(i,j)} \{r_{ij}\} \cdot (1-\alpha)]. \end{aligned}$$

Затем рассматриваются те вершины, из которых выходят выделенные дуги, и снова из входящих в них дуг выделяются те, которые удовлетворяют тому же условию. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто исходное событие сети. Путь из исходного события в завершающее событие, составленный из выделенных дуг, является критическим.

Шаг 4 (определение поздних времен).

Положить  $(\tilde{t}_{lst}(n))_\alpha = [t_{lst}(n) - l_n^{lst}(1-\alpha), t_{lst}(n) + r_n^{lst}(1-\alpha)]$ , где  $l_n^{lst} = l_n^{erl}$ ,  $r_n^{lst} = r_n^{erl}$ . Двигаясь по сети в порядке убывания правильных номеров вершин, определить

$$\begin{aligned} (\tilde{t}_{lst}(j))_\alpha &= \min_{i \in \Gamma(j)} \{ (\tilde{t}_{lst}(i))_\alpha - (\tilde{t}_{ij})_\alpha \} = \\ &= \min_{i \in \Gamma(j)} \left\{ [t_{lst}(i) - l_i^{lst}(1-\alpha), t_{lst}(i) + r_i^{lst}(1-\alpha)] - [t_{ij} - l_{ij}(1-\alpha), t_{ij} + r_{ij}(1-\alpha)] \right\} = \\ &= \min_{i \in \Gamma(j)} \left\{ [(t_{lst}(i) - t_{ij}) - (1-\alpha)(l_i^{lst} + r_{ij}), (t_{lst}(i) - t_{ij}) + (1-\alpha)(r_i^{lst} + l_{ij})] \right\}. \end{aligned}$$

Для контроля вычислений будем использовать условие

$$(\tilde{t}_{lst}(1))_\alpha - (\tilde{t}_{erl}(1))_\alpha = (\tilde{0})_\alpha = [0 - \min_{(i,j)} \{l_{ij}\} \cdot (1-\alpha), 0 + \min_{(i,j)} \{r_{ij}\} \cdot (1-\alpha)].$$

Нечеткая информация относительно продолжительности операций может быть получена от экспертов в ситуации, когда проект и каждая операция являются уникальными и отсутствуют как нормативы, так и статистические данные. Тестирование изложенного алгоритма показало, что, если продолжительности работ заданы интервальными числами с малой шириной, то получаются приемлемые результаты, причем возможна их эффективная оптимизация за счет сдвигов. Если среди продолжительностей имеются интервалы с большой шириной, то это влияет на критическое время – оно задается «широким» интервальным числом, и прогнозировать время, необходимое для выполнения проекта становится невозможно.

### 3.3. Иллюстративный пример

Рассмотрим сетевой график, представленный на рис. 1, и рассчитаем его временные параметры.

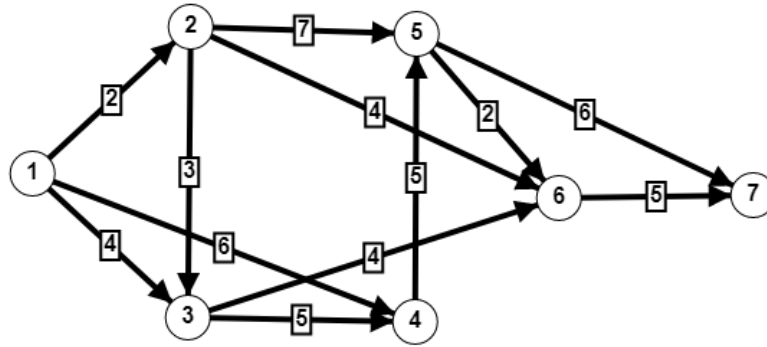


Рис. 1 – Пример сетевого графика

По формулам найдем ранние времена наступления событий:

$$\begin{aligned} t_{erl}(1) &= 0, \quad t_{erl}(2) = 0 + 2 = 2, \quad t_{erl}(3) = \max\{2 + 3, 0 + 4\} = 5, \\ t_{erl}(4) &= \max\{0 + 6, 5 + 5\} = 10, \quad t_{erl}(5) = \max\{2 + 7, 10 + 3\} = 13, \\ t_{erl}(6) &= \max\{2 + 4, 5 + 4, 13 + 2\} = 15, \quad t_{erl}(7) = \max\{13 + 6, 15 + 5\} = 20. \end{aligned}$$

Таким образом,  $T_{\max} = 20$ , поэтому для реализации проекта необходимо 20 единиц времени. Найдем поздние времена событий:

$$\begin{aligned} t_{lst}(7) &= 20, \quad t_{lst}(6) = 20 - 5 = 15, \quad t_{lst}(5) = \min\{15 - 2, 20 - 6\} = 13, \\ t_{lst}(4) &= 13 - 3 = 10, \quad t_{lst}(3) = 10 - 5 = 5, \quad t_{lst}(2) = \min\{2 - 2, 5 - 4, 10 - 6\} = 0. \end{aligned}$$

Теперь рассмотрим ситуацию, когда продолжительности работ заданы приближенно в форме нечетких чисел (табл. 1).

Таблица 1 – Продолжительности работ в форме нечетких чисел

| $(i, j)$ | (1,2) | (1,3) | (1,4) | (2,3) | (2,5) | (2,6) | (3,4) | (3,6) | (4,5) | (5,6) | (5,7) | (6,7) |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_{ij}$ | 2     | 4     | 6     | 3     | 7     | 4     | 5     | 4     | 5     | 2     | 6     | 5     |
| $l_{ij}$ | 1     | 1     | 0.5   | 2     | 1     | 1     | 0.5   | 2     | 1     | 1     | 2     | 0.5   |
| $r_{ij}$ | 0.5   | 2     | 0.5   | 1     | 1     | 2     | 0.5   | 0.5   | 1     | 1     | 1     | 2     |

Определим  $\alpha$ -срез нечеткого нуля

$$\begin{aligned} (\tilde{0})_{\alpha} &= \left[ 0 - \min_{(i,j)} \{l_{ij}\} \cdot (1 - \alpha), 0 + \min_{(i,j)} \{r_{ij}\} \cdot (1 - \alpha) \right] = \\ &= \left[ 0 - 0.5 \cdot (1 - \alpha), 0 + 0.5 \cdot (1 - \alpha) \right] = \left[ -0.5 \cdot (1 - \alpha), 0.5 \cdot (1 - \alpha) \right]. \end{aligned}$$

При определении критического времени целесообразно перейти к  $\alpha$ -срезу вида  $\left[ 0 \cdot (1 - \alpha), 0.5 \cdot (1 - \alpha) \right] = \left[ 0, 0.5 \cdot (1 - \alpha) \right]$ , поскольку в этом случае нечеткий нуль считается точкой отсчета, началом реализации проекта.

На основе предложенного алгоритма найдем ранние времена наступления событий для сетевого графика на рис. 1.

$$(\tilde{t}_{erl}(1))_{\alpha} = (\tilde{0})_{\alpha} = \left[ 0 \cdot (1 - \alpha), 0.5 \cdot (1 - \alpha) \right] = \left[ 0, 0.5 \cdot (1 - \alpha) \right],$$

где  $l_1^{erl} = 0, r_1^{erl} = 0.5$ .

$$\begin{aligned} (\tilde{t}_{erl}(2))_{\alpha} &= \left[ (t_{erl}(1) + t_{12}) - (1 - \alpha)(l_1^{erl} + l_{12}), (t_{erl}(1) + t_{12}) + (1 - \alpha)(r_1^{erl} + r_{12}) \right] = \\ &= \left[ 2 - (1 - \alpha) \cdot (0 + 1), 2 + (1 - \alpha) \cdot (0.5 + 0.5) \right] = \left[ 2 - (1 - \alpha) \cdot 1, 2 + (1 - \alpha) \cdot 1 \right], \end{aligned}$$

где  $l_2^{erl} = 1, r_2^{erl} = 1$ .

$$\begin{aligned}
(\tilde{t}_{erl}(3))_{\alpha} &= \max \left\{ \left[ (t_{erl}(1) + t_{13}) - (1 - \alpha) \cdot (l_1^{erl} + l_{13}), (t_{erl}(1) + t_{13}) + (1 - \alpha) \cdot (r_1^{erl} + r_{13}) \right], \right. \\
&\quad \left. \left[ (t_{erl}(2) + t_{23}) - (1 - \alpha) \cdot (l_2^{erl} + l_{23}), (t_{erl}(2) + t_{23}) + (1 - \alpha) \cdot (r_2^{erl} + r_{23}) \right] \right\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 5 - (1 - \alpha) \cdot (0 + 1), 5 + (1 - \alpha) \cdot (0.5 + 2) \right], \right. \\
&\quad \left. \left[ 4 - (1 - \alpha) \cdot (1 + 2), 4 + (1 - \alpha) \cdot (1 + 1) \right] \right\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 5 - (1 - \alpha) \cdot 1, 5 + (1 - \alpha) \cdot 2.5 \right], \left[ 4 - (1 - \alpha) \cdot 3, 4 + (1 - \alpha) \cdot 2 \right] \right\}.
\end{aligned}$$

При  $\alpha = 0$  получим

$$\max \{ [5 - 1, 5 + 2.5], [4 - 3, 4 + 2] \} = \max \{ [4, 7.5], [1, 6] \} = [4, 7.5],$$

так как данный интервал находится правее, причем при возрастании  $\alpha$  положение интервалов относительно друг друга не изменится. Таким образом,

$$\begin{aligned}
(\tilde{t}_{erl}(3))_{\alpha} &= [5 - (1 - \alpha) \cdot 1, 5 + (1 - \alpha) \cdot 2.5], \text{ где } l_3^{erl} = 1, r_3^{erl} = 2.5. \\
(\tilde{t}_{erl}(4))_{\alpha} &= \max \left\{ \left[ (t_{erl}(1) + t_{14}) - (1 - \alpha) \cdot (l_1^{erl} + l_{14}), (t_{erl}(1) + t_{14}) + (1 - \alpha) \cdot (r_1^{erl} + r_{14}) \right], \right. \\
&\quad \left. \left[ (t_{erl}(3) + t_{34}) - (1 - \alpha) \cdot (l_3^{erl} + l_{34}), (t_{erl}(3) + t_{34}) + (1 - \alpha) \cdot (r_3^{erl} + r_{34}) \right] \right\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 6 - (1 - \alpha) \cdot (0 + 0.5), 6 + (1 - \alpha) \cdot (0.5 + 0.5) \right], \right. \\
&\quad \left. \left[ 10 - (1 - \alpha) \cdot (1 + 0.5), 10 + (1 - \alpha) \cdot (2.5 + 0.5) \right] \right\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 6 - (1 - \alpha) \cdot 0.5, 6 + (1 - \alpha) \cdot 1 \right], \left[ 10 - (1 - \alpha) \cdot 1.5, 10 + (1 - \alpha) \cdot 3 \right] \right\}.
\end{aligned}$$

При  $\alpha = 0$  получим

$$\max \{ [6 - 0.5, 6 + 1], [10 - 1.5, 10 + 3] \} = \max \{ [5.5, 7], [8.5, 13] \} = [8.5, 13],$$

так как данный интервал находится правее. Следовательно,

$$\begin{aligned}
(\tilde{t}_{erl}(4))_{\alpha} &= [10 - (1 - \alpha) \cdot 1.5, 10 + (1 - \alpha) \cdot 3], \text{ где } l_4^{erl} = 1.5, r_4^{erl} = 3. \\
(\tilde{t}_{erl}(5))_{\alpha} &= \max \left\{ \left[ (t_{erl}(2) + t_{25}) - (1 - \alpha) \cdot (l_2^{erl} + l_{25}), (t_{erl}(2) + t_{25}) + (1 - \alpha) \cdot (r_2^{erl} + r_{25}) \right], \right. \\
&\quad \left. \left[ (t_{erl}(4) + t_{45}) - (1 - \alpha) \cdot (l_4^{erl} + l_{45}), (t_{erl}(4) + t_{45}) + (1 - \alpha) \cdot (r_4^{erl} + r_{45}) \right] \right\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 9 - (1 - \alpha) \cdot (1 + 1), 9 + (1 - \alpha) \cdot (1 + 1) \right], \right. \\
&\quad \left. \left[ 13 - (1 - \alpha) \cdot (1.5 + 1), 13 + (1 - \alpha) \cdot (3 + 1) \right] \right\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 9 - (1 - \alpha) \cdot 2, 9 + (1 - \alpha) \cdot 2 \right], \left[ 13 - (1 - \alpha) \cdot 2.5, 13 + (1 - \alpha) \cdot 4 \right] \right\}.
\end{aligned}$$

Сравнивая самые «широкие» интервалы при  $\alpha = 0$ , получим, что

$$\max \{ [9 - 2, 9 + 2], [13 - 2.5, 13 + 4] \} = \max \{ [7, 11], [10.5, 17] \} = [10.5, 17],$$

тогда  $(\tilde{t}_{erl}(5))_{\alpha} = [13 - (1 - \alpha) \cdot 2.5, 13 + (1 - \alpha) \cdot 4]$ , где  $l_5^{erl} = 2.5, r_5^{erl} = 4$ .



$$\begin{aligned}
(\tilde{t}_{erl}(6))_{\alpha} &= \max \left\{ \left[ (t_{erl}(2) + t_{26}) - (1-\alpha) \cdot (l_2^{erl} + l_{26}), (t_{erl}(2) + t_{26}) + (1-\alpha) \cdot (r_2^{erl} + r_{26}) \right], \right. \\
&\quad \left[ (t_{erl}(3) + t_{36}) - (1-\alpha) \cdot (l_3^{erl} + l_{36}), (t_{erl}(3) + t_{36}) + (1-\alpha) \cdot (r_3^{erl} + r_{36}) \right], \\
&\quad \left[ (t_{erl}(5) + t_{56}) - (1-\alpha) \cdot (l_5^{erl} + l_{56}), (t_{erl}(5) + t_{56}) + (1-\alpha) \cdot (r_5^{erl} + r_{56}) \right] \Big\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 6 - (1-\alpha) \cdot (1+1), 6 + (1-\alpha) \cdot (1+2) \right], \right. \\
&\quad \left[ 9 - (1-\alpha) \cdot (1+2), 9 + (1-\alpha) \cdot (2.5+0.5) \right], \\
&\quad \left. \left[ 15 - (1-\alpha) \cdot (2.5+1), 15 + (1-\alpha) \cdot (4+1) \right] \right\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 6 - (1-\alpha) \cdot 2, 6 + (1-\alpha) \cdot 3 \right], \left[ 9 - (1-\alpha) \cdot 3, 9 + (1-\alpha) \cdot 3 \right], \right. \\
&\quad \left. \left[ 15 - (1-\alpha) \cdot 3.5, 15 + (1-\alpha) \cdot 5 \right] \right\} = \left[ 15 - (1-\alpha) \cdot 3.5, 15 + (1-\alpha) \cdot 5 \right],
\end{aligned}$$

что следует из аналогичных рассуждений при  $\alpha = 0$ , здесь  $l_6^{erl} = 3.5$ ,  $r_6^{erl} = 5$ .

$$\begin{aligned}
(\tilde{t}_{erl}(7))_{\alpha} &= \max \left\{ \left[ (t_{erl}(5) + t_{57}) - (1-\alpha) \cdot (l_5^{erl} + l_{57}), (t_{erl}(5) + t_{57}) + (1-\alpha) \cdot (r_5^{erl} + r_{57}) \right], \right. \\
&\quad \left[ (t_{erl}(6) + t_{67}) - (1-\alpha) \cdot (l_6^{erl} + l_{67}), (t_{erl}(6) + t_{67}) + (1-\alpha) \cdot (r_6^{erl} + r_{67}) \right] \Big\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 19 - (1-\alpha) \cdot (2.5+2), 19 + (1-\alpha) \cdot (4+1) \right], \right. \\
&\quad \left[ 20 - (1-\alpha) \cdot (3.5+0.5), 20 + (1-\alpha) \cdot (5+2) \right] \Big\} = \\
&= \max \left\{ \left[ 19 - (1-\alpha) \cdot 4.5, 19 + (1-\alpha) \cdot 5 \right], \left[ 20 - (1-\alpha) \cdot 4, 20 + (1-\alpha) \cdot 7 \right] \right\} = \\
&= \left[ 20 - (1-\alpha) \cdot 4, 20 + (1-\alpha) \cdot 7 \right],
\end{aligned}$$

так как при  $\alpha = 0$  второй интервал находится правее первого, здесь  $l_7^{erl} = 4$ ,  $r_7^{erl} = 7$ .

Найденные ранние времена задаются интервальными числами, левые и правые границы которых зависят от параметра  $\alpha \in (0,1]$ , при этом чем ближе  $\alpha$  к 1, тем меньше уровень неопределенности; при  $\alpha = 1$  результаты расчетов совпадают с классическим случаем.

Выберем  $\alpha = 0.8$ , тогда ранние времена наступления событий определяются следующими интервальными числами:

$$\begin{aligned}
(\tilde{t}_{erl}(1))_{0.8} &= [0, 0.5 \cdot 0.2] = [0, 0.1]; \\
(\tilde{t}_{erl}(2))_{0.8} &= [2 - 0.2 \cdot 1, 2 + 0.2 \cdot 1] = [1.8, 2.2]; \\
(\tilde{t}_{erl}(3))_{0.8} &= [5 - 0.2 \cdot 1, 5 + 0.2 \cdot 2.5] = [4.8, 5.5]; \\
(\tilde{t}_{erl}(4))_{0.8} &= [10 - 0.2 \cdot 1.5, 10 + 0.2 \cdot 3] = [9.7, 10.6]; \\
(\tilde{t}_{erl}(5))_{0.8} &= [13 - 0.2 \cdot 2.5, 13 + 0.2 \cdot 4] = [12.5, 13.8]; \\
(\tilde{t}_{erl}(6))_{0.8} &= [15 - 0.2 \cdot 3.5, 15 + 0.2 \cdot 5] = [14.3, 16]; \\
(\tilde{t}_{erl}(7))_{0.8} &= [20 - 0.2 \cdot 4, 20 + 0.2 \cdot 7] = [19.2, 21.4].
\end{aligned}$$

Использование интервальной информации позволяет осуществить «мягкое» планирование работ проекта и оценить возможные отклонения. В приведенном примере критическое время определяется ранним временем завершающего события и равно  $(\tilde{T}_{crit})_{0.8} = (\tilde{t}_{erl}(7))_{0.8} = [19.2, 21.4]$ . Заметим, что найденные интервальные числа, определяющие

ранние времена наступления событий и критическое время, включают точные значения, полученные классическим алгоритмом, причем ширина интервалов вполне согласуется с приближенными исходными данными. Аналогичным образом определяются поздние времена наступления событий. Зная коэффициенты неопределенности, которые легко вычисляются для каждой оценки, можно перейти к представлению параметров нечеткими числами.

### 3.4 Практическое использование предложенного алгоритма

Для крупных организаций, обладающих значительными ресурсами, при управлении проектами целесообразно использовать существующие программные решения, но небольшие компании зачастую не могут себе позволить

дорогостоящее программное обеспечение, которое к тому же имеет избыточный функционал. Однако имея в своем портфеле даже несколько проектов, принятых к реализации, они сталкиваются с проблемой эффективного управления выполнением каждого из проектов и всей совокупности проектов с учетом имеющихся ресурсов и ограниченного времени. Для решения возникающих задач предложена *система управления проектами* в форме программной среды, в которой собраны инструменты выработки и реализации сбалансированных управленческих решений, охватывающих разные уровни и стадии управления проектами в данной организации. Особенностью системы является ее открытость и модульность, что позволяет дополнять программную среду новыми инструментами. В качестве базовых инструментов выбраны следующие: формирование мультипроектов и согласованное управление их реализацией; инструменты временного анализа проектов; разработка механизмов распределения ресурсов между проектами (между работами проекта) и их оптимизация на основе общего пула ресурсов; формирование команды проекта и механизмов стимулирования ее участников. Инструменты временного анализа проектов включают алгоритмы расчета временных параметров сетевого графика с учетом способа задания продолжительности выполнения работ проекта в том числе, если информация задается приближенно только для некоторых работ. Выбирая алгоритм и определяя параметры настройки, пользователь может сам сконструировать алгоритм расчета временных параметров проекта. Предложенный в данной статье алгоритм включен в комплекс алгоритмов для решения задачи календарного планирования, из которого пользователь осуществляет свой выбор. Его преимуществом является возможность оперативной корректировки плана на основе «сдвигов» работ в рамках найденных интервалов.

Рассмотрим пример. Торгово-развлекательные центры (ТРЦ) – относительно новый для нашей страны формат, дающий возможность приобрести товары различных категорий в одном месте, чередуя шопинг с развлечениями и посещениями кафе. Основная задача владельца ТРЦ – сдать объект в эксплуатацию и привлечь арендаторов, после чего центр начнет приносить доход без существенных затрат. Для строительства ТРЦ необходимо особенно тщательно провести расчеты, составить проект и сметную документацию, поскольку стартовые вложения очень велики. В табл. 2 представлены работы по строительству и вводу в эксплуатацию ТРЦ «Рябина», продолжительности работ заданы в форме нечетких чисел. На рис. 2 изображен сетевой график проекта, построенный по табл. 2.

Таблица 2 – Перечень работ и их продолжительностей

| Работа | Содержание                                                                      | Продолжительность, нед. | Предшествующие работы |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| A      | Анализ рынка недвижимости города                                                | (2,1,1)                 | -                     |
| B      | Выбор земельного участка                                                        | (6,1.3,1)               | A                     |
| C      | Разработка концепции торгового центра                                           | (4,1,0.2)               | B                     |
| D      | Заключение инвестиционного договора                                             | (4,1,0.7)               | C                     |
| E      | Получение кредита                                                               | (8,1,1)                 | D                     |
| F      | Внесение в госреестр, постановка на учет в налоговых и административных органах | (4,1,0.3)               | E                     |
| G      | Предброкеридж и внесение изменений в концепцию                                  | (5,1,0.5)               | C                     |
| H      | Разработка рабочей проектной документации                                       | (4,0.5,0.5)             | F                     |
| I      | Заказ и покупка оборудования                                                    | (6,0.4,0.8)             | G                     |
| J      | Подготовка стройплощадки и закладка фундамента                                  | (6,1.3,0.5)             | H                     |
| K      | Монтаж вертикальных стен, перекрытий и крыши                                    | (8,1,1.2)               | J                     |
| L      | Монтаж наружных сетей                                                           | (7,0.5,1)               | J                     |
| M      | Монтаж систем отопления, вентиляции и кондиционирования                         | (8,1,1.2)               | L                     |
| N      | Электромонтажные работы                                                         | (4,0.5,0.5)             | L                     |
| O      | Отделочные работы и дизайн интерьера                                            | (9,1,1)                 | M, N                  |
| P      | Установка оборудования                                                          | (3,0.6,0.4)             | O                     |
| Q      | Наем и обучение персонала                                                       | (8,0.5,1)               | O                     |
| R      | Брокеридж торгового центра                                                      | (2,0.4,0.4)             | P                     |
| S      | Проведение маркетинговой компании                                               | (2,1,0.5)               | O, P                  |
| T      | Подготовка к церемонии открытия                                                 | (1,0.5,0.5)             | Q, R                  |

Соответствие между работами из табл. 2 и дугами сетевого графика представлено в табл. 3.

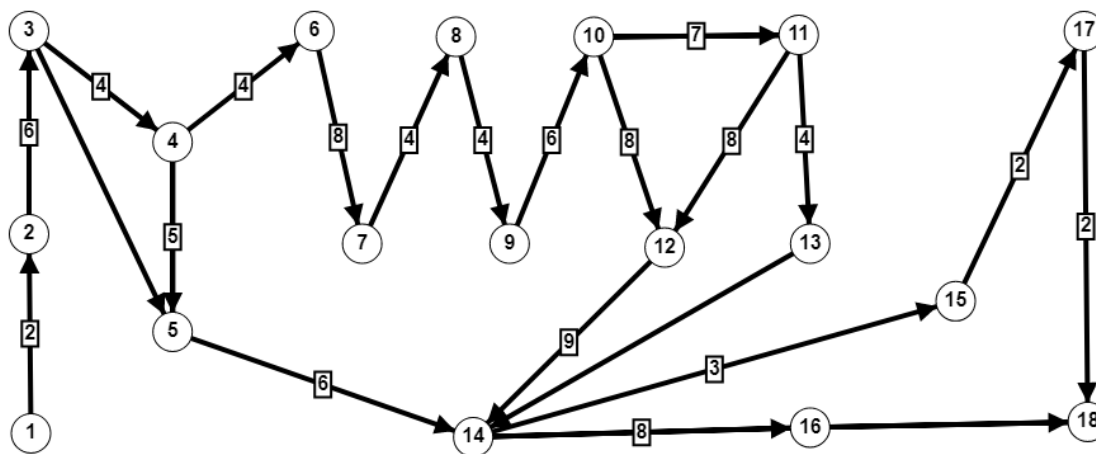


Рис. 2 – Сетевой график проекта

Таблица 3 – Соответствие между дугами и работами в сетевом графике

|   |       |   |       |   |         |   |         |   |         |
|---|-------|---|-------|---|---------|---|---------|---|---------|
| A | (1,2) | E | (6,7) | I | (5,14)  | M | (11,12) | Q | (14,16) |
| B | (2,3) | F | (7,8) | J | (9,10)  | N | (11,13) | R | (15,17) |
| C | (3,4) | G | (4,5) | K | (10,12) | O | (12,14) | S | (17,18) |
| D | (4,6) | H | (8,9) | L | (10,11) | P | (14,15) | T | (16,18) |

С использованием предложенного алгоритма найдены ранние и поздние времена наступления событий, при  $\alpha = 0.8$  найдено критическое время реализации проекта в форме интервального  $[68.4, 71.5]$ . Критический путь 1-2-3-4-6-7-8-9-10-11-13-14-16-18 определялся на основе модальных значений нечетких чисел. Оказалось, что большинство работ критические, а план является напряженным. Было принято решение об изменении продолжительности некоторых работ на основе перераспределения ресурсов.

### Заключение

Сложность современных проектов в различных сферах обуславливает использование моделей приближенной информации при определении временных параметров сетевой модели проекта. Разработанный аппарат интервальной арифметики позволяет достаточно просто реализовать операции над нечеткими числами, используя их  $\alpha$ -срезы. В статье предложен алгоритм расчета временных параметров сетевого графика в форме их  $\alpha$ -срезов. При подстановке конкретного значения  $\alpha$  формируется конкретное множество ранних и поздних времен наступления событий. Программная реализация расчетных формул позволит осуществить экспериментальную настройку параметра для конкретного проекта.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Кудрявцев Е. М. Методы сетевого планирования и управления проектом / Е. М. Кудрявцев. – Москва : ДМК Пресс, 2005. – 240 с.
2. Таха Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха. – Москва : Издательский Дом Вильямс, 2005. – 912 с.
3. Филлипс Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М. : Мир, 1984. – 496 с.
4. Балашов В.Г. Метод нечеткого критического пути / В. Г. Балашов, А.Ю. Заложнев // Управление большими системами. – Москва : ИПУ РАН, 2003. – Т. 3. – С. 5-10.
5. Леденева Т. М. Нечеткая модель проекта с продолжительностями работ в форме обобщенных гауссовых чисел / Т. М. Леденева, Д. А. Черменев // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2015. – № 2. – С. 72-81.
6. Шашкин А.И. Календарное планирование работ по проекту на основе нечетких исходных данных / А.И. Шашкин, М.М. Ширияев // Вестник СамГУ. Естественная серия. – Самара, 2008. – №3 (62). – С. 208-216.
7. Бурков В.Н. Теория графов в управлении организационными системами / В.Н. Бурков, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков. – М. : СИНТЕГ, 2001. – 124 с.
8. Леденева Т. М. Специальные главы математики. Прикладные дискретные модели / Т. М. Леденева. Воронеж : Издательство ВГТУ, 2000. – 134 с.
9. Леденева Т. М. Обработка нечеткой информации / Т. М. Леденева. – Воронеж: ВГУ, 2006. – 233 с.
10. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: БИНОМ, 2009. – 798 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kudryavtsev E.M. Metody setevogo planirovaniya i upravleniya proektom [Methods of network planning and project management] / E.M. Kudryavtsev. Moscow: DMK Press; 2005. 240 p. [in Russian]
2. Taha Kh. A. Vvedenie v issledovanie operacij [Introduction to operations research] / Kh. A. Taha.. Moscow: Williams Publishing House; 2005. 912 p. [in Russian]
3. Phillips D. Metody analiza setej [Methods of network analysis] / D. Phillips, A. Garcia-Diaz. Moscow: Mir; 1984. 496 p. [in Russian]

4. Balashov V.G. Metod nechetkogo kriticheskogo puti [Fuzzy critical path method] / V.G. Balashov, A.Yu. Zalozhnev // Upravlenie bol'shimi sistemami [Management of large systems]. Moscow: Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2003. Vol. 3. Pp. 5-10. [in Russian]
5. Ledeneva T.M. Nechetskaja model' proekta s prodolzhitel'nostjami rabot v forme obobshhennyh gaussovyh chisel [Fuzzy model of the project with duration of work in the form of generalised Gaussian numbers] / T.M. Ledeneva, D.A. Chermenev // Vestnik VGU. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii [Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and information technology]; 2015. No. 2. Pp. 72-81. [in Russian]
6. Shashkin A.I. Kalendarnoe planirovanie rabot po proektu na osnove nechetkih ishodnyh dannyh [Scheduling of work on the project based on fuzzy initial data] / A.I. Shashkin, M.M. Shiryaev // Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaja serija [Bulletin of Samara State University. Natural science series]; Samara. 2008. No. 3 (62). Pp. 208-216. [in Russian]
7. Burkov V.N. Teorija grafov v upravlenii organizacionnymi sistemami [Graph theory in the management of organisational systems] / V.N. Burkov, A. Yu. Zalozhnev, D.A. Novikov. Moscow: SINTEG; 2001. 124 p. [in Russian]
8. Ledeneva T.M. Special'nye glavy matematiki. Prikladnye diskretnye modeli [Specific chapters of mathematics. Applied discrete models] / T.M. Ledeneva. Voronezh: Voronezh State Technical University Publishing House; 2000. 134 p. [in Russian]
9. Ledeneva T.M. Obrabotka nechetkoj informacii [Processing of fuzzy information] / T.M. Ledeneva. Voronezh: Voronezh State University; 2006. 233 p. [in Russian]
10. Pegat A. Nечеткое моделирование и управление [Fuzzy modelling and control] / A. Pegat. Moscow: BINOM; 2009. 798 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.020>**ОСОБЕННОСТИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
НА ПРИМЕРЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Научная статья

**Немченко А.В.<sup>1,\*</sup>, Короткий Р.П.<sup>2</sup>, Ханин Ю.И.<sup>3</sup>, Лихолетов Е.А.<sup>4</sup>**  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия

\* Корреспондирующий автор (volgsnemchenko[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье обоснована необходимость развития возобновляемых источников энергии, где наиболее перспективным направлением определено строительство солнечных электростанций. Проведен анализ существующих мощностей на основе возобновляемой энергии в рамках всего Мирового хозяйства за последние годы, при этом установлены основные направления инновационного развития солнечной энергетики. По результатам исследования было выявлено наличие активной инновационной деятельности в области солнечной энергетики, определены основные ее преимущества как относительно традиционных способов выработки энергии, так и прочих возобновляемых источников энергии. Данное исследование позволило сделать вывод, что регулярному использованию экологически чистых источников энергии препятствуют существенные материальные затраты.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, возобновляемые источники энергии, инновация.**ASPECTS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES  
BASED ON SOLAR POWER PLANTS**

Research article

**Nemchenko A.V.<sup>1,\*</sup>, Korotkiy R.P.<sup>2</sup>, Khanin Yu.I.<sup>3</sup>, Likholetov E.A.<sup>4</sup>**  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russia

\* Corresponding author (volgsnemchenko[at]mail.ru)

**Abstract**

The article substantiates the necessity in developing renewable energy sources, where the construction of solar power plants are considered the most promising direction. The study conducts an analysis of the existing capacities based on renewable energy in the entire world economy in recent years, while also establishing the main directions of innovative development of solar energy. The results of the study determine the presence of active innovative activities in the field of solar energy, identifies its main advantages both in relation to traditional methods of energy generation and other renewable energy sources. This study allowed the authors to conclude that the regular use of environmentally friendly energy sources is hindered by significant material costs.

**Keywords:** solar power plant, renewable energy sources, innovation.**Введение**

Коррекция климатических условий, вызванная деятельностью человека, является одной из острых проблем, обсуждаемых на протяжении многих лет [1]. Наиболее серьезным фактором, который вызывает тревогу, является повышение уровня углекислого газа, который со времен промышленной революции начал стремительно увеличиваться. Так как развитие производства во многом сдерживалось дефицитом энергетических мощностей, который пытались восполнить, не взирая на создание экологических, социальных и даже экономических проблем. В итоге начиная с 1860-х годов потребление человеком ископаемого топлива повысило уровень углекислого газа с концентрации 290 ppm. до более чем 414,3 ppm. в 2020 году.

Параллельно с ростом уровня углекислого газа и наращиванием объемов выработки энергии традиционным способом ее дефицит не исчез, что стимулирует наращивание альтернативных способов ее выработки. Однако не только нехватка энергии уже существующих станций оказывает влияние на необходимость применения альтернативных источников энергии, но и невозможность природных запасов, таких как – нефть, природный газ и уголь, может поставить под сомнение их непрерывное использование. В результате того, что потребление природных запасов безостановочно растёт, согласно некоторым прогнозам население будет обеспечено нефтью и газом приблизительно 30 – 50 лет, а углем около 300 лет.

**Основная часть**

Возобновляемая энергетика в 2019 г. получила 176 ГВт мощности, что меньше количества мощности 179 ГВт, полученного за 2018 г. Но при этом она составляет 72 % от всей энергетической мощности, введенной в прошлом году в соответствии с данными Международного агентства возобновляемой энергии. Наибольший рост наблюдался в Азии, где мощности на основе возобновляемой энергии составили 54 % от всех, введенных в эксплуатацию. 70 % от всей введенной в эксплуатацию мощности энергоустановок в 2019 г. используют возобновляемые виды энергии, что характерно для всех регионов мира, кроме Африки и Ближнего Востока, где ввод мощностей на основе возобновляемых видов энергии составил 52 % и 26 % соответственно. Солнечная энергетика в 2019 г. увеличилась на 98 ГВт, 60 % солнечных электростанций установлено в Азии [2]. Солнечная и ветровая энергетика составляют более половины всей мощности электростанций, использующих возобновляемые виды энергии в мире, соответственно 623 ГВт и 586 ГВт. Гидроэнергетика, биоэнергетика, геотермальная и морская энергетика продемонстрировали скромное годовое увеличение в 12 ГВт, 6 ГВт, 700 МВт и 500 МВт. Отмечается, что Азия продолжает лидировать на рынке солнечной энергетики, увеличив мощности на 56 ГВт. Другими лидерами по расширению использования солнечной энергетики являются США, Германия, Австралия, Испания и Украина.

Первые шаги развития солнечных электростанций в России связывают с введением в эксплуатацию Кош-Агачской солнечной электростанции в 2014 г. Мощность данной электростанции 5 МВт. Солнечная энергетика до 2014 г. не превышала 2-3 МВт в России [3], [4]. После учета крымских солнечных электростанций мощность солнечной энергии в России увеличилась на 227,4 МВт в 2014 г. и на 179,7 МВт в 2015 г. К концу 2019 г. общая мощность солнечных электростанций в России достигла 1418 МВт, а доля солнечной энергии в установленной мощности электростанций Единой Энергетической Системы России достигла 0,55 %.

При всем этом для большинства обывателей отрасль солнечной энергетики по-прежнему продолжает выглядеть прорывом, совершенным за последние полтора десятилетия. Однако идея и начало развития солнечной энергетики насчитывает почти двести лет, что в значительной степени обуславливает необходимость ее модернизации на основе использования инновационных технологий [5].

Важной задачей увеличения эффективности использования солнечных электростанций является создание аккумулирующих устройств. Создаются новые типы химических аккумуляторов и гравитационных накопителей энергии. Разрабатываются каталитические методы получения водорода от солнечной электростанции с последующей подачей водорода в трубопроводную систему и резервуары природного газа. Абсолютным решением проблемы круглосуточного и круглогодичного использования солнечной энергии без аккумулирующих устройств является, предложенная русскими учеными глобальная солнечная энергосистема из трех электростанций мощностью 2,5 ТВт, площадью 200×200 км каждая, установленных в пустынях Австралии, Африки и Латинской Америки и соединенная с национальными энергосистемами с помощью резонансных однопроводных высокочастотных линий.

Объединенные Арабские Эмираты в Дубае открыли новый центр исследований и разработок на базе Солнечного парка имени Мохаммеда ибн Рашид аль-Мактума. В частности, новая организация занимается разработками по влиянию климатических условий пустыни на работу солнечных модулей и других компонентов солнечной электростанции. Центр включает в себя лабораторию, исследующую электрические характеристики, лабораторию механических характеристик, лабораторию материалов, лабораторию имитации Солнца, лабораторию для исследования ускоренных испытаний солнечных электростанций [6].

В немецком Институте солнечных энергетических систем имени Фраунгофера созданы новые способы внедрения датчиков механического напряжения и температуры в поверхность солнечных элементов фотоэлектрического модуля. Сведения, собранные сенсорами, позволяют следить за уровнем разрушения, деградации поверхности солнечных элементов во времени и получать информацию о коэффициенте полезного действия модуля в зависимости от его температуры. Группа ученых отметила, что новые устройства размещаются без проблем на двух сторонах солнечных элементов. Принцип действия датчиков напряженности основан на пьезорезистивном эффекте: сенсор отвечает на механическое напряжение, изменяя свое электрическое сопротивление. Приборы благополучно работали в диапазоне температур от -35 °C до +85 °C. Исследователи сообщили, что устройства были проверены при испытаниях в ходе 145 температурных циклов.

Компания «Хевел» впервые в России построила Бурзянскую солнечную электростанцию с промышленными накопителями электроэнергии. Мощность данной станции 10 МВт, система накопления электроэнергии имеет мощность 8 МВт. Станция может работать автономно и параллельно с сетью электроснабжения. Бурзянская солнечная электростанция имеет способность в течение 6 часов снабжать автономно электроэнергией больницы, школы, детские сады и другие социальные объекты Бурзянского района Республики Башкортостан [7]. В представленной станции используются современные технические разработки в виде аккумуляторных ячеек «Лиотех» емкостью 300 А·ч.

Еще одним инновационным прорывом в области солнечной энергетики можно считать разработку научно-технического центра тонкопленочных технологий в энергетике Российской Федерации, исследователям которого удалось создать коммерчески выгодные структуры АЗВ5 на кремниевой подложке [8]. Ученые сообщают, что получили верхний слой солнечного элемента, интегрированный на кремниевое основание, где при увеличении фотоактивных слоев повысится эффективность солнечного элемента, так как каждый новый слой будет более полно поглощать свою часть солнечного спектра.

## Заключение

Проведенный анализ свидетельствует о наличии активной инновационной деятельности в области солнечной энергетики. Однако регулярному использованию экологически чистых источников энергии препятствуют существенные материальные затраты. Тем более, в настоящее время, традиционно получаемая энергия значительно дешевле солнечной. Тем не менее, использование последних, современных разработок и достижений в области возобновляемой энергии позволило сделать заявление о формировании наименьшей цены для солнечной электроэнергии, которая составила 0,0355 евро за кВт·ч. Данная цена была получена при проведении тендера в Германии по фотоэлектрическим проектам мощностью от 750 кВт до 10 МВт.

К тому же, нельзя забывать о главном преимуществе альтернативных источников энергии – их постоянной возобновляемости, которая фактически сделает энергию лучшей в своём роде. Исходя из этого, альтернативные источники энергии привлекают в первую очередь своей экологичностью и незначительным ущербом для окружающей среды [9], а также возобновляемостью природного сырья. Следовательно, при использовании альтернативных источников энергии, таких как солнечная энергетика, можно добиться значительного снижения потребности в природных запасах, тем самым замедлить темпы их добычи, что даст возможность отложить начало энергетического кризиса.

Помимо отмеченных фактов, возобновляемые источники энергии наиболее хорошо подходят для районов без единой мощной энергосети, что может значительно повысить энергодоступность. Особенно прискорбно констатировать данную проблему в условиях перехода к шестому технологическому укладу, когда получает распространение использование нано- и биотехнологий, стволовых клеток, клеточной и ядерной технологий и т.д. Так, по оценке Всемирного банка, около 13 % населения Земли не имеют доступа к электричеству.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Садовников М. А. Анализ состояния экологической безопасности и техногенной нагрузки, оказываемой сельскохозяйственным предприятием на окружающую среду / М. А. Садовников, А. А. Рыжкова, В. Ю. Мисюржев и др. // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – 1 (53). – С. 377-385.
2. Макаров С. В. Возможности продвижения солнечных электростанций (СЭС) на территории Российской Федерации / С. В. Макаров // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 15 (49). – С. 273-275.
3. Веселова Н. М. Оптимизация эффективности работы солнечных фотоэлектрических панелей на примере Волгоградской области / Н. М. Веселова, А. П. Панчишкин, Ю. И. Ханин // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – № 3 (39). – С. 35-41.
4. Даус Ю. В. Ресурсный потенциал солнечной энергии для установок, использующих ее в системе энергоснабжения потребителей г. Волжского / Ю. В. Даус, Н. М. Веселова, И. В. Юдаев и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 129. – С. 297-307.
5. Веселова Н. М. Оценка эффективности солнечного коллектора при разных углах изгиба абсорбера / Н. М. Веселова, Ю. В. Красносельский, И. О. Плотницкий // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 4 (37). – С. 100-106.
6. Сабитов С. Е. Участие солнечных электростанций в покрытии дневного максимума нагрузки / С. Е. Сабитов, И. А. Муратаев // Интернаука. – 2020. – № 22-2 (151). – С. 20-25.
7. Макаров С. В. Развитие ВИЭ на базе солнечных электростанций на территории современной России / С. В. Макаров // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 15 (49). – С. 195-197.
8. Мирончук В. И. Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии / В. И. Мирончук, А. А. Вельченко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64. № 1. – С. 15-26.
9. Мелихов В. В. Характер и направленность изменений климатических параметров Волгоградской области / В. В. Мелихов, А. А. Зибаров, Н. П. Мелихова и др. // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – 1 (53). – С. 60-67.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Sadovnikov M. A. Analiz sostojanija jekologicheskoy bezopasnosti i tehnogennoj nagruzki, okazyvaemoj sel'skohozjajstvennym predprijatiem na okružhajushhuju sredu [Analysis of the state of environmental safety and technogenic load exerted by an agricultural enterprise on the environment] / M. A. Sadovnikov, A. A. Ryzhkova, V. Ju. Misjurjaev et al. // Izvestija nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Nizhnevolzhsky agrouniversitetskiy complex: science and higher professional education]. – 2019. – 1 (53). – P. 377-385. [in Russian]
2. Makarov S. V. Vozmozhnosti prodvizhenija solnechnyh jelektrostantsij (SJeS) na territorii Rossijskoj Federacii [Opportunities for promoting solar power plants (SES) on the territory of the Russian Federation] / S. V. Makarov // Nauchnyj jelektronnyj zhurnal Meridian [Scientific electronic Journal Meridian]. – 2020. – № 15 (49). – P. 273-275. [in Russian]
3. Veselova N.M. Optimizacija jeffektivnosti raboty solnechnyh fotojelektricheskikh panelej na primere Volgogradskoj oblasti [Optimization of the efficiency of solar photovoltaic panels on the example of the Volgograd region] / N. M. Veselova, A. P. Panchishkin, Ju. I. Hanin // Vestnik agrarnoj nauki Dona [Bulletin of Agrarian Science of the Don]. – 2017. – № 3 (39). – P. 35-41. [in Russian]
4. Daus Ju. V. Resursnyj potencial solnechnoj jenerгии dlja ustanovok, ispol'zujushhih ee v sisteme jenergosnabzhenija potrebitelej g. Volzhskogo [Resource potential of solar energy for plants using the energy supply system of consumers in the Volga region] / Ju. V. Daus, N. M. Veselova, I. V. Judaev et al. // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University]. – 2017. – № 129. – P. 297-307. [in Russian]
5. Veselova N. M. Ocenka jeffektivnosti solnechnogo kollektora pri raznyh uglah izgiba absorbera [Evaluation of the efficiency of the solar collector at different angles of bending of the absorber] / N. M. Veselova, Ju. V. Krasnosel'skij, I. O. Plotnickij // Jeletrotehnologii i jelektrooborudovanie v APK [Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex]. – 2019. – № 4 (37). – P. 100-106. [in Russian]
6. Sabitov S. E. Uchastie solnechnyh jelektrostantsij v pokrytii dnevnogo maksimuma nagruzki [Participation of solar power plants in covering the daily maximum load] / S. E. Sabitov, I. A. Murataev // Internauka [Internauka]. – 2020. – № 22-2 (151). – P. 20-25. [in Russian]
7. Makarov S. V. Razvitie VIJe na baze solnechnyh jelektrostantsij na territorii sovremennoj Rossii [Development of renewable energy sources on the basis of solar power plants in the territory of modern Russia] / S. V. Makarov // Nauchnyj jelektronnyj zhurnal Meridian [Scientific electronic journal "Meridian"]. – 2020. – № 15 (49). – P. 195-197. [in Russian]
8. Mironchuk V. I. Povyshenie koeficienta poleznogo dejstvija solnechnyh jenergeticheskikh ustanovok za schet lokalizacii solnechnoj jenerгии [Improving the efficiency of solar power plants by localizing solar energy] / V. I. Mironchuk, A. A. Vel'chenko // Jenergetika. Izvestija vysshix uchebnyh zavedenij i jenergeticheskikh obedinenij SNG [Power engineering. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS]. – 2021. – Т. 64. № 1. – P. 15-26. [in Russian]
9. Melihov V. V. Harakter i napravlennost' izmenenij klimaticheskikh parametrov Volgogradskoj oblasti [Character and direction of changes in the climatic parameters of the Volgograd region] / V. V. Melihov, A. A. Zibarov, N. P. Melihova et al. // Izvestija nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Nizhnevolzhsky agrouniversitetskiy complex: science and higher professional education]. – 2019. – 1 (53). – P. 60-67. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.021>**ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАГЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ СВИНОКОМПЛЕКСОВ КАК СПОСОБА СОКРАЩЕНИЯ ДОБЫЧИ КАЛИЙНЫХ РУД**

Научная статья

Новикова Д.А.<sup>1,\*</sup>, Шумская И.Ю.<sup>2</sup>, Андреева А.Н.<sup>3</sup>, Грибут Е.А.<sup>4</sup>, Колесникова Т.А.<sup>5</sup>, Куликова М.А.<sup>6</sup><sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-2535-9269;<sup>6</sup> ORCID: 0000-0003-4000-0040;<sup>1-6</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

\* Корреспондирующий автор (diananovikova3773[at]gmail.com)

**Аннотация**

В статье рассмотрены основные затраты на экологическую и экономическую составляющие и проведен анализ предотвращенного экологического ущерба при добыче калийных руд. Предложен новый подход для оценки эколого-экономической эффективности реагентной обработки жидких отходов с получением органоминерального удобрения. Представлены новые интегральные оценочные методы для определения предотвращенных экологических ущербов и расчета степени уменьшения негативного воздействия на водные объекты, воздух и земельные ресурсы горного предприятия, добывающего минеральное сырье для производства калийных удобрений. Были проведены расчёты по возможности предотвращения ущерба земельным ресурсам, который составил около 42 млн. руб. за 15 лет добычи калийсодержащего сырья.

**Ключевые слова:** экологическая оценка, воздействия на окружающую среду, органоминеральные удобрения, калийсодержащие удобрения.

**AN ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF REAGENT TREATMENT OF LIQUID WASTE ON PIG FARMS AS A WAY OF REDUCING THE PRODUCTION OF POTASH ORES**

Research article

Novikova D.A.<sup>1,\*</sup>, Shumskaya I.Yu.<sup>2</sup>, Andreeva A.N.<sup>3</sup>, Gribut E.A.<sup>4</sup>, Kolesnikova T.A.<sup>5</sup>, Kulikova M.A.<sup>6</sup><sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-2535-9269;<sup>6</sup> ORCID: 0000-0003-4000-0040;<sup>1-6</sup> Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

\* Corresponding author (diananovikova3773[at]gmail.com)

**Abstract**

The current article examines the main costs of environmental and economic components and analyzes the prevented environmental damage during the extraction of potash ores. The study proposes a new approach for evaluating the ecological and economic efficiency of reagent treatment of liquid waste during the production of organomineral fertilizer. The authors present new integrated assessment methods for determining the prevented environmental damage and calculating the degree of reduction of the negative impact on water bodies, air, and land resources of a mining enterprise that extracts mineral raw materials for the production of potash fertilizers. Also, the research contains calculations on the possibility of preventing damage to land resources, which amounted to close to 42 million rubles for 15 years of production of potassium-containing raw materials.

**Keywords:** environmental assessment, environmental impacts, organomineral fertilizers, potash-containing fertilizers.

**Введение**

Добыча полезных ископаемых очень важна для производства товаров, услуг и инфраструктуры. Однако возможная опасность отходов, образующихся при добыче полезных ископаемых, отвалах и хвостохранилищах, требует поиска средств правовой защиты для рационального отношения к горным отходам из шахтных отвалов, хвостохранилищ и заброшенных шахт. Повторное использование и переработка шахтных отходов в горнодобывающей промышленности может принести экономически эффективные выгоды за счет компенсации потребностей в сырье и уменьшения объемов отходов, подлежащих обращению [1], [2].

Калийные удобрения является критически важным элементом сельскохозяйственного производства, при этом большие запасы калийных удобрений сосредоточены только в нескольких странах, поэтому нехватка калийных удобрений может привести к низкой производительности сельского хозяйства, что во многих случаях может вызвать недоедание, а в крайних случаях – голод [3].

Воздействие горно-обогатительного промышленного производства весьма отрицательно влияет на окружающую природную среду. Большое количество производственных процессов рассчитано на использование природных ресурсов. Зачастую промышленное производство не рассматривает технологию создания товарного продукта в рамках системного подхода к проблеме рационального использования природных ресурсов региона, где это производство располагается и ресурсы которого использует [4].

Ущерб, наносимый природе при производстве и потреблении продукции - результат природопользования без рационального подхода. В связи с этим возникла объективная необходимость в установлении взаимосвязей между результатами хозяйственной деятельности, экологическими характеристиками выпускаемой продукции и технологией ее производства. Одной из причин, по которой трудно выявить эти взаимосвязи, является отсутствие разграничения затрат, связанных с реализацией технологических процессов в целом с одной стороны и, с другой стороны, с затратами, направленными на:

1. выпуск продукции определенного уровня экологического качества;
2. сокращение производственных отходов;
3. рациональность использования природного сырья из недр;



4. замену технологии или продукта другим, более экологичным.

В России эколого-экономическая оценка проектов реализуется лишь на уровне определения расходов на природоохранные мероприятия и определения величины прямого вреда и прямой стоимости природных ресурсов. На данный момент практически отсутствуют методики, по которым можно было бы дать оценку экологическому совершенству технологий, с учетом числа всех отходов, комплексности применения ресурсов и т.д [5].

Не является исключением и оценка экологически ориентированных технологий утилизации жидких отходов свиноводческих комплексов [6]. При их реализации не учитывается ни косвенная стоимость природных ресурсов, ни стоимость их хранения и переработки. Не делается анализ внешних эффектов от технологии (как положительных, так и отрицательных), и они не включаются в определение оценки результативности технологий и проектов в целом. А именно учет таких факторов помогает увидеть реальную ценность технологии или ее истинный урон окружающей среде и обществу в целом.

### Основная часть

Весьма интересным с этой точки зрения является вопрос о разработке нового подхода для оценки эколого-экономической эффективности реагентной обработки жидких отходов с получением органоминерального удобрения [7].

Жидкие отходы свинокомплексов являются ценным вторичным ресурсом с высоким содержанием калия, фосфора и азота. Использование их на участках орошения дает возможность существенно уменьшить добычу минерального сырья для получения калийных и фосфатных удобрений, а также сократить объемы производства азотных удобрений [8], [9], [10].

Представлены новые оценочные методы для определения предотвращенных экологических ущербов и расчета степени уменьшения негативного воздействия на такие природные составляющие, как водные объекты, воздух и земельные ресурсы горного предприятия, добывающих минеральное сырье для производства калийных удобрений.

Был проведен анализ прогнозируемого снижения негативного влияния на окружающую природную среду при снижении добычи калийсодержащего сырья в процессе заимствования обработанных жидких отходов свинокомплексов для расчетных площадей орошения 0,5-100 тыс. га. Предложена дифференцированная система оценки предотвращенного ущерба (рис.1). В расчетах использованы данные исследований, представленные в [11]. За основу взят математический расчетный метод оценки, подробно описанный в [11].

Начальными величинами для осуществления расчета возможного предотвращенного ущерба земельным ресурсам при уменьшении добычи калийного сырья являлись: число калийных удобрений по  $K_2O$ , нужное для внесения на расчетную площадь ( $35 \div 10$  тыс. т), высота отвального массива, устойчивый угол откоса, сумма валового продукта с 1 га земли, урожайность различных культур на рекультивируемой земле, цена 1 м<sup>3</sup> чистой воды для орошения, расчетное время - 15 лет.

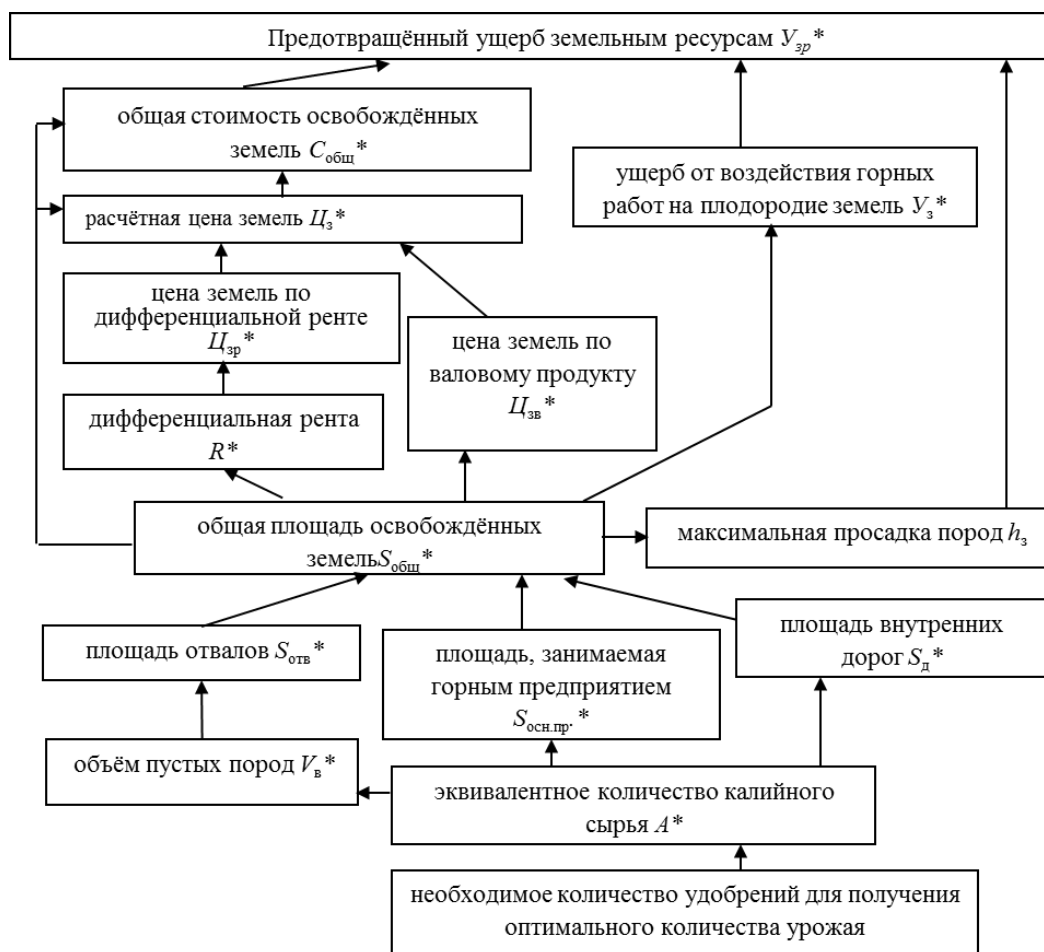


Рис. 1 – Структура определения предотвращенного ущерба земельным ресурсам при сокращении добычи калийного сырья

На рисунке 2 представлены результаты расчетов стоимости земель нарушенных горно-обогатительным промышленным производством и предотвращенного ущерба земельным ресурсам при уменьшении объемов добычи калийного сырья.

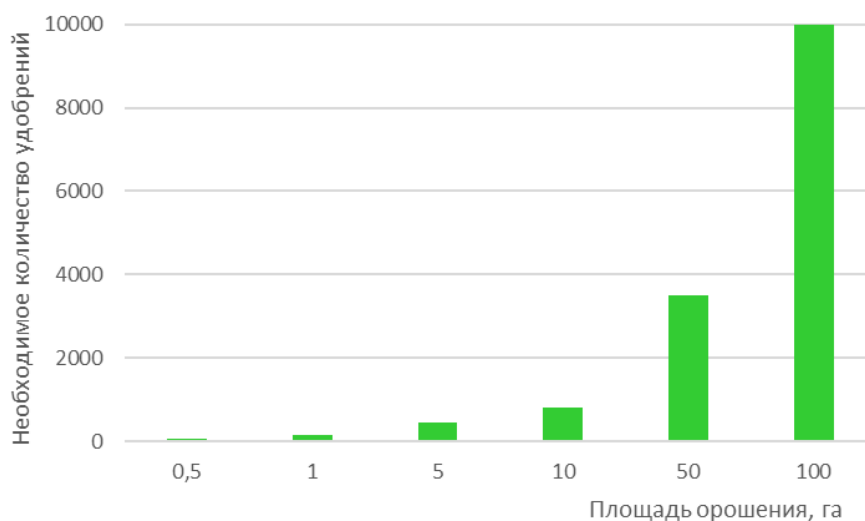


Рис. 2.1 – Стоимость выводимых из горного отвода земель при различных площадях орошения: необходимое количество удобрений

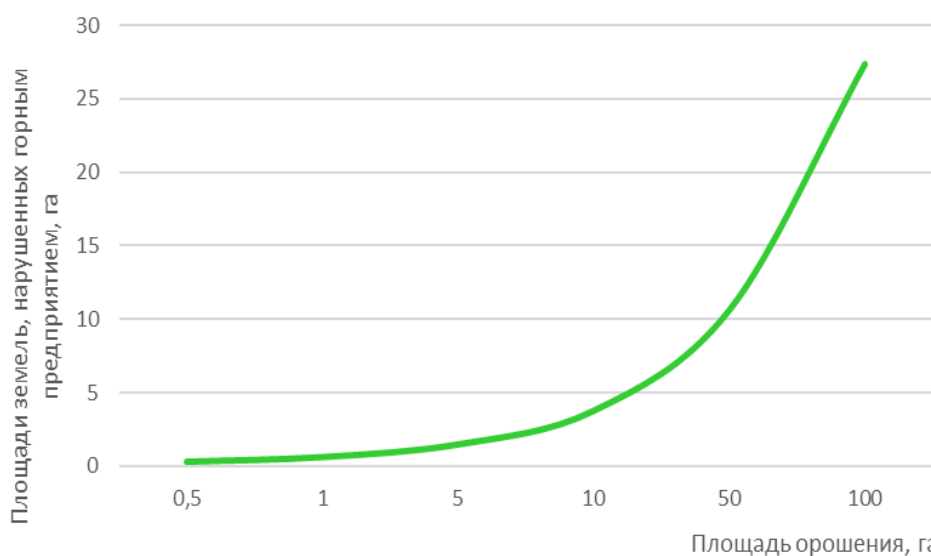


Рис. 2.2 – Стоимость выводимых из горного отвода земель при различных площадях орошения: площадь нарушенных земель

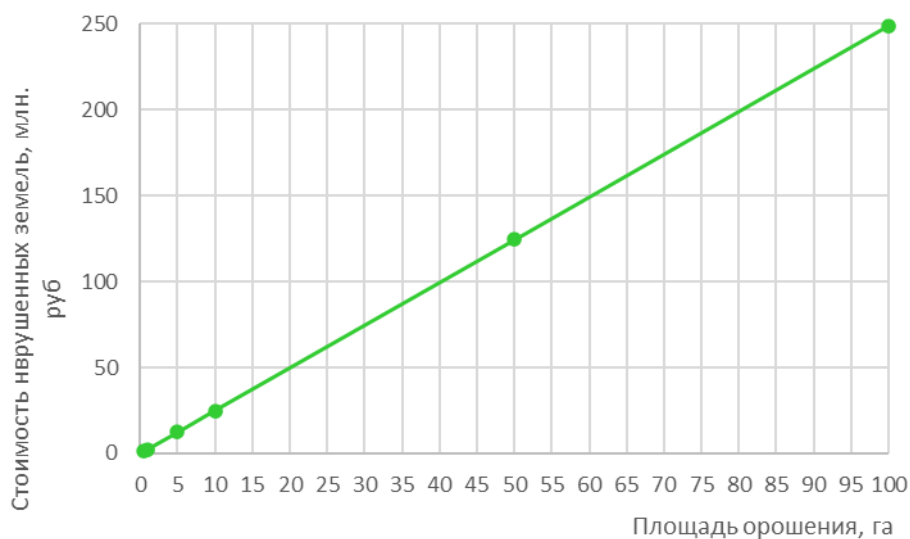


Рис. 2.3 – Стоимость выводимых из горного отвода земель при различных площадях орошения: общая стоимость нарушенных земель

Анализ полученных данных показывает, что при добыче калийного сырья площадь нарушенных земель изменялась от 0,25 га до 27,39 га, а их стоимость – от 1,245 млн. руб. до 248,94 млн. руб. в зависимости от расчетной площади участков орошения.

В результате сокращения добычи калийного сырья, предотвращенный ущерб по земельным ресурсам (без учета стоимости нарушенных земель) изменялся с 3,091 млн. руб. на 500 га до 600 млн. руб. на площади 100 тыс. га.

Устраненные ущербы водной и воздушной средам при сокращении добычи калий содержащего сырья в зависимости от планируемой площади орошения представлены на рис.3.

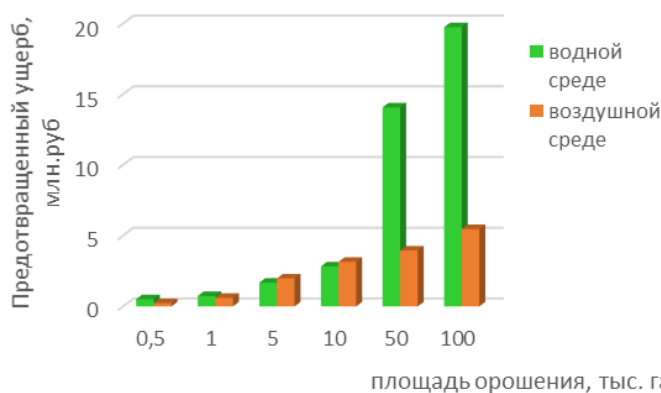


Рис. 3 – Предотвращенные годовые ущербы воздушной и водной средам при сокращении добычи калийсодержащего сырья: предотвращенный ущерб за 15 лет

Анализ полученных результатов показал, что при сокращении добычи калийсодержащего сырья предотвращенный ущерб водным объектам изменялся с 0,51 до 19 млн.740 тыс. руб., предотвращенный ущерб атмосфере с 0,23 до 5,47 млн. руб. в год.

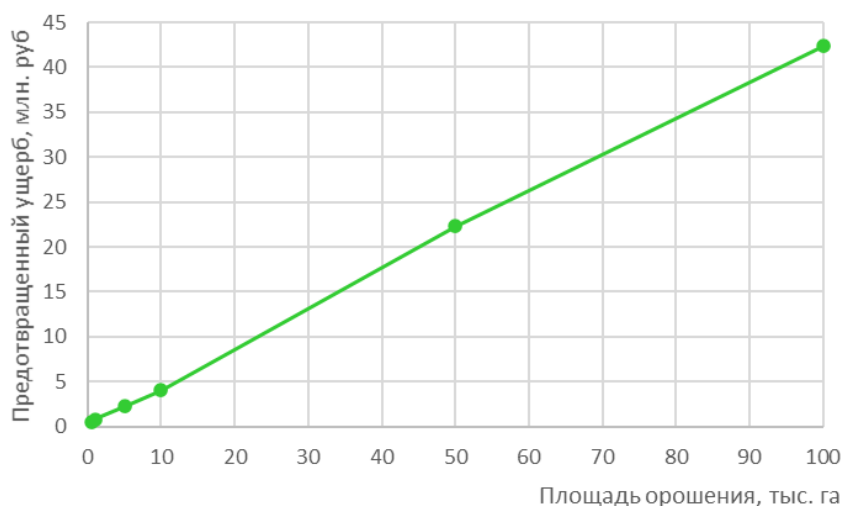


Рис. 4 – Предотвращенный ущерб окружающей среде за 15 лет

Суммарный устраненный ущерб окружающей среде за 15 лет (рис. 4) при сокращении добычи калийсодержащего сырья возрастал в интервале расчетных площадей 0,5-100 тыс. га с 0,51 до 42,34 млн. руб.

#### Заключение

Провели анализ существующих подходов и разработку нового способа оценки эколого-экономической эффективности реагентной обработки жидких отходов с получением органоминерального удобрения. Представленный алгоритм расчета предотвращенного ущерба земельным ресурсам позволит учитывать стоимость земель, выводимых из отвалов горных пород. Предложенная авторами оценка дает возможность говорить о перспективности и эколого-экономической целесообразности реагентной обработки жидких отходов свинокомплексов с целью их дальнейшей утилизации и требует разработки нового комплексного подхода к определению их ценности.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Agboola O. A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management / O. Agboola, D.E. Babatunde, O.S.I. Fayomi et al. // Results in Engineering V. 8, December 2020, 100181.
2. Boldy R. Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review / R. Boldy, T. Santini, M. Annandale et al. // The Extractive Industries and Society, V. 8, Issue 1, March 2021, Pages 457-466
3. Al Rawashdeh R. World peak potash: An analytical study / R. Al Rawashdeh // Resources Policy, V. 69, December 2020, 101834.

4. Canedo-Arguelles M. Effects of potash mining on river ecosystems: An experimental study / M. Canedo-Arguelles, S. Brucet, S. Carrasco et al. // *Environmental Pollution*, V. 224, May 2017, Pages 759-770.
5. Щербакowa Л.М. Эколого-экономические аспекты освоения техногенных минеральных ресурсов / Л.М. Щербакowa, Н.В. Федотова, Е.В. Зелинская // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2009. – № 7. – С. 76;
6. Суржко О.А., Куликова М.А. Экологическая безопасность при переработке и утилизации концентрированных по биогенным элементам жидких отходов промышленных предприятий: монография / О.А. Суржко, М.А. Куликова. Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ).- Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) 2011. 140с.
7. Колесникова Т.А. Способ подготовки сточных вод свиноводческих комплексов для сельскохозяйственного использования: Пат. 2706971 Российская Федерация, МПК C02F 1/52 (2006.01), C02F 1/58 (2006.01) / Колесникова Т.А.; Куликова М.А., Грибут Е.А., Суржко О.А.; Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. - № 2018131280.
8. Kolesnikova T. A. Ammophos efficiency application for treatment highly concentrated by biogenic elements wastes of agro-industrial complexes / T. A. Kolesnikova, M. A. Kulikova, E. A. Grie // *EurAsian Journal of BioSciences* - 2020. - Vol. 14, Is. 1. - P. 829-834.
9. Gribut E. A. Research of the oxalic acid effectiveness in the treatment of biodegradable organic waste from livestock complexes / E. A. Gribut, M. A. Kulikova, O.A. Surzhko et al. // *EurAsian Journal of BioSciences* - 2020. - Vol. 14, Is. 1. - P. 575-579.
10. Kulikova M.A. Research on waste management technologies in meat clusters / M. A. Kulikova, T. A. Kolesnikova, E. A. Gribut et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* - 2020. - Vol. 421 (2) : 2nd International Scientific Conference «AGRITECH-II-2019: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies» 13–14 November 2019, Krasnoyarsk, Russia. - №022064. - [Electronic resource]. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/421/2/022064/pdf> (accessed 12.05.2021)
11. Суржко О.А. Эколого-экономическая оценка предотвращенных экологических ущербов от сокращения добычи калий содержащей ру-ды при утилизации животноводческих стоков на оросительных системах сточных вод / О.А. Суржко, М.А. Федорченко // *Ресурсы недр России: Экономика и геополитика, геотехнологии и гео-экология, литосфера и геотехника: Сб. материалов науч.-практ. конф.,- Пен-за, 2002. - С.150-15*

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Agboola O. A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management / O. Agboola, D.E. Babatunde, O.S.I. Fayomi et al. // *Results in Engineering* V. 8, December 2020, 100181.
2. Boldy R. Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review / R. Boldy, T. Santini, M. Annandale et al. // *The Extractive Industries and Society*, V. 8, Issue 1, March 2021, Pages 457-466
3. Al Rawashdeh R. World peak potash: An analytical study / R. Al Rawashdeh // *Resources Policy*, V. 69, December 2020, 101834.
4. Canedo-Arguelles M. Effects of potash mining on river ecosystems: An experimental study / M. Canedo-Arguelles, S. Brucet, S. Carrasco et al. // *Environmental Pollution*, V. 224, May 2017, Pages 759-770.
5. Shcherbakova L. M. Jekologo-jekonomicheskie aspekty osvoenija tehnogennyh mineral'nyh resursov [Ecological and economic aspects of the development of technogenic mineral resources] / L.M. Shcherbakova, N.V. Fedotova, E.V. Zelinskaja // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh [International Journal of Applied and Fundamental Research]*. - 2009. - No. 7. - p. 76; [in Russian]
6. Surzhko O. A. Jekologicheskaja bezopasnost' pri pererabotke i utilizacii koncentrirovannyh po biogennym jelementam zhidkih othodov promyshlennyh predpriyatij: monografija [Ecological safety at processing and utilization of liquid waste of industrial enterprises concentrated on biogenic elements: monograph] / O.A. Surzhko, M.A. Kulikova. // *Juzh.-Ros. gos. tehn. un-t (NPI) [South-Russian State Polytechnic University. un-t (NPI)]*. - Novocherkassk: SRSPU (NPI) 2011. 140с. [in Russian]
7. Kolesnikova T. A. Sposob podgotovki stochnyh vod svinovodcheskih kompleksov dlja sel'skhozajstvennogo ispol'zovanija: Pat. 2706971 Rossijskaja Federacija, MPK C02F 1/52 (2006.01), C02F 1/58 (2006.01) [Method of preparing wastewater from pig-breeding complexes for agricultural use: Pat. 2706971 Russian Federation, IPC C02F 1/52 (2006.01), C02F 1/58 (2006.01)] / Kolesnikova T. A.; Kulikova M. A., Gribut E. A. et al.; South-Russian State Polytechnic University. M. I. Platov National Research University (NPI). - No. 2018131280; declared on 29.08.2018 ; published on 21.11.2019, Byul. No. 33-2019. [in Russian]
8. Kolesnikova T. A. Ammophos efficiency application for treatment highly concentrated by biogenic elements wastes of agro-industrial complexes / T. A. Kolesnikova, M. A. Kulikova, E. A. Grie // *EurAsian Journal of BioSciences* - 2020. - Vol. 14, Is. 1. - P. 829-834.
9. Gribut E. A. Research of the oxalic acid effectiveness in the treatment of biodegradable organic waste from livestock complexes / E. A. Gribut, M. A. Kulikova, O.A. Surzhko et al. // *EurAsian Journal of BioSciences* - 2020. - Vol. 14, Is. 1. - P. 575-579.
10. Kulikova M.A. Research on waste management technologies in meat clusters / M. A. Kulikova, T. A. Kolesnikova, E. A. Gribut et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* - 2020. - Vol. 421 (2) : 2nd International Scientific Conference «AGRITECH-II-2019: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies» 13–14 November 2019, Krasnoyarsk, Russia. - №022064. - [Electronic resource]. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/421/2/022064/pdf> (accessed 12.05.2021)
11. Surzhko O. A. Jekologo-jekonomicheskaja ocenka predotvrashhennyh jekologicheskikh ushherbov ot sokrashhenija dobychi kalij sodержashhej ru-dy pri utilizacii zhivotnovodcheskih stokov na orositel'nyh sistemah stoch-nyh vod [Ecological and economic assessment of the prevented ecological damages from reduction of production of potassium-containing ore at utilization of livestock effluents on irrigation systems of waste waters] / O.A. Surzhko, M.A. Fedorchenko // *Resursy neдр Rossi: Jekonomika i geopolitika, geotekhnologii i geo-jekologija, litosfera i geotekhnika: Sb. materialov nauch.-prakt. Konf [Mineral resources of Russia: Economics and Geopolitics, geotechnologies and geo-ecology, lithosphere and Geotechnics: Collection of materials of the Scientific and Practical Conference]*, Pen-za, 2002, p. 150-15 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.022>**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН ВАГОНА ТРАМВАЯ «ЧАЙКА»**

Научная статья

**Орехов В.В.<sup>1</sup>, Аббасов И.Б.<sup>2,\*</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-4805-8714;<sup>1,2</sup> Южный федеральный университет, Инженерно-технологическая академия, Таганрог, Россия

\* Корреспондирующий автор (iftikhar\_abbasov[at]mail.ru)

**Аннотация**

Данная работа посвящена разработке концептуальной модели нового трамвайного вагона. Сделан исторический обзор, оценено современное состояние вопроса, приведены характеристики популярных эксплуатируемых марок трамваев, представлены некоторые современные концепции новых трамвайных вагонов, описаны современные публикации, посвященные данной теме. На основе анализа сформулирована задача проектирования, представлены эскизные модели, выбрана концепция дизайна изделия с учетом эргономических норм. Обозначены этапы трехмерного моделирования изделия, выбрана трехмерная среда моделирования, на основе метода полигонального моделирования создан корпус вагона. Приведены особенности присвоения материалов на основе полигональной сетки объекта. Для визуализации трехмерной сцены использованы источники освещения V-RayLight. В качестве итоговой сцены показана визуализация тонированной трехмерной модели предложенной концепции вагона трамвая.

**Ключевые слова:** концептуальное моделирование, вагон трамвая, эскизы, эргономика, проекционные чертежи, трехмерное моделирование, метод полигонального выдавливания, создание материалов, установка освещения, визуализация.

**CONCEPTUAL DESIGN OF THE "CHAIKA" TRAM CAR**

Research article

**Orekhov V.V.<sup>1</sup>, Abbasov I.B.<sup>2,\*</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-4805-8714;<sup>1,2</sup> Southern Federal University, Academy of Engineering and Technology, Taganrog, Russia

\* Corresponding author (iftikhar\_abbasov[at]mail.ru)

**Abstract**

The article discusses the development of a conceptual model of a new tram car. The study conducts a historical review, evaluates the current state of the issue, provides the characteristics of popularly used tram brands, presents some modern concepts of new tram cars, and describes modern publications on this topic. According to the analysis, the authors formulate the objective of the research, present sketch models, and select the product design concept taking into account ergonomic standards. The study also indicates the stages of three-dimensional modeling of the product, selects a three-dimensional modeling environment, and creates the car body on the basis of the polygonal modeling method. The features of assigning materials based on the polygonal grid of the object are also presented. V-RayLight lighting sources are used to visualize the three-dimensional scene. As a final scene, the article demonstrates the visualization of a tinted three-dimensional model of the proposed concept of a tram car.

**Keywords:** conceptual modeling, tram car, sketches, ergonomics, projection drawings, three-dimensional modeling, polygonal extrusion method, creation of materials, lighting installation, visualization.

**Введение**

Во многих современных городах трамвайные хозяйства находятся не в очень привлекательных условиях. Однако вопреки сложившимся условиям некоторые отечественные вагоностроительные предприятия предлагают новые конкурентоспособные трамвайные вагоны. Трамвай относится к старейшему виду общественного транспорта, представляет собой рельсовый городской транспорт [1]. Изначально в начале XIX столетия он работал на конной тяге, название транспорта происходит от английских слов «tram и way», что в переводе означает «вагон и путь» [2]. Данная работа посвящена разработке концептуальной модели нового трамвайного вагона от эскиза до реалистичной визуализации трехмерной модели. Процесс концептуального моделирования других промышленных объектов были описаны в работах авторов [3], [4].

Несмотря на давнюю историю этот вид транспорта до сих пор является привлекательным. Трамвайные вагоны всегда движутся по одной колее, по сравнению с автобусами и троллейбусами не требуется выделенная полоса, потом трамвайный поезд может состоять из нескольких вагонов, хотя при повороте габариты увеличиваются. В специфических условиях извилистых старых городских улочек, трамвай становится более функциональным, практичным и экологичным [5].

**Исторический обзор**

Первым фактическим изобретателем трамвая на электрической тяге, считается немец Вернер фон Сименс, 1882 год [1], [6]. Созданный трамвай развивал скорость до 20 км в час, мощность двигателя составляла 5 Квт, а напряжение - 180 вольт. В Англии, а потом в США первый электрический трамвай начал курсировать в 1885 году. В России электрический трамвай впервые был запущен в Киеве первого июня 1892 года. Данная линия была построена компанией Сименс. После 1896 г. были запущены трамвайные линии в Москве, Санкт-Петербурге и в некоторых крупных городах России [7].

В нашей стране историю развития трамвайных линий принято делить на несколько периодов. К первому периоду относится конец XIX-ого начало XX-ого века, в это время в Российской Империи появились первые трамвайные линии:

в Киеве (1892 г.); Нижнем Новгороде (1896 г.); Москве (1899 г.), Ростове-на-Дону (1902 г.), Санкт-Петербурге (1907 г.) и во Владивостоке (1912 г.). Трамвай стал первым моторным видом общественного транспорта [8], [9].

Ко второму периоду относятся первые советские пятилетки. Новые трамвайные линии были запущены в Воронеже (1926 г.), Свердловске (Екатеринбург, 1929 г.), Новокузнецке (1933 г.), Новосибирске (1934 г.), Магнитогорске (1935 г.). Главным критерием их прокладки, стала подвоз рабочих на новые заводы-гиганты.

К третьему периоду относится раннее послевоенное время, в это время трамвай ещё являлся важным видом городского общественного транспорта. Запускаются трамвайные линии в Липецке (1947 г.), Барнауле, Коломне и Орске (1948 г.), Новочеркаске (1954 г.).

Четвертый период начинается после 1960-ого года, в это время развитие автобуса и троллейбуса в крупных городах начинает сокращать значимость трамвайного транспорта. Новые трамвайные линии всё реже стали запускаться, часто начали планировать строительство троллейбусных линий.

Можно отметить, что история российского трамвая охватывает период более века, за это время было создано не мало различных вагонов. В период своей кульминации трамвайные предприятия страны эксплуатировали в основном четыре типа вагонов: Усть-Катавский КТМ-5МЗ, чехословацкая Татра ТЗ, Рижский РВЗ-6, Ленинградский ЛМ-68М [10], [11].



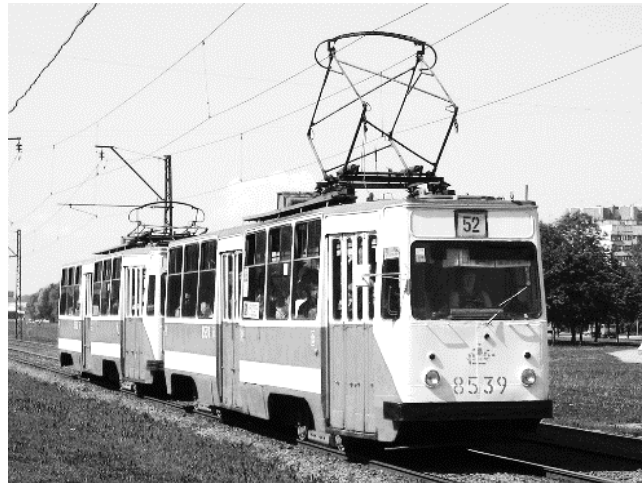
1



2



3



4

Рис. 1 – Основные типы вагонов трамвая, находившихся в эксплуатации в нашей стране:

1 – Усть-Катавский КТМ-5МЗ; 2 – чехословацкая Татра ТЗ; 3 – Рижский РВЗ-6; 4 – Ленинградский ЛМ-68М

Эти трамвайные вагоны являются практически аналогичными по своим основным характеристикам, размерам и вместимости. Все они моторные, четырехосные, оснащены безрамными тележками мостового типа и колесами с резиновыми демпферами. Работали на двигателях постоянного тока с опорно-рамным подвешиванием и реостатно-контакторной системой управления [12].

#### Обзор некоторых современных публикаций, аналогов

Рассмотрим некоторые современные публикации, посвященные проектированию, развитию трамвайного транспорта. В работе [13] исследуется транспортная инфраструктура городов ближнего и дальнего зарубежья с целью анализа использования легкорельсового транспорта. Приводится классификация данных сетей, рассматриваются альтернативные виды транспорта.

Работа [14] посвящена разработке новой модели городского электрического транспорта - поезда-трамвая с пятью кузовами и десятью тяговыми двигателями. Данная модель создается на основе цельнолитых колесных пар, которая должна проходить городские рельсовые пути с узкой кривизной радиуса со скоростью 18 км/ч, а по прямым участкам междугородных путей может двигаться с высокой скоростью до 200 км/ч.



Исходя из соответствия техническим показателям безопасности, высокой эффективности и комфорта, в работе [15] описывается внешний вид поездов в соответствии с условиями среды эксплуатации. Рассматривается дизайн внешнего вида поезда, ориентированный на бережное отношение к окружающей среде.

В работе [16] анализируется развитие электрического транспорта в городской среде. С учетом факторов интегрированной электротранспортной системы в разработанной модели приводятся методы повышения эффективности и привлекательности общественного транспорта, и снижения автомобильной нагрузки.

В работе [17] рассматривается использование электрического трамвая в городских условиях для повышения экологичности и уменьшения загрязнения городской среды. При этом предлагается использование электрического трамвая с инфраструктурой беспроводной зарядки, установленной на дорогах во время движения, моделируется использование емкостных аккумуляторов.

Преимущества городской трамвайной инфраструктуры описываются в работе [18], они отличаются своей экологичностью и экономичностью. Современные условия требуют новых подходов к дизайну трамвая, в котором определяющую роль будут играть его конструктивные и инфраструктурные особенности.

В течение последних десяти лет крупные и средние мировые города нуждаются в трамвайном транспорте. Многие современные российские предприятия продолжают создавать новые концепции трамвайных вагонов, несмотря на падение интереса к трамвайным сетям. Они продолжают демонстрировать свои перспективные разработки на крупных мировых выставках.

Для примера можно привести достаточно интересные модели: трамвай 71-931 (рис.2, слева) производства ООО «ПК Транспортные системы» (Москва), и концепция ОАО «НПК «Уралвагонзавод» (Свердловская область, г. Нижний Тагил) проект трамвая R1 (71-410) (рис.2, справа) [19], [20].



Рис. 2 – Фотография трамвая 71-931 и концептуальная модель трамвая R1

### Эскизный поиск

Первые трамвайные пути в Таганроге запустили в ноябре 1932 года, к моменту начала Великой Отечественной Войны в Таганроге ходило 25-28 трамвайных поездов (50–55 вагонов). На сегодняшний день в городе 56 единиц трамвайной техники, из них 52 – пассажирских вагонов [9].

Работа по созданию концептуального дизайна вагона трамвая, начинается с эскизной проработки (рис.3) [21]. Сформулирована задача: на существующую колесную базу разработать новый корпус с улучшенной компоновкой. Следуя тенденции последних лет, с учетом повышения комфорта и доступности электротранспорта, реализуем низкопольную компоновку салона, которая предусматривает низкую высоту посадки в вагон. Также предлагается использовать для наименования проекта слово «Чайка», в данном случае это слово ассоциируется с морем, который окружает Таганрог, и ещё названием пьесы писателя А.П. Чехова. Данный символ будет использован при внешнем оформлении трамвайного вагона (рис.3).

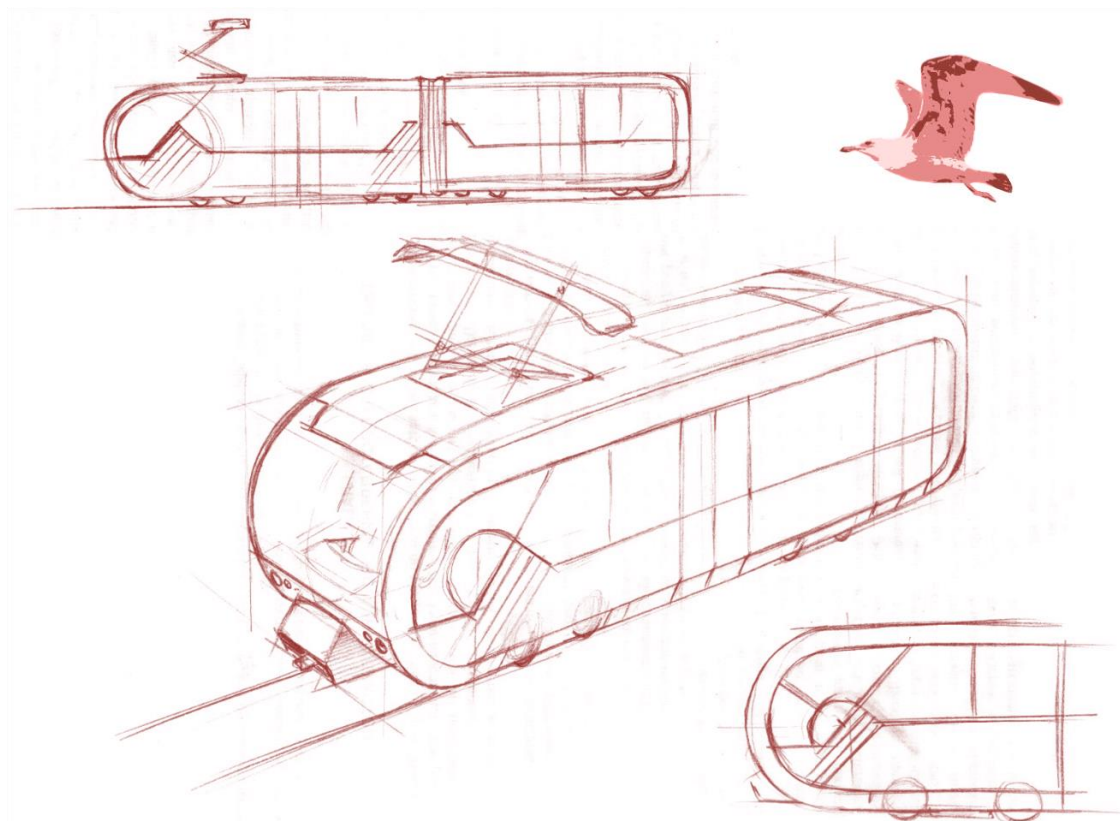


Рис. 3 – Эскизная проработка проекта

В процессе компоновки проектируемого вагона, поставлена задача не превышать габариты вагонов, которые используются в настоящее время. За основу был выбран образец вагона 71-605 (КТМ-5М3) Усть-Катавского вагоностроительного завода, 1989 года выпуска. На сегодняшний день 13 таких вагонов (из 56 общей численности) курсируют по маршрутам города Таганрога. Габаритная длина вагона 15 метров, ширина 2,6 метра, высота составляет 3,15 метра. Это высокопольный четырёхосный односторонний трамвайный вагон.

При проектировании вагона трамвая очень важно соблюдать эргономические нормы, чтобы внешние обводы были эстетичными и внутренний салон был комфортным [22], [23]. Габариты будущей модели: длина 15,6 метра, ширина вагона 2,7 метра; высота по верхней кромке 3,5 метра (рис.4). Расчётная вместимость до 30 сидячих мест, полная вместимость до 220 человек.

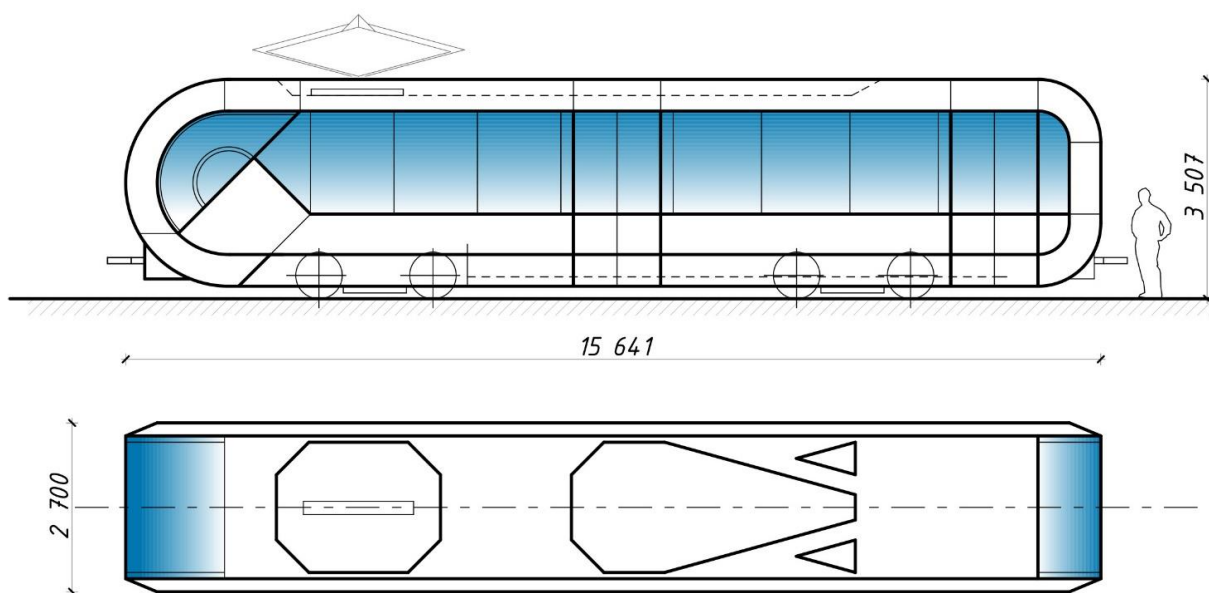


Рис. 4. – Проекция будущей модели

### Особенности конструкции

Конструкция концептуальной модели трамвайного вагона представляет собой стальной каркас, обшитый композитными панелями. Элементы крыши выполнены из материалов, не проводящих электрический ток. Внешний вид вагона представляет собой рубленые прямые линии, сочетание стеклянных глянцевых поверхностей с матовыми элементами, имитирующими серый алюминий. Проектируемая модель предлагается в двустороннем исполнении,



имеющая входные двери с обеих сторон. Двери распашные двустворчатые, кабина водителя отделяется от пассажирского салона несимметричной переборкой с задвижной дверью.

Кабина водителя оснащена панорамным лобовым остеклением на фронтальной и боковых частях. Головная световая оптика представлена светодиодными линзованными фонарями, задняя оптика также выполнена с применением светодиодных ламп. Вагон трамвая оснащен тележками мостового типа, они подвешиваются на винтовых пружинах. Сами тележки оснащены механическим колодочно-барабанным тормозом, вагон имеет тяговые двигатели, пускотормозные сопротивления, автоматический групповой реостатный контроллер. Двигатели работают с напряжением электрической контактной сети с напряжением 600В с помощью токоприёмника пантографного типа [12].

### Этапы моделирования

Моделирование прототипа вагона трамвая выполняется с помощью популярной программы трехмерного моделирования 3ds Max [24]. Обводы корпуса создаются на основе ранее подготовленных проекций. Для моделирования обводки корпуса используется метод полигонального моделирования (polygonal modeling). При соединении вершин с рёбрами формируется многоугольник (полигон), которому можно присвоить цвет и текстуру. Эти полигоны позволяют смоделировать широкий спектр поверхностей [25].

Согласно данному методу, сначала создаются низко полигональные модели, что сокращает время на обработку данных, но имеют невысокий уровень детализации. Для проведения детализации далее модель преобразуется в высоко полигональную, чтобы осуществить точную проработку (рис.5).

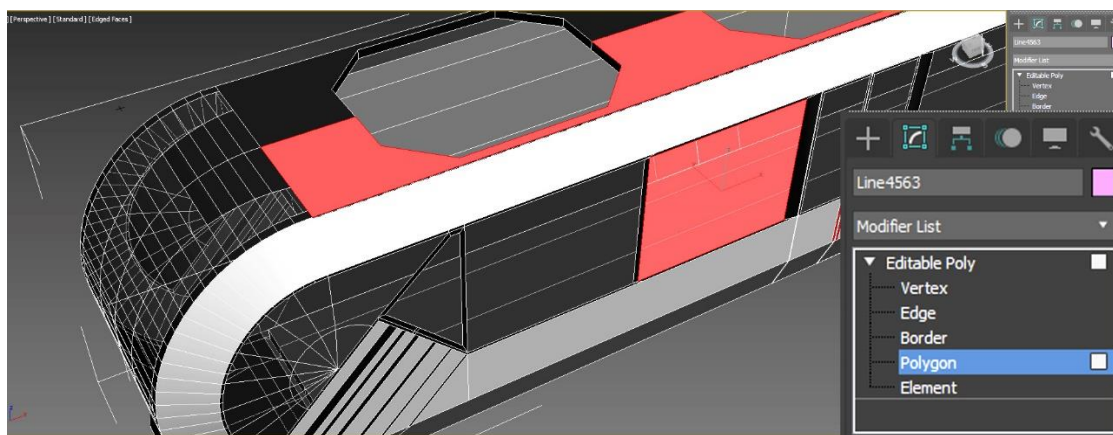


Рис. 5 – Полигональная сетка модели вагона

Моделирование происходит в несколько этапов с постепенным увеличением количества полигонов:

- вначале создаётся базовая форма изделия;
- потом добавляются фаски уточняющие формы поверхности;
- далее, дорабатываются остальные детали и поверхность сглаживается.

После проработки геометрии - проводится детализация и уточнения модели.

### Присвоение материалов, визуализация

После завершения моделирования на следующем этапе осуществляется создание и присвоение материалов и текстур. Учитывая, что для визуализации будет использовано внешнее приложение V-Ray, следовательно, это обуславливает применение соответствующего набора материалов VrayMtl [26]. Данный визуализатор позволяет учитывать отражение и преломление лучей, поэтому является более реалистичным. В библиотеке материалов VrayMtl имеются множество различных текстур, и карты для создания рельефа поверхности. Полигону или группе полигонов присваивается уникальный номер Polygon Material Ids (рис.6).

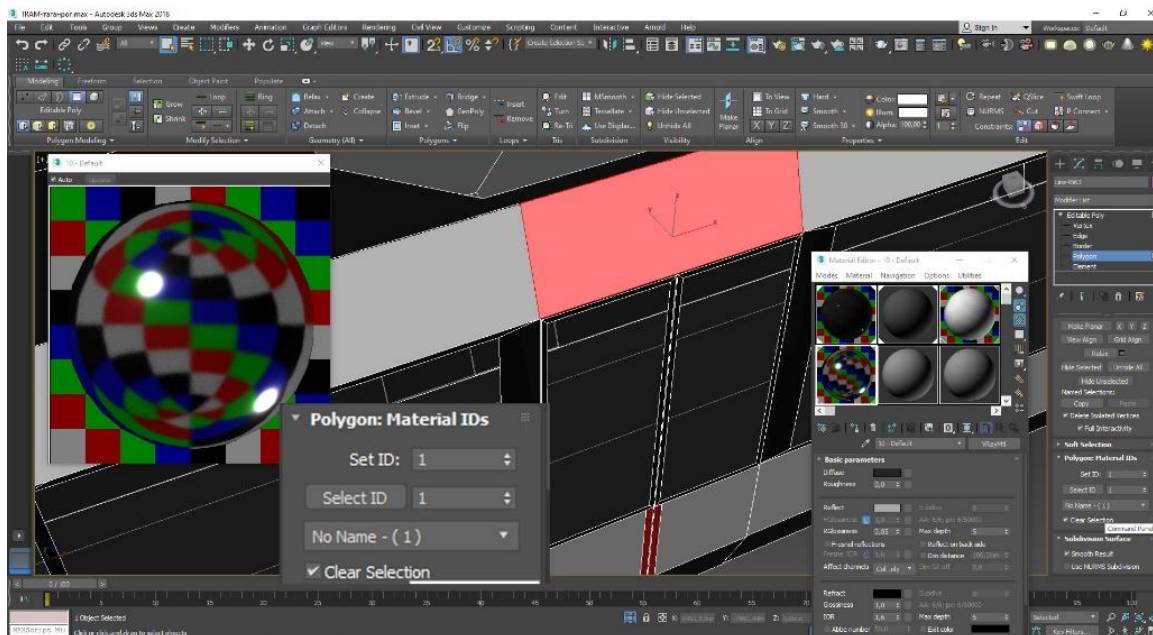


Рис. 6 – Окно редактора материалов и полигональная сетка модели вагона

Реалистичность итоговой сцены визуализации зависит не только от исходного моделирования, освещения и текстурирования сцены, но и от технологии метода визуализации. Для проведения визуализации создаем сцену с источниками света типа V-Ray (рис.7).

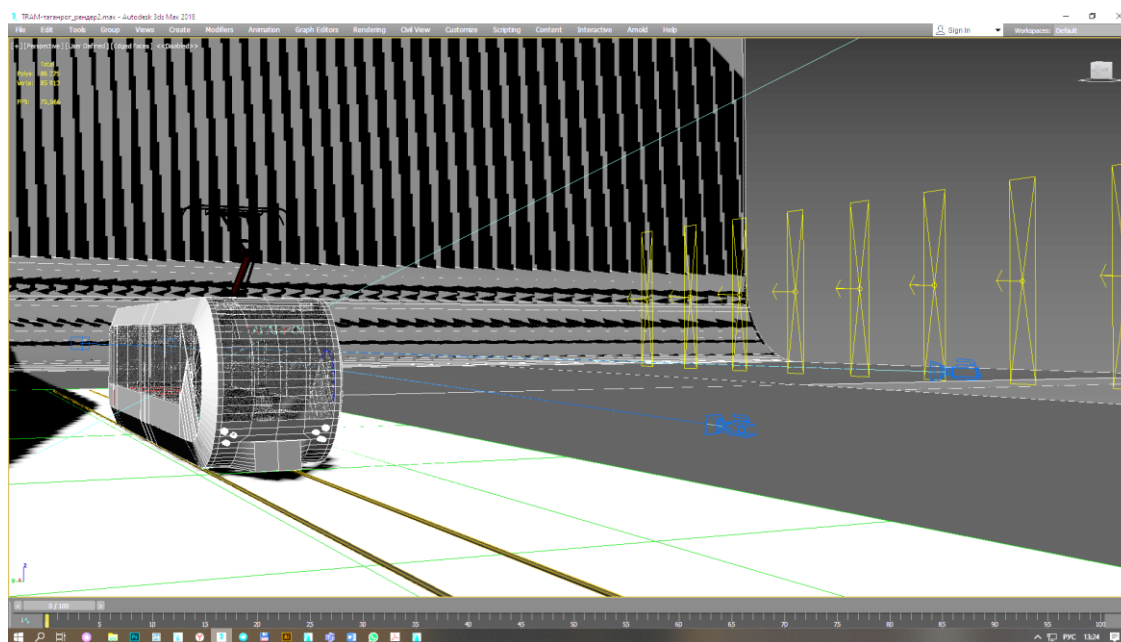


Рис. 7 – Сцена с моделью вагона и источниками света V-Ray

Для детальной визуализации необходимо установить несколько разных источников света, на разных расстояниях от объекта. Размещаем в сцене восемь источников света по сторонам от объекта.

На следующем этапе осуществляется настройка параметров источников освещения. Чтобы изменить параметры V-RayLight, нужно его выделить, задать тип источника, устанавливать его яркость через параметр Multiplier. Яркость источника зависит от размера сцены, от его цветовой гаммы (темные плоскости нуждаются в большей яркости), а также от количества других источников света.

В результате создания и применения материалов получаем модель готовую для дальнейшей фотореалистичной визуализации. Результаты визуализации представлены ниже на рис.8, 9. На рис.9 приведена визуализация тонированной трехмерной модели вагона трамвая с изображением графического символа чайки на боковой поверхности.

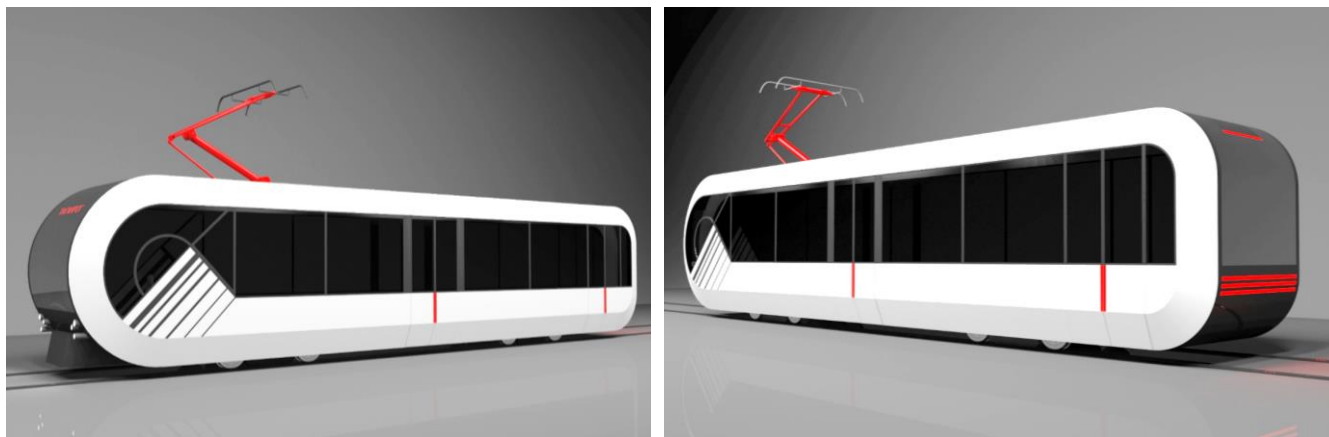


Рис. 8 – Визуализация трехмерной модели, два ракурса

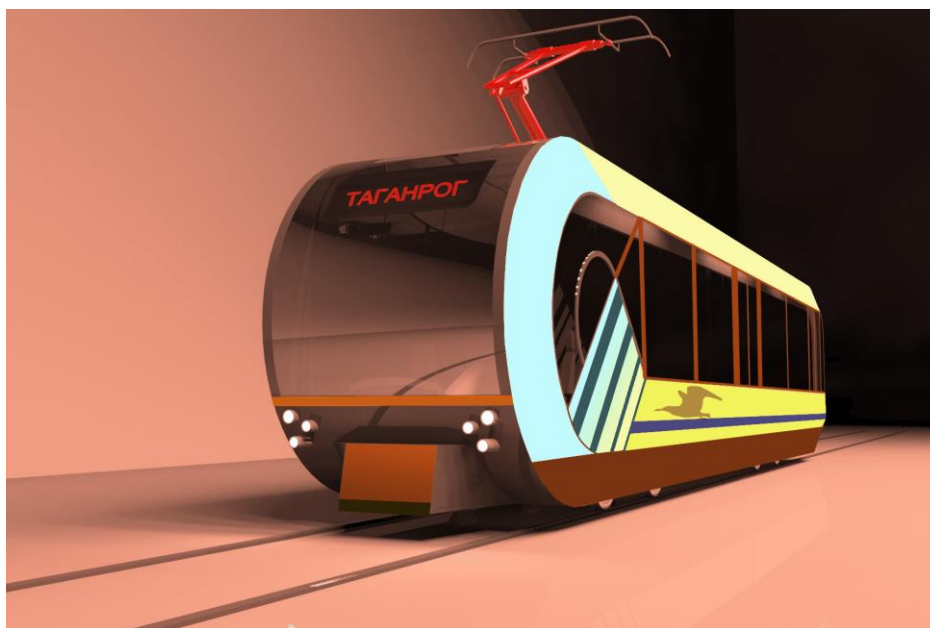


Рис. 9 – Визуализация трехмерной тонированной модели

### Заключение

Всё больше людей сейчас склоняются к возвращению трамваев в города. Это экологичный транспорт, не застревающий в пробках и гармонично вписывающийся в инфраструктуру любого населённого пункта, идеально подходит под нужды человека. Эксперименты в развитых странах показали, что отказ от маршруток и десятков перевозчиков в пользу общественного транспорта в виде трамваев практически полностью решает проблему пробок. Большинство людей просто не видят смысла в покупке автомобиля или как минимум начинают пользоваться им намного реже. В данной работе была представлена концепция внешнего обвода нового вагона трамвая, сделан обзор состояния вопроса, предложена графическая концепция с учетом эргономических норм, приведены этапы разработки от эскиза до реалистичной трехмерной модели. Хочется надеяться, что новые проектируемые трамвайные вагоны будут не только экологичными, но и привлекательными, с красивыми корпусами, а внутри удобными и комфортными для пассажиров.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Petkov D. Cross-case analysis and conclusion. In: Tramway Renaissance in Western Europe / D. Petkov // Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung. Springer VS, Wiesbaden. 2020. P.297-318
2. Green O. Trams and Trolleybuses. / O. Green// Bloomsbury Publishing, 2018. - 64p.
3. Орехов В.В. Компьютерное моделирование самолета-амфибии Бе-103 / В.В. Орехов, И.Б. Аббасов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1. – С.121-125.
4. Abbasov I.B. Conceptual Modeling of Amphibian Aircrafts / I.B. Abbasov, V.V. Orekhov // P.23-136, Chapter 2, doi.org/10.1002/9781119682264.ch2, in book “Computer Modeling in the Aerospace Industry” Edited by Iftikhar B. Abbasov. Wiley-Scrivener, Wiley-Scrivener, 2020, 282 p. ISBN:9781119682264
5. Папанек В. «Дизайн для реального мира». / В. Папанек // Перевод с английского А. Семина. Москва. Изд. Манн, Иванов и Фербер» 2018. – 372с.
6. История электрического трамвая // Живой журнал. – [Электронный ресурс]. URL: <https://foto-history.livejournal.com/7075836.html> (дата обращения 26.01.2021)

7. Транспортный блог по истории транспорта // Транспортный блог Saroavto. – [Электронный ресурс]. URL: <http://saroavto2.blogspot.com/> (дата обращения 25.12.2020)
8. Хищенко В.В. Скоростной трамвай. / В.В. Хищенко // Л., Стройиздат, Ленингр. отделение. 1976. - 180 с.
9. Электронный портал, посвященный электротранспорту // Городской электротранспорт. – [Электронный ресурс]. URL: <https://transphoto.org> (дата обращения 24.01.2021)
10. Бондаревский Д.И. Технический справочник по городскому электротранспорту. / Д.И. Бондаревский, Н.Д. Ермаков, Г.Р. Либерман и др. // Том второй. Трамвай. Москва: Издательство МКХ РСФСР, 1960. - 566 с.
11. Яблонский П. Вагон трамвайной модели 71-605: техническое описание и инструкция по эксплуатации / П. Яблонский. – Усть-Катав, 1978. - 188 с.
12. Корягина Е.Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов / Е.Е. Корягина, О.А. Коськин. - М.: Транспорт, 1982. - 296 с.
13. Нарбеков М.Ф. Развитие сети легкорельсового транспорта Бакинской агломерации / М.Ф. Нарбеков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 12. С.210–222. DOI:10.21285/1814-3520-2016-12-202-214
14. Nak-Tak Jeong. Conceptual design of high-speed semi-low-floor bogie for train-tram / Nak-Tak Jeong, Maosen Wang, Sehoon Yoo et al. // International Journal of Automotive Technology, 2017. V.18, No.3, P.523–533. DOI: 10.1007/s12239-017-0052-2
15. Wang Zhan. Research on Train Exterior Design Oriented to Natural and Humanistic Environment-friendliness / Wang Zhan, Xu Gang, Yan Lei // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 573. 012085. 8p. doi:10.1088/1757-899X/573/1/012085
16. Килина Е.Ф. Принципы создания модели развития системы электрического транспорта в городской среде (на примере города Красноярска) / Е.Ф. Килина, И.В. Кукина, А.Ю. Липовка // Известия КГАСУ, 2019, № 1 (47) С.109-120
17. Young Dae Ko. Efficient Deployment Design of Wireless Charging Electric Tram System with Battery Management Policy / Young Dae Ko and Yonghui Oh // Sustainability 2020, 12, 2920. 11p. doi:10.3390/su12072920
18. Курочкин В.А. Трамвай как специфический объект дизайна городского общественного транспорта / В.А. Курочкин, В.Г. Быстров, Е.А. Быстрова // Архитектон: Известия вузов. 2020. №2(70). – [Электронный ресурс] URL: [http://archvuz.ru/2020\\_2/13](http://archvuz.ru/2020_2/13) (дата обращения 21.01.2021)
19. Научно-технический журнал «Транспорт Урала» №1(20)/2009. Екатеринбург, УрГУПС, 2009. - 93 с.
20. Дизайн трамвайного вагона: история развития. – [Электронный ресурс]. URL: [https://city4people.ru/post/blog\\_219.html](https://city4people.ru/post/blog_219.html) (дата обращения 21.01.2021)
21. Valcke T. «Basic Sketching Techniques for the industrial designers» / T.Valcke // 2009. – 62 p.
22. Сомов Ю.С. Художественное конструирование промышленных изделий / Ю.С. Сомов // Машиностроение. Москва. 1967. – 175 с.
23. Васин С.А. Проектирование и моделирование промышленных изделий / С.А. Васин, А.Ю. Талашук и др.// – М.: – Машиностроение. – 2004, – 692 с.
24. Аббасов И.Б. Основы трехмерного моделирования в графической системе 3 ds Max 2018. / И.Б. Аббасов // – М.: ДМК Пресс, 2017. – 186 с.
25. Швембергер С.И. 3ds Max. Художественное моделирование и специальные эффекты / С.И. Швембергер // - СПб.: BHV, 2006. - 320 с.
26. Чехлов Д.А. V-Ray для Autodesk Maya. Руководство по визуализации / Д.А. Чехлов // – М.: ДМК Пресс, – 2020. 800 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Petkov D. Cross-case analysis and conclusion. In: Tramway Renaissance in Western Europe / Petkov D. // Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung. Springer VS, Wiesbaden. 2020. P.297-318
2. Green O. Trams and Trolleybuses. / O. Green// Bloomsbury Publishing, 2018. - 64p.
3. Orekhov V. V. Komp'yuternoe modelirovanie samoleta-amfibii Be-103 [Computer simulation of the Be-103 amphibious aircraft] / V. V. Orekhov, I. B. Abbasov // Izvestiya JuFU. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences]. - 2011. - No. 1, pp. 121-125 [in Russian]
4. Abbasov I.B. Conceptual Modeling of Amphibian Aircrafts / I.B. Abbasov, V.V. Orekhov // P.23-136, Chapter 2, doi.org/10.1002/9781119682264.ch2, in book “Computer Modeling in the Aerospace Industry” Edited by Iftikhar B. Abbasov. Wiley-Scrivener, Wiley-Scrivener, 2020, 282 p. ISBN:9781119682264
5. Papanek V. Dizajjn dlja real'nogo mira [Design for the real world] / V. Papanek // Translated from English by A. Semina. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber 2018 – 372 p. [in Russian]
6. Istorija ehlektricheskogo tramvaja [History of the electric tram] // LiveJournal. - [Electronic resource]. URL: <https://foto-history.livejournal.com/7075836.html> (accessed: 26.01.2021) [in Russian]
7. Transportnyjy blog po istorii transporta [Transport blog on the history of transport] // Saroavto transport blog. - [Electronic resource]. URL: <http://saroavto2.blogspot.com/> (accessed: 25.12.2020) [in Russian]
8. Khitsenko V. V. Skorostnoj tramvaj [High-speed tram] / V. V. Khitsenko // L., Strojizdat, Leningr. otdelenie 1976. - 180 p. [in Russian]
9. Electronic portal dedicated to electric transport // Urban Electric Transit. - [Electronic resource]. URL: <https://transphoto.org> (accessed: 24.01.2021) [in Russian]
10. Bondarevsky D. I. Tekhnicheskij spravochnik po gorodskomu ehlektrotransportu [Technical reference book on urban electric transport] / D. I. Bondarevsky, N. D. Ermakov, G. R. Liberman et al. // Tom vtoroj. Tramvaj [Volume two. Tram]. Moscow: Publishing house MKKh RSFSR, 1960. - 566 p. [in Russian]
11. Yablonsky P. Vagon tramvajnyj modeli 71-605: tekhnicheskoe opisanie i instrukcija po ehkspluatácii [Tram car model 71-605: technical description and operating instructions] / P. Yablonsky. - Ust-Katav, 1978. - 188 p. [in Russian]

12. Koryagina E. E. Elektrooborudovanie tramvaev i trollejbusov [Electric equipment of trams and trolleybuses] / E. E. Koryagina, O. A. Koskin // - M.: Transport, 1982. - 296 p. [in Russian]
13. Narbekov M. F. Razvitie seti legkorel'sovogo transporta Bakinskoy aglomeracii [Development of the light rail transport network of the Baku agglomeration] / M. F. Narbekov // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2016. Vol. 20. No. 12. Pp. 210-222. doi: 10.21285 / 1814-3520-2016-12-202-214 [in Russian]
14. Nak-Tak Jeong. Conceptual design of high-speed semi-low-floor bogie for train-tram / Nak-Tak Jeong, Maosen Wang, Sehoon Yoo et al. // International Journal of Automotive Technology, 2017. V.18, No.3, P.523–533. doi:10.1007/s12239–017–0052–2
15. Wang Zhan. Research on Train Exterior Design Oriented to Natural and Humanistic Environment-friendliness / Wang Zhan, Xu Gang, Yan Lei // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 573. 012085. 8p. doi:10.1088/1757-899X/573/1/012085
16. Kilina E. F. Principy sozdaniya modeli razvitiya sistemy ehlektricheskogo transporta v gorodskoy srede (na primere goroda Krasnojarska) [Principles of creating a model for the development of the electric transport system in the urban environment (on the example of the city of Krasnoyarsk)] / E. F. Kilina, I. V. Kukina, A. Yu. Lipovka // Izvestiya KGASU [Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Engineering, 2019, No. 1 (47), pp. 109-120 [in Russian]
17. Young Dae Ko. Efficient Deployment Design of Wireless Charging Electric Tram System with Battery Management Policy / Young Dae Ko and Yonghui Oh // Sustainability 2020, 12, 2920. 11p. doi:10.3390/su12072920
18. Kurochkin V. A. Tramvay kak specificheskij ob"ekt dizajna gorodskogo obshchestvennogo transporta [Tram as a specific object of urban public transport design] [Electronic resource] / V. A. Kurochkin, V. G. Bystrov, E. A. Bystrova // Architecton: Izvestiya vuzov [Architecton: Proceedings of Higher Education]. 2020. №2(70). – URL: [http://archvuz.ru/2020\\_2/13](http://archvuz.ru/2020_2/13) (accessed 21.01.2021) [in Russian]
19. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Transport Urala» [Scientific and Technical journal "Transport of the Urals"] No. 1(20)/2009. Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport, 2009. - 93 p. [in Russian]
20. Dizajn tramvajnogo vagona: istoriya razvitiya [Tram car design: a history of development]. - [Electronic resource]. URL: [https://city4people.ru/post/blog\\_219.html](https://city4people.ru/post/blog_219.html) (accessed 21.01.2021) [in Russian]
21. Valcke T. «Basic Sketching Tehniques for the industrial designers» / T.Valcke // 2009. – 62 p.
22. Somov Yu. S. Khudozhestvennoe konstruirovaniye promyshlennykh izdelij [Art construction of industrial products] / Yu. S. Somov // Mashinostroenie. Moscow. 1967 – 175 p. [in Russian]
23. Vasin S. A. Proektirovaniye i modelirovaniye promyshlennykh izdelij [Design and modeling of industrial products] / S. A. Vasin, A. Yu. Talashchuk et al. // - M.: - Mashinostroenie. - 2004, - 692 p. [in Russian]
24. Abbasov I. B. Osnovy trekhmernogo modelirovaniya v graficheskoy sisteme 3 ds Max 2018 [Fundamentals of three-dimensional modeling in the graphic system 3DS Max 2018] / I. B. Abbasov // - Moscow: DMK Press, 2017. - 186 p. [in Russian]
25. Shvemberger S. I. 3ds Max. Khudozhestvennoye modelirovaniye i special'nye ehffekty [3ds Max. Artistic modeling and special effects] / S. I. Shvemberger // - St. Petersburg: BHV, 2006. - 320 p. [in Russian]
26. Chekhlov D. A. V-Ray dlja Autodesk Maya. Rukovodstvo po vizualizacii [V-Ray for Autodesk Maya. Visualization Guide] / D. A. Chekhlov // - M.: DMK Press, - 2020. 800 p. [in Russian]



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.023>**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПАЗОВ ДЕТАЛИ «ДИСК» МАЛОГАБАРИТНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Научная статья

**Петроченко С.В.<sup>1,\*</sup>, Бисерикан М.И.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5600-835X;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8863-515X;<sup>1,2</sup> Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

\* Корреспондирующий автор (c.o.r.d.8477[at]gmail.com)

**Аннотация**

В статье рассмотрены конструктивные особенности детали «Диск» малогабаритного двухконтурного турбореактивного двигателя. Указаны проблемы, связанные с обработкой пазов для крепления турбинных лопаток детали «Диск». Обосновано применение электроэрозионной проволочно-вырезной обработки вместо протягивания. В статье выполнено априорное ранжирование факторов, влияющих на шероховатость поверхности пазов после электроэрозионной обработки. Значимые факторы в результате проведенного исследования – сила тока, расстояние между электродом и заготовкой, скорость промотки проволоки. Проведен промышленный эксперимент и получена математическая зависимость, описывающая связь шероховатости обработанной поверхности с силой тока, расстоянием между электродом и заготовкой, а также скоростью промотки проволоки. Определены оптимальные режимы обработки для достижения требуемой шероховатости поверхности после электроэрозионной обработки.

**Ключевые слова:** турбореактивный двигатель, электроэрозионная обработка, априорное ранжирование, промышленный эксперимент, шероховатость поверхности.

**SELECTION OF OPTIMAL MODES OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF THE GROOVES OF THE "DISK" PART OF A SMALL-SIZED DOUBLE BYPASS TURBOJET ENGINE**

Research article

**Petrochenko S.V.<sup>1,\*</sup>, Biserikan M.I.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5600-835X;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8863-515X;<sup>1,2</sup> Omsk State Transport University, Omsk, Russia

\* Corresponding author (c.o.r.d.8477[at]gmail.com)

**Abstract**

The article considers the design features of the "Disk" part of a small-sized double bypass turbojet engine. The study outlines the problems associated with the processing of the grooves for fixing the turbine blades of the part as well as justifies the use of electrospark wire-cutting processing instead of stretching. The article provides a priori ranking of the factors that affect the roughness of the surface of the grooves after spark eroding. The important factors in the conducted research are the current strength, the distance between the electrode and the workpiece, and the speed of wire winding. The study conducts an industrial experiment and obtains a mathematical dependency that describes the relationship of the roughness of the spark-eroded surface with the current strength, the distance between the electrode and the workpiece, as well as the wire winding speed. Finally, the study determines the optimal treatment modes for achieving the required surface roughness after spark eroding.

**Keywords:** turbojet engine, electroerosive treatment, a priori ranking, industrial experiment, surface roughness.

**Введение**

Авиадвигателестроение – важная отрасль авиационного машиностроения. Применение новых подходов в конструировании газотурбинного двигателя с целью обеспечения его большей тяговой способности на протяжении достаточно долгого времени требует применения новых, более совершенных конструкционных материалов и использования инновационных, высокотехнологичных и наукоемких технологий для изготовления деталей, которые входят в его конструкцию. Необходимо учитывать, что достаточно большое количество деталей авиационных двигателей работает при очень высоких температурах. Отсюда следует, что для производства таких деталей на сегодняшний момент используются специальные жаропрочные стали и сплавы, которые в то же время имеют низкую обрабатываемость резанием. Решить подобного рода противоречия между стремлением повысить эксплуатационные характеристики газотурбинного двигателя и одновременно достичь высокой эффективности изготовления входящих в него деталей, возможно, за счет широкого использования физико-химических методов обработки в авиадвигателестроении [1], [2], [5].

Деталь «Диск» входит в состав двигателя ТРДД-50 – малогабаритный двухконтурный турбореактивный двигатель (ДТРД) одноразового использования. Предназначен для установки на дозвуковых летательных аппаратах [6].

Назначение диска турбины высокого давления – передача крутящего момента от лопаток ротора на вал турбины. Также он является опорным элементом для лопаток. По своему назначению и условиям эксплуатации диски являются наиболее нагруженными и ответственными частями роторов турбин.

Диски газотурбинных двигателей относятся к наиболее ответственным быстровращающимся деталям (10 000 об/мин и более) и требуют выполнения технических требований на изготовление со стопроцентной надежностью [7].

Турбинные диски работают в сложных напряженных состояниях с силовым воздействием на них разнообразных факторов:

- 1) центробежных сил вращающихся масс самих дисков и закрепленных в них лопаток;
- 2) температурных напряжений, вызываемых неравномерным нагревом дисков по радиусу и толщине;

- 3) напряжений, вызываемых изгибными усилиями потока газов;
- 4) резонансных колебаний и вибраций на разных режимах работы двигателя.

Конструктивно диск состоит из обода, полотна и ступицы. По периферии диска расположены пазы типа «елочка» предназначенные крепления пятидесяти рабочих лопаток ротора, а также пазы для размещения пластинчатых замков для осевой фиксации лопаток (рисунок 1).

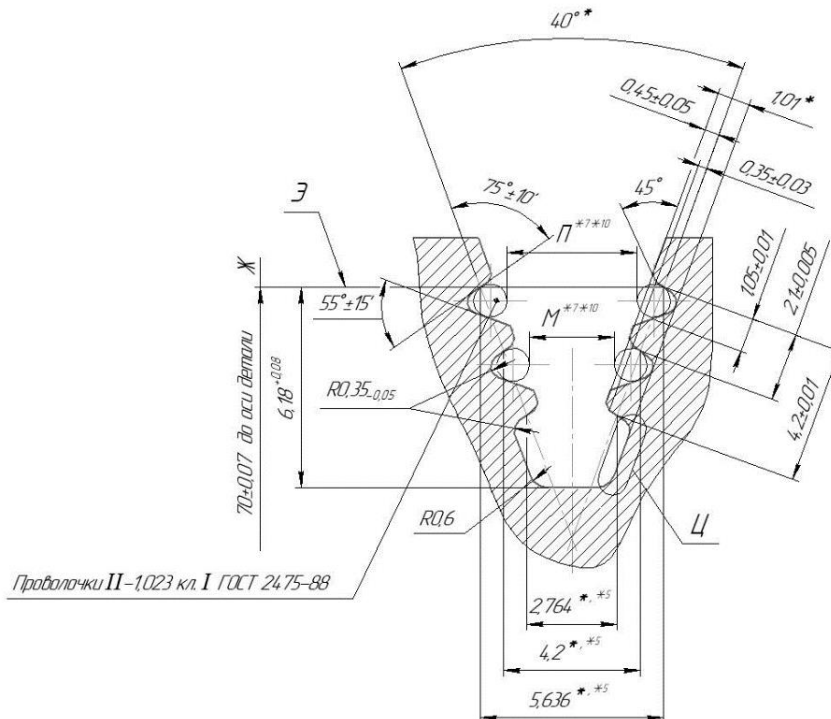


Рис. 1 – Объект исследования – елочный паз детали «Диск»

Материал – жаропрочный сплав ХН62БМКТЮ-ИД на основе никеля [8], [9]. Этот сплав используется для изготовления дисков наземных газотурбинных двигателей (газоперекачивающих агрегатов, газотурбинных приводов электростанций).

Наиболее ответственной в технологии обработки турбинных дисков является операция формирования елочных замковых пазов. Обработка пазов производится традиционно методом протягивания, что и стало одним из недостатков технологического процесса изготовления детали «Диск». Так для предварительного формирования клинового паза требуется применение большого количества дорогостоящих протяжек в трудно автоматизируемом технологическом процессе обработки. В связи с малой долговечностью используемых протяжек и их высокой стоимостью было предложено заменить операцию протяжки канавок электроэрозионной проволочной резкой и определить оптимальные режимы обработки для получения требуемого качества обрабатываемой поверхности.

Преимущества электроэрозионной проволочной резки по сравнению с протягиванием следующие [10]:

- возможность обработки материалов повышенной твердости;
- возможность формирования пазов с острыми углами сверхмалых радиусов;
- большая глубина обработки.

#### Методы исследования и полученные результаты

Первоначальной задачей проведенных исследований являлось установление значимых факторов, влияющих на шероховатость канавок детали «Диск».

Для установления значимых факторов, влияющих на шероховатость канавок детали «Диск», авторы статьи провели априорное ранжирование факторов с привлечением специалистов в области электроэрозионной обработки [11].

По мнению специалистов, основные факторы, влияющие на шероховатость рабочей поверхности после электроэрозионной обработки это:

- сила тока ( $x_1$ );
- расстояние между электродом и заготовкой ( $x_2$ );
- скорость промотки проволоки ( $x_3$ );
- толщина проволоки ( $x_4$ );
- химический состав материала ( $x_5$ );
- давление прокачки ( $x_6$ ).

По результатам опроса экспертов составлена матрица рангов (см. таблицу 1).

Значения отклонений суммы рангов от средней суммы для каждого из факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Матрица рангов

| Исследователи                                              | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  |
|------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|----|
| 1                                                          | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 6  |
| 2                                                          | 2 | 3 | 1 | 4 | 6 | 5  |
| 3                                                          | 2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6  |
| 4                                                          | 3 | 1 | 2 | 6 | 7 | 9  |
| Сумма рангов $\sum_{j=1}^m a_{ij}$                         | 8 | 7 | 9 | 9 | 2 | 6  |
| Отклонение $\Delta_i$ суммы рангов от средней суммы рангов | 7 | 8 | 6 | 4 | 7 | 1  |
| Квадраты отклонений $\Delta_i^2$                           | 9 | 4 | 6 | 6 | 9 | 21 |

Для оценки степени согласованности мнений каждого из специалистов был выполнен расчет коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)} \quad (1)$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений;  $m$  – число опрошенных специалистов  
 $k$  – число факторов.

$$W = 1,19.$$

Значимость коэффициента конкордации была установлена с помощью критерия Пирсона. Расчетное значение  $\chi^2_p$  определялось по формуле:

$$\chi^2_p = m(k-1)W, \quad \chi^2_p = 23,8. \quad (2)$$

Расчетное значение  $\chi^2_p$  было сравнено с табличным значением из распределения Пирсона, найденным для принятого уровня значимости и числа степеней свободы  $f = k - 1$  [12].

Так для 5 % процентного уровня значимости и числа степеней свободы  $f = 5$  табличное значение  $\chi^2$  составило 11,071.

Т. к.  $\chi^2_p = 23,8 > \chi^2_t = 11,1$  следовательно, гипотеза о согласованности мнений опрошенных специалистов принимается.

Результатам априорного ранжирования факторов представлен в виде диаграммы рангов (см. рисунок 2).

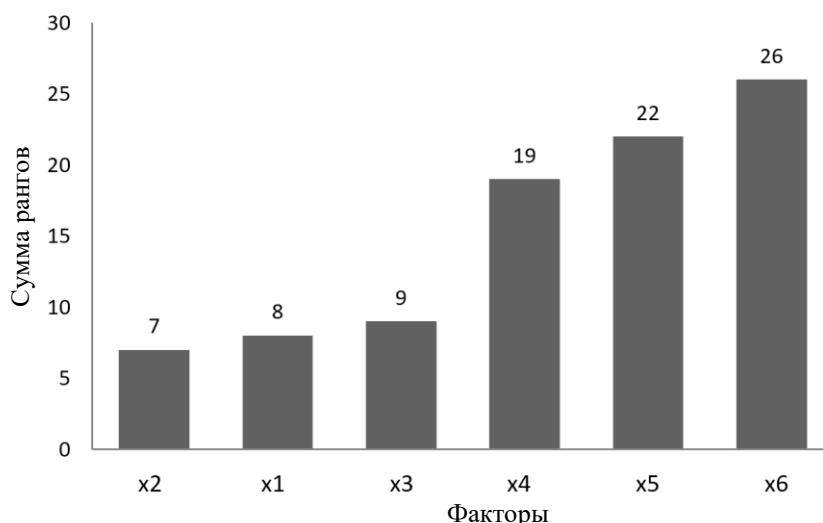


Рис. 2 – Диаграмма рангов

Согласно диаграмме рангов наиболее значимыми факторами следует признать: сила тока ( $x1$ ), расстояние между электродом и заготовкой ( $x2$ ), скорость промотки проволоки ( $x3$ ).

Для описания влияния параметров режима электроэрозионной обработки на шероховатость поверхности, было выполнено математическое моделирование с применением симплекс-решетчатого плана [6], [13]. Промышленный эксперимент проводился на электроэрозионном проволочно-вырезном станке Sodick AG400L. В качестве электрода-инструмента использовалась латунная проволока диаметром 0,3 мм.



Факторы для проведения промышленного эксперимента – сила тока ( $x_1$ ), расстояние между электродом и заготовкой ( $x_2$ ), скорость промотки проволоки ( $x_3$ ).

Уравнение регрессии описывается полином вида:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k \leq q} b_{ijk} x_i x_j x_k \quad (3)$$

приведенный к виду:

$$\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \quad (4)$$

Симплекс-решетчатый план второго порядка (симплекс-решетчатый план Шеффе) и матрица планирования эксперимента приведены в таблице 2 и таблице 3. Для проведения промышленного эксперимента согласно симплекс-решетчатому плану Шеффе достаточно проведение шести опытов.

Таблица 2 – Симплекс-решетчатый план второго порядка

| Номер опыта | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $y$      |
|-------------|-------|-------|-------|----------|
| 1           | 1     | 0     | 0     | $y_1$    |
| 2           | 0     | 1     | 0     | $y_2$    |
| 3           | 0     | 0     | 1     | $y_3$    |
| 4           | 1/2   | 1/2   | 0     | $y_{12}$ |
| 5           | 1/2   | 0     | 1/2   | $y_{13}$ |
| 6           | 0     | 1/2   | 1/2   | $y_{23}$ |

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента

| Номер опыта | Расстояние между электродом и заготовкой $A$ , мкм | Сила тока $I$ , А | Скорость промотки проволоки $V_{\text{пром}}$ , м/мин | Шероховатость поверхности $Ra$ , мм |
|-------------|----------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1           | 45                                                 | 6                 | 80                                                    | 1,475                               |
| 2           | 18                                                 | 10                | 80                                                    | 1,975                               |
| 3           | 18                                                 | 6                 | 100                                                   | 1,75                                |
| 4           | 31,5                                               | 8                 | 80                                                    | 1,1                                 |
| 5           | 31,5                                               | 6                 | 90                                                    | 1                                   |
| 6           | 18                                                 | 8                 | 90                                                    | 0,8                                 |

Математическая зависимость, описывающая влияние параметров режимов на шероховатость «елочного» профиля, было получено при помощи программного комплекса Statistica 6.0 и имеет следующий вид:

$$y = 1,475x_1 + 1,975x_2 + 1,75x_3 - 2,5x_1x_2 - 2,45x_1x_3 - 4,25x_2x_3. \quad (5)$$

Адекватность полученных математических моделей проверена путем сравнения расчетных значений  $t$ -критерия Стьюдента.  $t_{pRa} = 1,46$  с табличным значением  $t_{0,05;10} = 2,228$  при 5 % – уровне значимости. Т.к. расчетные значения  $t$ -критерия меньше табличного, следовательно, полученные уравнения регрессии следует признать адекватными.

Переход от кодированных значений факторов к натуральным значениям осуществлялся при помощи выражений:

- расстояние между электродом и заготовкой –  $A = 18 + 27x_1$ ;
- сила тока –  $I = 6 + 4x_2$ ;
- скорость промотки проволоки –  $V_{\text{пром}} = 80 + 20x_3$ .

Для построения поверхности равного отклика использовался программный комплекс Statistica 6.0. Полученная поверхность равного отклика представлена на рисунке 3.

Оптимальный режим обработки для достижения параметра шероховатости  $Ra \leq 1,5$  мкм был определен решением уравнения (5) путем переборки всех значений факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

Режим, обеспечивающие максимальную производительность обработки и позволяющие достигнуть требуемого значения параметра шероховатости  $Ra = 1,5$  мкм: сила тока – 9 А, расстояние между электродом и заготовкой – 18 мкм, скорость промотки проволоки – 82,5 м/мин.

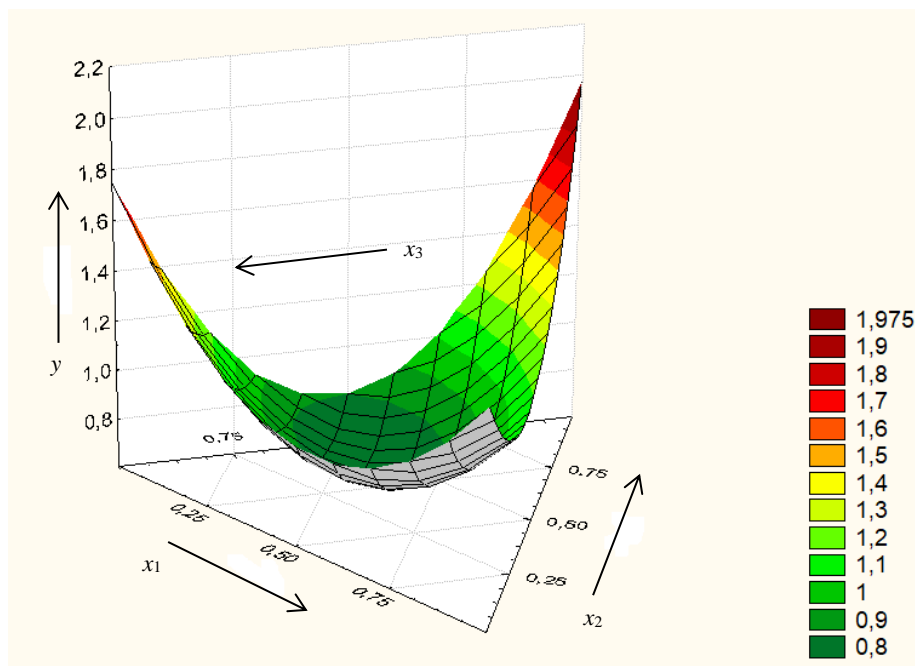


Рис. 3 – Поверхность равного отклика

### Выводы

1) наиболее значимыми факторами, влияющими на шероховатость «елочного» профиля детали «Диск» после электроэрозионной обработки признаны – сила тока, расстояние между электродом и заготовкой, скорость промотки проволоки;

2) в результате проведения промышленного эксперимента с применением симплекс-решетчатого плана было получена математическая зависимость, описывающая влияние силы тока, расстояния между электродом и заготовкой, скоростью промотки проволоки на шероховатость «елочного» профиля детали «Диск» после электроэрозионной обработки;

3) в результате решения полученной зависимости были получены параметры режима электроэрозионной обработки «елочного» профиля детали «Диск», обеспечивающие максимальную производительность обработки и позволяющие достигнуть значения параметра шероховатости  $Ra = 1,5$  мкм: параметр тока (сила тока) – 9 А, расстояние между электродом и заготовкой – 18 мкм, скорость промотки проволоки – 82,5 м/мин.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф / под ред. А. П. Назарова. Москва: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1987. 363 с.
2. Зарипов Н. Г. Перспективные материалы для авиационной техники / Н. Г. Зарипов. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2008. 144 с.
3. Кравченко И. Ф. Анализ влияния конструктивного облика корпуса турбины на эффективность системы регулирования радиального зазора / И. Ф. Кравченко, Ю. А. Зелёный, Р. Р. Климик и др. // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 10 (67). С. 85–89.
4. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1024 с.
5. Попок Н. Н. Способы обработки поверхностей деталей и технологическое оснащение для их реализации / Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, Г. И. Гвоздь // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. В 3 т. Новополюк: Изд-во ПГУ, 2009. Т. 2. С. 315–319. ISBN 978-985-418-831-7.
6. Капалин Н. Ю. Определение оптимальных режимов резания при обработке сферических поверхностей деталей турбореактивных двигателей / Н. Ю. Капалин, С. В. Петроченко, М. И. Бисерикан // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств: материалы третьей Всерос. науч.-техн. конф., 10 окт. 2019 г. / ОмГУПС. Омск, 2019. С. 52–58.
7. Безъязычный В. Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении / В. Ф. Безъязычный, М. Л. Кузменко, В. Н. Крылов и др. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Машиностроение, 2007. 539 с. ISBN 5-217-03366-5.
8. Zhu Sh.-P. Probabilistic fatigue life prediction and reliability assessment of a high pressure turbine disc considering load variations / Zhu Sh.-P., Liu Q., Lei Q. et al. // International Journal of Damage Mechanics. 2018. Vol. 27, Issue 10. P. 1569–1588. DOI: 10.1177/1056789517737132.
9. Ikpe A. E. Material Selection for High Pressure (HP) Turbine Blade of Conventional Turbojet Engines / Ikpe A. E., Owunna I., Ebinilo P. O. et al. // American Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2016. Vol. 1, Issue 1. P. 1–9. DOI: 10.11648/j.ajmie.20160101.11.

10. Елисеев Ю. С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин ; под ред. Б. П. Саушкина. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 437 с. ISBN 978-5-7038-3425-1.
11. Щекин А. В. Априорное ранжирование факторов / А. В. Щекин. Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2004. 12 с.
12. Петроченко С. В. Технология повышения качества рабочей поверхности коллекторов электрических машин постоянного тока при ее механической обработке / С. В. Петроченко: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2011. 177 с.
13. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. Москва: Наука, 1976. 390 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Turboreaktivnyj dvuhkonturnyj dvigatel' s forsazhnoj kameroj sgoraniya AL-31F [Turbojet two-circuit engine with afterburner combustion chamber AL-31F] / ed. by A. P. Nazarov. Moscow: VVIA im. n. e. Zhukovsky, 1987. 363 p. [in Russian]
2. Zaripov N. G. Perspektivnye materialy dlja aviacionnoj tehniki [Perspective materials for aviation equipment] / N. G. Zaripov. Ufa: UGATU Publishing House, 2008. 144 p. [in Russian]
3. Kravchenko I. F. Analiz vlijaniya konstruktivnogo oblika korpusa turbiny na jeffektivnost' sistemy regulirovanija radial'nogo zazora [Analysis of the influence of the structural appearance of the turbine body on the efficiency of the radial clearance control system] / I. F. Kravchenko, Yu. A. Zeleny, R. R. Klimik, et al. // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija [Aerospace engineering and Technology]. 2009. No. 10 (67). pp. 85-89. [in Russian]
4. Inozemtsev A. A. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines] / A. A. Inozemtsev, V. L. Sandratsky. Perm: JSC "Aviadvigatel", 2006. 1024 p. [in Russian]
5. Popok N. N. Sposoby obrabotki poverhnostej detalej i tehnologicheskoe osnashhenie dlja ih realizacii [Methods of surface treatment of parts and technological equipment for their implementation] / N. N. Popok, R. S. Khmel'nitsky, G. I. Gvozd // Materialy, tehnologii i oborudovanie v proizvodstve, jekspluatacii, remonte i modernizacii mashin [Materials, technologies and equipment in production, operation, repair and modernization of machines]: collection of scientific tr. In 3 t. Novopolotsk: PSU Publishing House, 2009. Vol. 2. pp. 315-319. ISBN 978-985-418-831-7. [in Russian]
6. Kapalin N. Yu. Opredelenie proekticheskikh rezheniy rezaniya pri obrabotke sferichnykh surfactov detalei turboaktivnykh dvigatel' [Determination of optimal cutting modes in processing spherical surfaces of turbojet engine parts] / N. Ju. Kapalin, S. V. Petrochenko, M. I. Biserikan. conf., October 10, 2019 / OmGUPS. Omsk, 2019. pp. 52-58. [in Russian]
7. Bezylazny V. F. Tehnologicheskie processy mehanicheskoy i fiziko-himicheskoy obrabotki v aviadvigatelestroenii [Technological processes of mechanical and physical-chemical processing in aircraft engine building] / V. F. Bezylazny, M. L. Kuzmenko, V. N. Krylov et al. 2nd ed., ispr. and dop. Moscow: Mashinostroenie, 2007. 539 p. ISBN 5-217-03366-5. [in Russian]
8. Zhu Sh.-P. Probabilistic fatigue life prediction and reliability assessment of a high pressure turbine disc considering load variations / Zhu Sh.-P., Liu Q., Lei Q. et al. // International Journal of Damage Mechanics. 2018. Vol. 27, Issue 10. P. 1569–1588. DOI: 10.1177/1056789517737132.
9. Ikpe A. E. Material Selection for High Pressure (HP) Turbine Blade of Conventional Turbojet Engines / Ikpe A. E., Owunna I., Ebunilo P. O. et al. // American Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2016. Vol. 1, Issue 1. P. 1–9. DOI: 10.11648/j.ajmie.20160101.11.
10. Eliseev Yu. S. Jelektroerozionnaja obrabotka izdelij aviacionno-kosmicheskoy tehniki [Electroerosion processing of products of aerospace engineering] / Yu. S. Eliseev, B. P. Saushkin; ed. by B. P. Saushkin. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2010. 437 p. ISBN 978-5-7038-3425-1. [in Russian]
11. Shchekin A. V. Apriornoje ranzhirovanie faktorov [A Priori ranking of factors] / A. V. Shchekin. Khabarovsk: Publishing house of KHSTU, 2004. 12 p. [in Russian]
12. Petrochenko S. V. Tehnologija povyshenija kachestva rabochej poverhnosti kollektorov jelektricheskikh mashin postojannogo toka pri ee mehanicheskoy obrabotke [Technology of improving the quality of the working surface of collectors of electric machines of direct current during its mechanical processing] / S. V. Petrochenko: dis. ... kand. tehn. nauk. Omsk, 2011. 177 p. [in Russian]
13. Zedginidze I. G. Planirovanie jeksperimenta dlja issledovaniya mnogokomponentnyh sistem [Planning an experiment for the study of multicomponent systems] / I. G. Zedginidze. Moscow: Nauka, 1976. 390 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.024>**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Обзорная статья

**Попова М.В.<sup>1,\*</sup>, Переверзев А.А.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4666-5529;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-5865-9527;<sup>1,2</sup> Российский государственный аграрный заочный университет, Балашиха, Россия

\* Корреспондирующий автор (A-040506[at]yandex.ru)

**Аннотация**

На сегодняшний день рост сельскохозяйственной промышленности напрямую связан с повышением потребляемой электроэнергии и электрификацией технологических процессов. Многие из аграрных хозяйств находятся на значительном расстоянии от системы централизованного электроснабжения. Подключение таких объектов к крупным электрическим сетям является экономически нецелесообразным, а их электроснабжение осуществляется от автономных топливных электростанций [6]. На сегодняшний день по всему миру ведутся разработки ветрогенераторов с использованием высокотемпературных сверхпроводниковых обмоток, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными ветрогенераторами. Явление сверхпроводимости, начавшее свое промышленное применение в сфере энергетики во второй половине 90х годов прошлого столетия, позволило при достижении проводником определенной критической температуры уменьшить электрическое сопротивление до нуля. Использование низкотемпературной сверхпроводимости основывается на прекращении теплового движения атомов вещества и образовании связанных пар электронов, другими словами, куперовских квазичастиц. Провод, выполненный из сверхпроводящих материалов позволяет проводить тот же ток, что и медный кабель, используя в 10 раз меньшее поперечное сечение, поэтому провод, изготовленный из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), при использовании позволяет создавать гораздо более сильные магнитные поля, что находит применение при создании электродвигателей большей мощности и при этом более компактных габаритов. Также отсутствие резистивного нагрева в рабочем режиме является одним из важных преимуществ ВТСП проводников в сравнении с медным проводом, а значит при понижении температуры сверхпроводника ниже своей температуры перехода, нужна незначительная мощность охлаждения [1], [10].

**Ключевые слова:** ветрогенератор, электроэнергетика, электрические машины, высокотемпературный сверхпроводниковый генератор, высокотемпературная сверхпроводимость, устойчивость к перегрузкам, возобновляемые источники энергии.

**AN EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING ELECTRIC MACHINES AS PART OF ALTERNATIVE ENERGY IN AGRICULTURE**

Review article

**Popova M.V.<sup>1,\*</sup>, Pereverzev A.A.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4666-5529;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-5865-9527;<sup>1,2</sup> Russian State Agrarian Correspondence University, Balashikha, Russia

\* Corresponding author (A-040506[at]yandex.ru)

**Abstract**

Today, the growth of the agricultural industry is directly related to the increase in electricity consumption and the electrification of technological processes. Many of the agricultural farms are located at a considerable distance from the centralized power supply system. Connecting such facilities to large electric networks is economically impractical, and their power supply is carried out from autonomous fuel power plants [6]. Currently, wind generators are being developed around the world using high-temperature superconducting windings, which have a number of advantages compared to traditional wind-powered generators. The phenomenon of superconductivity, which began its industrial application in the energy sector in the second half of the 90s of the last century, made it possible to reduce the electrical resistance to zero when a conductor reaches a certain critical temperature. The use of low-temperature superconductivity is based on the termination of the thermal motion of the atoms of matter and the formation of bound pairs of electrons, in other words, Cooper quasiparticles. A wire made of superconducting materials allows for conducting the same current as a copper cable, using a cross-section that is 10 times smaller, therefore a wire made of high-temperature superconductors (HTS), when used, allows for creating much stronger magnetic fields, which is used to create electric motors of greater power and at the same time more compact dimensions. Also, the absence of resistive heating in the operating mode is one of the important advantages of HTSC conductors in comparison with copper wire, which means that when the temperature of the superconductor decreases below its transition temperature, an insignificant cooling power is needed [1], [10].

**Keywords:** wind generator, electric power industry, electric machines, high-temperature superconducting generator, high-temperature superconductivity, overload resistance, renewable energy sources.

**Введение**

Во второй половине 1990х годов в электроэнергетике начало активно использоваться свойство высокотемпературной сверхпроводимости. Это дало возможность применять силовые кабели, электрические машины, токоограничивающие устройства, выполненные из высокотемпературных сверхпроводниковых материалов, а также сверхпроводниковые индуктивные накопители, которые дали возможность хранить накопленную энергию неограниченно во времени. Использование сверхпроводящих материалов позволило повысить эффективность передачи

и распределения электроэнергии и значительно уменьшить габариты. Поэтому трансформаторы, изготовленные из сверхпроводящих материалов, имеют меньший вес и габариты по сравнению с трансформаторами такой же мощности, изготовленными из традиционных материалов. Помимо этого, трансформаторные устройства, выполненные из сверхпроводящих материалов, могут ограничивать ток при перегрузках и не требуют применения минерального масла, что делает их более дружелюбными к окружающей среде и пожаробезопасными [11]. Сверхпроводящие токоограничители менее инерционны с точки зрения временных характеристик, также применение ограничителя тока со сверхпроводниковым индуктивным накопителем позволяет энергосистеме работать стабильно. Кабели из сверхпроводящих материалов, проложенные под землей, имеют токонесущую способность в 2-5 раз выше этого показателя у маслонаполненного кабеля. А их компактность значительно облегчает их прокладку в городских условиях. Было установлено, что при использовании сверхпроводящих кабелей электромагнитное неблагоприятное воздействие на окружающую среду заметно снижалось, поскольку такие кабели позволяют передавать большие мощности при более низком напряжении [2]. Это воздействие зависит от величины напряженности объекта энергетики. Чем крупнее объект, тем выше напряженность и влияние на окружающую среду электромагнитного загрязнения [5].

### Основная часть

Высокотемпературные сверхпроводящие материалы были открыты в 1986 году, это значительно расширило возможности практического применения явления сверхпроводимости для создания современных технических разработок, что способствовало значительному росту эффективности в различных отраслях народного хозяйства. На сегодняшний день свойство сверхпроводимости нашло широкое применение в сфере энергоснабжения и энергосбережения [4]. По всему миру активно ведутся научные разработки в применении автономных ветроэнергетических установок для объектов сельскохозяйственного назначения, в том числе и в России, так как именно Россия имеет огромный нереализованный ветроэнергетический потенциал, составляющий по результатам исследований четверть общего потенциала всех разновидностей возобновляемой энергетики. В сельском хозяйстве наиболее перспективно использовать автономные ветряные электрические станции [6]. На сегодняшний день активно ведутся разработки по модернизации и повышению качества, а также энергосбережения, при использовании этого огромного возобновляемого потенциала путем внедрения сверхпроводящих материалов [8], [9]. Так, европейские компании Zenergy Power и Converteam в сфере ветроэнергетики совместно разработали генератор из высокотемпературных сверхпроводниковых материалов первого поколения, мощность которого 8 МВт, имеющий прямой привод от ветряной турбины. Синхронные генераторы при высоком крутящем моменте, использующие прямой привод, обладают низкой частотой вращения (~11 оборотов в минуту). Ветряная энергоустановка, имеющая мощность от 10 до 12 МВт, является исполинским сооружением с диаметром ротора 200 м, смонтированным на башне высотой 250 метров. Монттировать генератор массой в несколько тонн весьма сложная задача, поэтому использование генераторов, изготовленных из высокотемпературных сверхпроводников, значительно упрощает решение этой инженерно-технической задачи и удешевляет конструкцию ветроэнергетических установок большой мощности. Значительных успехов при конструировании генератора со сверхпроводящими ротором и статором добилась компания Kalsi Green Power Systems (Princeton, USA). В качестве сверхпроводящего материала второго поколения был предложен  $MgB_2$  с рабочей температурой обмоток 15–20° К. Вес генератора составляет около 50 тонн, в отличие от других проектов, которые использовали ВТСП для изготовления только ротора, а статор реализовывался в традиционном исполнении, что придает конструкции достаточно большой вес и габарит. Институт Сверхпроводников и материалов электронной техники австралийского университета Вуллонгонга разработал ветрогенератор, масса которого на 40% меньше массы ветрогенератора, выполненного из традиционных материалов. Отсутствие редуктора позволяет снизить расходы на эксплуатационные затраты и использование  $MgB_2$  значительно снижает массу и сокращает стоимость ветряной установки. Использование ВТСП также решает вопрос повышения мощности ветрогенератора для наибольшей энергоэффективности при сохранении его массы и габаритов [7].

Компания General Electric, уже много лет работающая над разработкой и производством ветрогенераторов традиционного образца, исследовала на стадии проектирования экономическую обоснованность сверхпроводникового ветрогенератора. Результаты исследования были таковы, что при 95% эффективности, полные потери в установке составят 501 кВт.

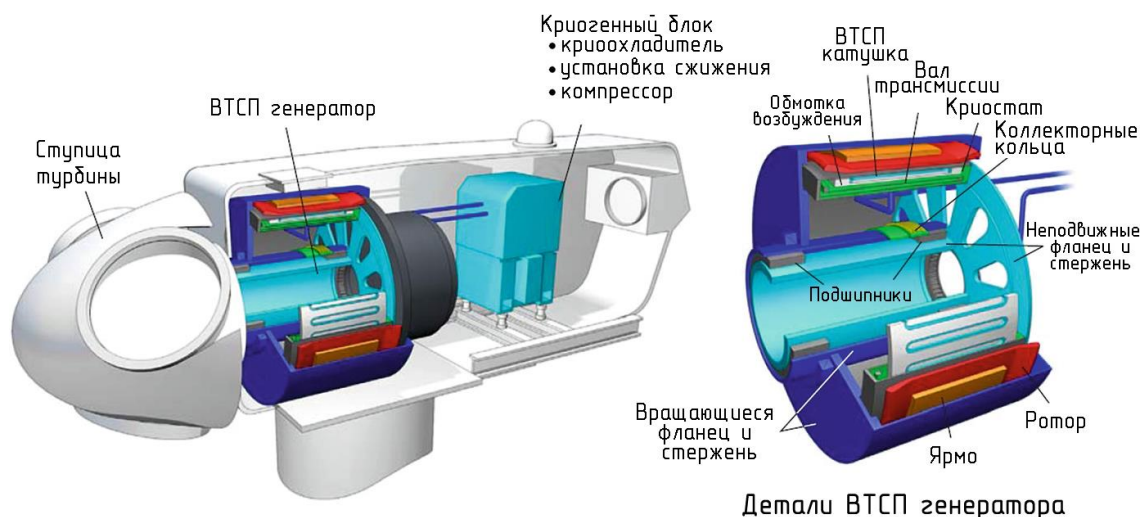


Рис. 1 – Схема ветрогенератора мощностью 10 МВт (компания General Electric)



Таким образом, был спроектирован ветрогенератор (см. рисунок 1), для изготовления обмоток ротора которого предложен сверхпроводящий материал NbTi длиной 720 км и массой проводника, равной 3840 кг. По предварительным прогнозам произведенная электроэнергия таким генератором будет на 15% выше, чем полученная от традиционных ветроэлектрических установок.

Один из проектов ветрогенераторов «Sea Titan» (см. рисунок 2) выполненный из высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения  $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  был предложен компанией American Superconductor в 2008 году (Re – редкоземельный элемент).

В качестве охлаждения высокотемпературных сверхпроводящих обмоток ротора, были предложены к использованию криокулеры на цикле Гиффорда-Макмагона. Предполагается, что такой ветрогенератор прослужит не менее 30 лет без проведения капитального ремонта. Для изготовления понадобится ВТСП провод длиной 36 км. Для обмоток статора и ротора ветрогенератора с мощностью 10 МВт, разрабатываемого компанией Kalsi Green Power System, предложен к использованию ВТСП из диборида магния с рабочей температурой 200К.

При этой температуре критический ток для проводника диаметром 0,83 мм составит 465 А. Охлаждение обмоток будет производиться по двухступенчатой схеме криокулеров путём теплообмена с газом, в качестве которого предлагается гелий. Системы охлаждения статора и ротора являются независимыми.

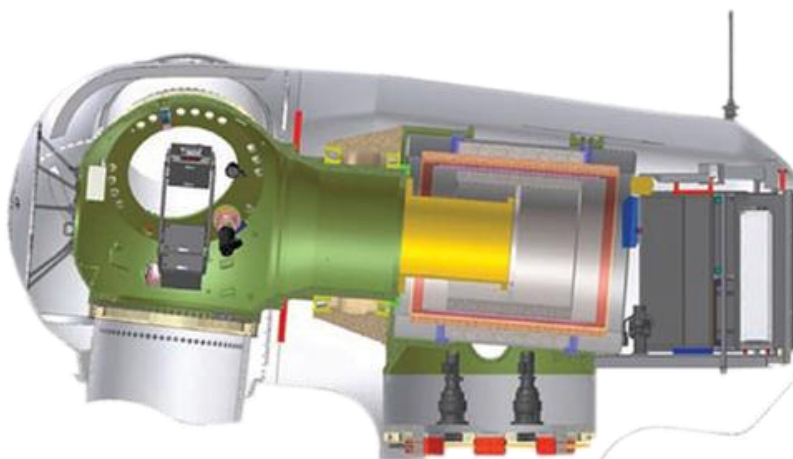


Рис. 2 – Сверхпроводниковый ветрогенератор «Sea Titan»

При оценке обобщённых параметров можно утверждать, что ветрогенератор, изготовленный на основе  $\text{MgB}_2$ , по экономическим и техническим характеристикам является одним из лучших ветрогенераторов среди ВТСП ветрогенераторов с прямым приводом. При этом всего лишь около 4% от общего веса составит вес криогенного оборудования [3].



Рис. 3 – Первый в мире синхронный ветрогенератор мощностью 1 МВ·А с обмотками из ВТСП второго поколения

Таблица 1 – Основные характеристики синхронного ВТСП ветрогенератора

|                                                 |          |
|-------------------------------------------------|----------|
| Номинальная мощность, кВт·А                     | 1000     |
| Номинальное напряжение, В (линейное/фазное)     | 1195/690 |
| Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup> | 600      |
| Номинальная частота, Гц                         | 50       |
| Номинальный момент, Н·м                         | 16000    |
| Номинальный ток статора, А                      | 500      |
| Диаметр расточки, мм <sup>2</sup>               | 800      |
| Активная длина, мм                              | 400      |
| Коэффициент мощности                            | 0,99     |
| Коэффициент полезного действия                  | 0,99     |

В России также ведутся исследования в области создания ВТСП электромеханических преобразователей и другого электрооборудования с применением ВТСП. В Московском авиационном институте в 2015 году были закончены работы по проектированию, сборке и испытанию работы всех систем ВТСП генератора с замкнутой системой криогенного обеспечения (см. рисунок 3). В таблице 1 представлены основные характеристики генератора. Разработанный ВТСП генератор, действительно отличается исключительными характеристиками. Основная область применения такого генератора – это ветроэнергетические установки, используемые для автономного питания технологических процессов сельскохозяйственных объектов [4].

### Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующий вывод: при сравнении механических, электрических и магнитных характеристик электрических машин, изготовленных из сверхпроводящих материалов с электрическими машинами классического исполнения, можно отметить значительное превосходство машин из сверхпроводящих материалов по данным характеристикам. Сами машины становятся доступными по цене, сверхпроводниковые ветрогенераторы обладают значительно меньшими массой, габаритами, большей устойчивостью к перегрузкам, а также вдвое меньшими потерями. За счёт этого ветряные генераторы прямого привода, выполненные из высокотемпературных сверхпроводников, имеют более высокий КПД при значительно меньших габаритах и стоимости по сравнению с классическими генераторами, что делает их незаменимыми для использования в отдаленных хозяйствах аграрной промышленности [3].

### Благодарности

Авторы выражают благодарность и глубокую признательность своим научным руководителям Копылову Сергею Игоревичу и Шаврову Александру Васильевичу за все наставления, советы и знания, которые Вы передали нам. Глубоко сожалеем, что Вы ушли так рано.

### Acknowledgement

The authors express their deep gratitude to their supervisors Sergey Igorevich Kopylov and Alexander Vasilyevich Shavrov for all the instructions, advice, knowledge that you have passed on to us. We are deeply sorry that you are gone too soon.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Макаренко Н. Высокотемпературные сверхпроводники и эра электросамолетов [Электронный ресурс] / Н. Макаренко // Наука и техника. – 2020. – URL: <https://naukatehnika.com/vysokotemperaturnye-sverxprovodniki.html> (дата обращения: 21.04.2021).
2. Покровский Д. В. Применения высокотемпературных сверхпроводников в энергетике [Электронный ресурс] / Д. В. Покровский // ВИНТИ РАН. – 2020. – URL: <https://pue8.ru/elektrotehnik/624-nekotorye-aspekty-primeneniya-vysokotemperaturnykh-sverkhprovodnikov-v-energetike.html> (дата обращения: 21.04.2021).
3. Бупежанова А. Б. Применение высокотемпературной сверхпроводимости в ветроэнергетике [Электронный ресурс] / А. Б. Бупежанова, И. В. Захаров, Т. С. Калинин // Молодой ученый. – 2016. – № 7 (111). – С. 44-49. – URL: <https://moluch.ru/archive/111/27281/> (дата обращения: 14.05.2021).
4. Зингер М. А. Ветроэнергетические установки с использованием высокотемпературной сверхпроводимости [Электронный ресурс] / М. А. Зингер, К. В. Клементьева, И. В. Захаров // Молодой ученый. – 2016. – № 14 (118). – С. 142-146. – URL: <https://moluch.ru/archive/118/32856/> (дата обращения: 21.04.2021).
5. Бубенчиков А. А. Экологическая экспертиза ветроэнергетической установки [Электронный ресурс] / А. А. Бубенчиков, Н. Г. Демидова, Н. Г. Мальков // Молодой ученый. – 2016. – № 28.2 (132.2). – С. 31-35. – URL: <https://moluch.ru/archive/132/37006/> (дата обращения: 22.04.2021).
6. Закиров И. В. Автономная ветроэлектростанция с комбинированным аккумулированием энергии для сельскохозяйственных объектов : дисс. на соиск. ученой степени канд. тех. наук : 05.20.02 : защищена 09.12.2016 / Закиров Илья Валерьевич. – Зерноград, 2016. – 135 с.
7. Паршин Н. И. Современные регуляторы возбуждения турбогенераторов / Н. И. Паршин, А. А. Переверзев // Ресурсосберегающее энергетическое оборудование и машины для производства сельскохозяйственной продукции: материалы международной заочной научно-практической конференции 23 мая 2018 г., Балашиха / М-во сельского хозяйства Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Российский гос. аграрный заочный ун-т». – Балашиха, 2018. – С. 186-191.
8. Закабунин А. В. Асинхронные многоскоростные полюсопереключаемые генераторы в автономных ветроэнергетических установках средней полосы России / А. В. Закабунин // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2015. – № 19 (24). – С. 45-49.
9. Мамедов Ф. А. Использование асинхронных многоскоростных полюсопереключаемых генераторов в автономных ветроэнергетических установках / Ф. А. Мамедов, А. В. Закабунин, А. Е. Гуреев А.Е. и др. // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: материалы VI международной научно-технической конференции 13-14 мая 2008 г., Москва / Федеральное агентство научных организаций, Федер. гос. бюджет. научное учреждение «Всероссийский научно-исслед. институт электрификации сельского хозяйства». – М., 2008. – Т. 4. – С. 338-340.
10. Закабунин А. В. Совершенствование управления режимами работы асинхронных полюсопереключаемых двигателей сельскохозяйственных механизмов : дисс. на соиск. ученой степени канд. тех. наук : 05.20.02 : защищена 11.09.2002 / Закабунин Александр Викторович. – Москва, 2002. – 160 с.

11. Попова М. В. Перспективы использования токоограничивающего устройства с применением сверхпроводниковых материалов / М. В. Попова, А. А. Переверзев // General question of world science: материалы международной научно-практической конференции 30 марта 2021 г. – Брюссель, 2021.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Makarenko N. Vysokotemperaturnye sverhprovodniki i jera jelectrosamoletoy [High-temperature superconductors and an era of electric aircraft] [Electronic resource] / N. Makarenko // Nauka i tehnika. – 2020. – URL: <https://naukatehnika.com/vysokotemperaturnye-sverhprovodniki.html> (accessed: 21.04.2021). [in Russian]

2. Pokrovskij D. V. Primeneniya vysokotemperaturnykh sverhprovodnikov v jenergetike [Applications of high-temperature superconductors in power engineering] [Electronic resource] / D. V. Pokrovskij // VINITI RAN. – 2020. – URL: <https://pue8.ru/elektrotehnik/624-nekotorye-aspekty-primeneniya-vysokotemperaturnykh-sverhprovodnikov-v-energetike.html> (accessed: 21.04.2021). [in Russian]

3. Bupezhanova A. B. Primenenie vysokotemperaturnoj sverhprovodimosti v vetrojenergetike [Application of high-temperature superconductivity in wind industry] [Electronic resource] / A. B. Bupezhanova, I. V. Zaharov, T. S. Kalin // Molodoj uchenyj. – 2016. – № 7 (111). – P. 44-49. – URL: <https://moluch.ru/archive/111/27281/> (accessed: 14.05.2021). [in Russian]

4. Zinger M. A. Vetrojenergeticheskie ustanovki s ispol'zovaniem vysokotemperaturnoj sverhprovodimosti [Wind power plants using high-temperature superconductivity] [Electronic resource] / M. A. Zinger, K. V. Klement'eva, I. V. Zaharov // Molodoj uchenyj. – 2016. – № 14 (118). – P. 142-146. – URL: <https://moluch.ru/archive/118/32856/> (accessed: 21.04.2021). [in Russian]

5. Bubenchikov A. A. Jekologicheskaja jekspertiza vetrojenergeticheskoy ustanovki [Environmental due diligence of a wind power plant] [Electronic resource] / A. A. Bubenchikov, N. G. Demidova, N. G. Mal'kov // Molodoj uchenyj. – 2016. – № 28.2 (132.2). – P. 31-35. – URL: <https://moluch.ru/archive/132/37006/> (accessed: 22.04.2021). [in Russian]

6. Zakirov I. V. Avtonomnaja vetrojelektrostancija s kombinirovannym akkumulirovanijem jenergii dlja sel'skohozjajstvennykh ob'ektov [Autonomous wind farm with combined energy storage for agricultural facilities] : dissertation for the degree of PhD in Engineering : 05.20.02 : defense of the thesis 09.12.2016 / Zakirov Il'ja Valer'evich. – Zernograd, 2016. – 135 p. [in Russian]

7. Parshin N. I. Sovremennye reguljatory vobuzhdenija turbogeneratorov [Modern regulators of turbine generators excitation] / N. I. Parshin, A. A. Pereverzev // Resursosberegajushhee jenergeticheskoe oborudovanie i mashiny dlja proizvodstva sel'skohozjajstvennoj produkcii: materialy mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 23 maja 2018 g. [Resource-saving energy equipment and machines for the production of agricultural products: Materials of the international correspondence scientific and practical conference], Balashiha / M-vo sel'skogo hozjajstva Ros. Federacii, Feder. gos. bjudzhet. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obrazovaniya «Rossijskij gos. agrarnyj zaochnyj un-t» [Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Russian State Agrarian Correspondence University”]. – Balashiha, 2018. – pp. 186-191. [in Russian]

8. Zakabunin A. V. Asinhronnye mnogokorostnye poljusoperekljuchaemye generatory v avtonomnykh vetrojenergeticheskikh ustanovkakh srednej polosy Rossii [Asynchronous multi-speed pole-switched generators in autonomous wind power plants in central Russia] / A. V. Zakabunin // Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta [Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University]. – 2015. – № 19 (24). – P. 45-49. [in Russian]

9. Mamedov F. A. Ispol'zovanie asinhronnykh mnogokorostnykh poljusoperekljuchaemykh generatorov v avtonomnykh vetrojenergeticheskikh ustanovkakh [The use of asynchronous multi-speed pole-switched generators in autonomous wind power plants] / F. A. Mamedov, A. V. Zakabunin, A. E. Gureev A.E. et al // Jenergoobespechenie i jenergosberezhenie v sel'skom hozjajstve: materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii 13-14 maja 2008 g. [Energy supply and energy saving in agriculture: Materials of the VI international scientific and technical conference 13-14 May 2008], Moskva / Federal'noe agentstvo nauchnykh organizacij, Feder. gos. bjudzhet. nauchnoe uchrezhdenie «Vserossijskij nauchno-issled. institut jelektrifikacii sel'skogo hozjajstva» [Federal Agency for Scientific Organizations, Federal State Budgetary Institution of Science “All-Russian Research Institute for the Electrification of Agriculture”]. – Moscow, 2008. – V. 4. – pp. 338-340. [in Russian]

10. Zakabunin A. V. Sovershenstvovanie upravlenija rezhimami raboty asinhronnykh poljusoperekljuchaemykh dvigatelej sel'skohozjajstvennykh mehanizmov [Improving the control of operating modes of asynchronous pole-switched motors of agricultural machinery] : dissertation for the degree of PhD in Engineering : 05.20.02 : defense of the thesis 11.09.2002 / Zakabunin Aleksandr Viktorovich. – M., 2002. – 160 p. [in Russian]

11. Popova M. V. Perspektivy ispol'zovaniya tokoogranichivajushhego ustrojstva s primenением sverhprovodnikovyx materialov [Perspectives for the use of a current-limiting device using superconducting materials] / M. V. Popova, A. A. Pereverzev // General question of world science: materialy XIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 30 marta 2021 g. [General question of world science: Materials of the XIII international scientific and practical conference 30th of March 2021]. – Brjussel', 2021. [in Russian]



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.025>**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОБИЛЬНАЯ БИОМЕТРИЯ ПО ОТПЕЧАТКУ ПАЛЬЦА И ДИНАМИКИ РУКОПИСНОЙ ПОДПИСИ**

Научная статья

**Серикова Ю.И.<sup>1,\*</sup>, Князев В.Н.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4959-321X;<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

\* Корреспондирующий автор (julia-ska[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Авторами предлагается многофункциональная мобильная биометрия по совмещенным статическим и динамическим характеристикам человека. В качестве биометрических характеристик выступают отпечаток пальца и динамика рукописной подписи. Предлагаемая система относится к мультимодальным и состоит из модуля захвата данных, модуля извлечения функций и их объединения и модуля сравнения и принятия решения.

Научная новизна. Впервые в преобразователе биометрия-код используются сети квадратичных форм, извлечение биометрических характеристик идет последовательно, а их преобразование параллельно, образуя единый код доступа. При обработке сложных биометрических данных возникают ошибки второго рода весьма значительные и для их компенсации авторами предлагается переход из пространства обычных кодов в  $2^{256}$  состояний в более компактное пространство расстояний Хэмминга. За счет этого достигается оптимальное соотношение ошибок первого и второго рода.

**Ключевые слова:** биометрия, глубокие нейронные сети, нечеткие экстракторы, сети квадратичных форм, преобразование Фурье, ошибки первого рода, ошибки второго рода, расстояние Хэмминга.

**MULTIFUNCTIONAL MOBILE BIOMETRICS USING HUMAN FINGERPRINT AND DYNAMICS OF HANDWRITTEN SIGNATURE**

Research article

**Serikova Yu.I.<sup>1,\*</sup>, Knyazev V.N.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4959-321X;<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

\* Corresponding author (julia-ska[at]yandex.ru)

**Abstract**

The authors propose multifunctional mobile biometrics based on combined static and dynamic characteristics of a person. The biometric characteristics are the fingerprint and the dynamics of the handwritten signature. The proposed system is multimodal and consists of a data capture module, a function extraction module and their combination, and a comparison and decision module.

Scientific novelty. For the first time in a biometrics-code converter, networks of quadratic forms are used, the extraction of biometric characteristics is carried out sequentially, and their transformation is carried out in parallel, forming a single access code. When processing complex biometric data, the arising errors of the second kind are very significant and to compensate them, the authors propose a transition from the space of ordinary codes in  $2^{256}$  states to a more compact space of Hamming distances, due to which the optimal ratio of errors of the first and second kind is achieved.

**Keywords:** biometric, deep neural networks, fuzzy extractors, networks of quadratic forms, Fourier series, FAR, FRR, Hamming distance.

Today biometrics is an integral part of the global information technology market and is used as a convenient, reliable and innovative mechanism to ensure information security by recognizing the unique biometric characteristics inherent in an individual form to each person. According to the forecast «J'son & Partners Consulting» [1], the global market for information technology will reach US \$ 40 billion as early as 2022 (Fig. 1).

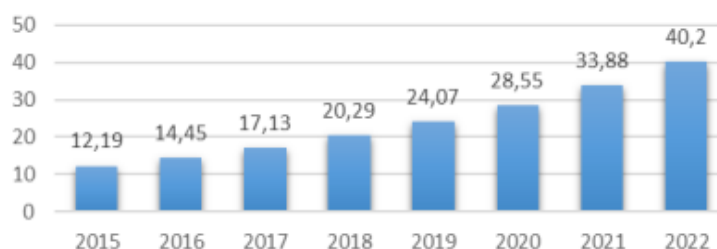


Fig. 1 – Volume of the world information technology market by 2015-2022

A similar situation is expected in the Russian market. The widespread use and possibilities of mobile technologies have shaped the need for people to lead their lives in constant motion. To meet this need, applications installed on mobile devices and tablets, and all kinds of transactions processed by them, must be protected. Therefore, we believe that special attention should be paid to the consideration of multifunctional mobile biometrics.

Multifunctional mobile biometrics belongs to the class of multimodal biometric systems used on mobile devices and tablets. Previously, we were faced with insufficient computing power of these devices, so the integration of several biometric modalities

was impractical, now we have reached a new scientific and technical level. To date, there are 3 clusters of biometric data processing methods (Fig. 2): fuzzy extractors, deep neural networks and neural network converters biometrics-code.

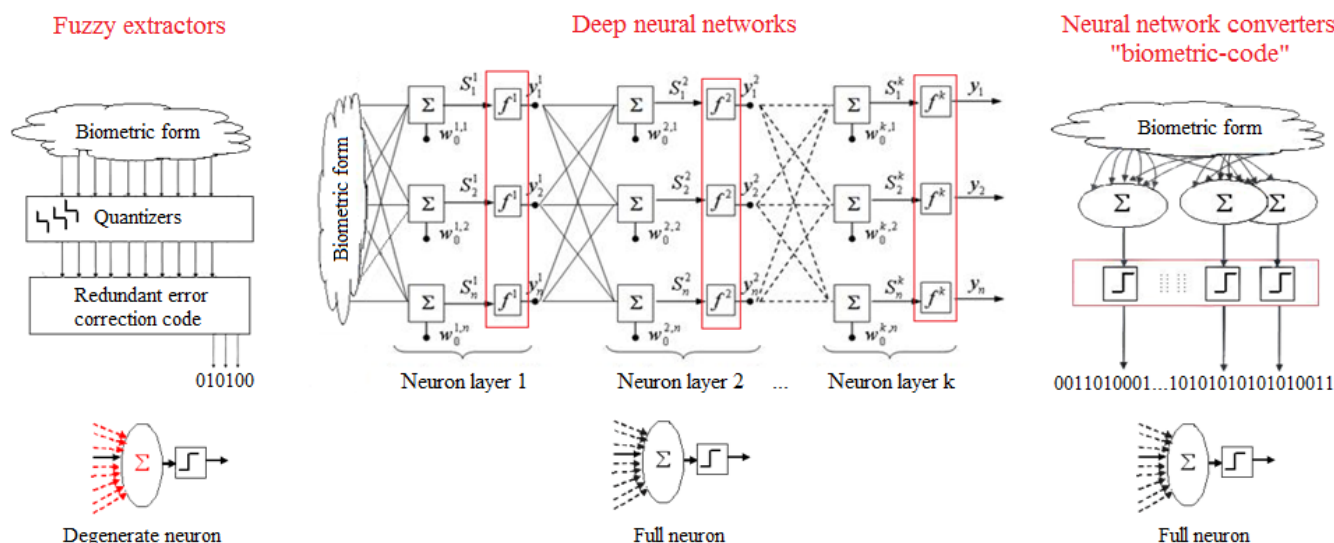


Fig. 2 – Biometric data processing methods

Overview and comparative analysis of the advantages and disadvantages of biometric data processing methods show in tables 1-3.

Table 1 – Comparative analysis of the advantages and disadvantages of fuzzy extractors

| Advantages                                                                                                                                                       | Disadvantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Training of a neural network on image of stranger (biometric form «Alien») is not required.<br>2. Ease of implementation of the biometric system in practice. | 1. When processing data, the parameters of feature distribution are not taken into account.<br>2. Error-correcting codes are very redundant.<br>3. There is a strong vulnerability to tampering with an access key relative to other methods.<br>4. «Raw data» quantization (so the higher false acceptance rate (FAR) and false rejection rate (FRR)). |

Table 2 – Comparative analysis of the advantages and disadvantages of deep neural networks

| Advantages                                                                                                                                                                                                                                        | Disadvantages                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Saving network memory (elastic fixing of weights).<br>2. Possibility of accurate forecasting.<br>3. High recognition accuracy and partial resistance to changes in scale, displacement, rotation, change of perspective and other distortions. | 1. Requires large computing resources.<br>2. Overfitting problem.<br>3. Linear subdivision of own regions. |

Table 3 – Comparative analysis of the advantages and disadvantages of neural network converters «biometric-code»

| Perceptrons and their modifications (GOST R 52633.5-2011)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Advantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Disadvantages                                                                                                                                                |
| 1. Data enrichment<br>2. Biometric reference masking<br>3. The presence of a secure neural network container<br>4. Effective filtering of noise                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1. Network training is required on the «Alien» samples.<br>2. There is a need to store databases «Own» and «Alien».<br>3. Linear subdivision of own regions. |
| Quadratic form networks                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                              |
| Advantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Disadvantages                                                                                                                                                |
| 1. Does not require large computing resources and does not require network training on the samples of «Alien».<br>2. Data enrichment and non-linear separation of eigenvalues of standards in the feature space.<br>3. Possibility of accurate forecasting.<br>4. Masking the biometric reference and the presence of a secure neural network container.<br>5. It is possible to isolate neurons to encrypt data multiple times, which in turn strengthens the protection of the network weights.<br>6. Effective noise filtering and mobility of use. | 1. Storing the parameters of the distribution of feature values (but in encrypted form).<br>2. Instability of output codes.                                  |

Different requests may require different authentication, including recommendations to increase user experience when requesting access to sensitive information. But, since mobile devices and tablets are used by people in various conditions, usually not controlled, we recommend using static and dynamic characteristics of a person as biometric characteristics in multifunctional mobile biometrics to ensure reliability. Let us demonstrate the operation of such a system using the example of two biometric characteristics: a fingerprint and the dynamics of a handwritten signature (Fig. 3). Initially, it was planned to use deep neural networks [3], since they have proven themselves well in fingerprint recognition. However, attempts to use deep neural networks to solve the problem of recognition based on the dynamics of a handwritten signature did not justify the desired effect, and a number of fundamental shortcomings were revealed in the joint recognition of the «symbiosis» of static and dynamic characteristics:

1. The algorithm for training deep neural networks «backpropagation of the error» has exponential computational complexity; it cannot be implemented on a tablet that does not have access to Google's network training servers (which is not acceptable in highly reliable biometric authentication applications).
2. The existing algorithms for training (retraining) deep neural networks require a huge database (about 100,000 or more training examples), which is not mobile and resource-intensive.
3. Modern deep neural networks, which provide high-quality recognition, have up to 100 layers of neurons, which is extremely redundant according to Kolmogorov's theorems [4].
4. Users of authentication systems based on deep neural networks cannot be sure of the reliability of their work, since they do not have methods for quickly detecting FAR and FRR errors (for this reason, the developers of this technology have to come up with other criteria for assessing the reliability of networks, which, in turn, does not allow the implementation of such systems on a mobile device or tablet).
5. Training of deep neural networks cannot be fully automated and is always carried out under human control, which is unacceptable in applications of highly reliable biometric authentication.

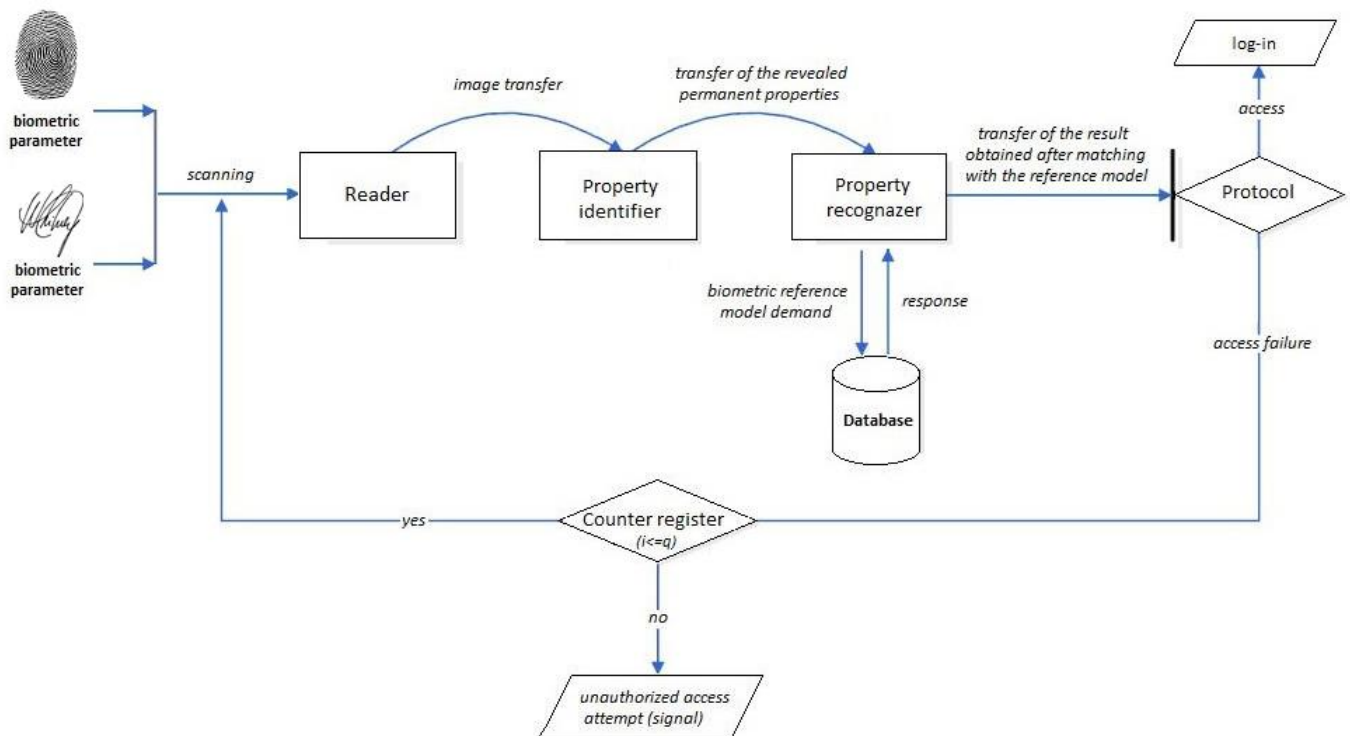


Fig. 3 – Multifunctional mobile biometric

Based on the above, it was decided to use quadratic form networks as a method for processing biometric information.

The authentication process [5], including its complexity, is developed in accordance with the request of users of multifunctional mobile biometrics. The system will consist of the following modules: Reader (Data Capture Module), Property Identifier (Function Extraction and Combining Module) and Property recognizer (Comparison and Decision Module). The quality of image recognition by the system, namely its neural network part - the biometrics-code converter, depends on the size of the space of primary and secondary biometric characteristics. Processing and extraction of primary characteristics will occur in the Reader. The number of primary characteristics (raw biometric data) depends on the capabilities of the system hardware and is determined by the number of degrees of freedom, which describes the number of quasi-continuous characteristics. Extraction of biometric characteristics: fingerprint and signature dynamics goes sequentially from sensors to the Reader. For the formation of secondary characteristics, the obtained primary raw data will be parallelly used, which will undergo a discrete Fourier transform (Fig. 4) for the spectra of each of the parameters, followed by the extraction of their harmonic amplitudes and then undergo the data normalization procedure.

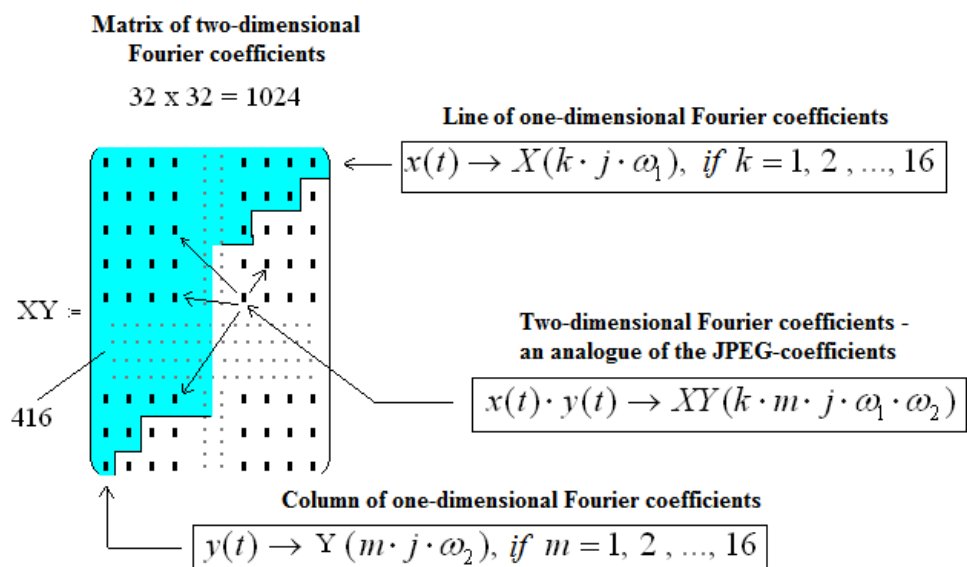


Fig. 4 – Discrete decomposition of biometric parameters in a Fourier series into coefficients

The formation of secondary characteristics and their normalization will occur in the Property Identifier, at the output we will receive two vectors of controlled parameters, using the procedure – boost, we will create a symbiosis of biometric sampling (we will not combine two vectors into a new neural network container, we will generate a pair of iterators (range) which will cover the range of both containers). We need this in order to increase the reliability of the access code. By encompassing the range of both containers, we can impose certain conditions on the given range to label the biometric form «Own». So, if the first part of the generated access code has a threshold deviation of 10% from the original biometric form «Own», the system will also consider this image as own object (this allows us to deal with the shortcomings of fingerprint processing when it is injured). If we combined two vectors into a new neural network container and imposed a similar condition on it, we would change the entire access code, not part of it, and this would be followed by an incorrect biometric form «Own», which, according to statistics, could belong to the biometric form «Alien». The resulting code in the Property Identifier is a Biometric sample. The property recognizer will then compare the biometric sample declared in the system with the biometric reference stored in the Database (Fig. 5). If the result is positive, the system makes a decision on the user's admission, if the result is negative, access is.

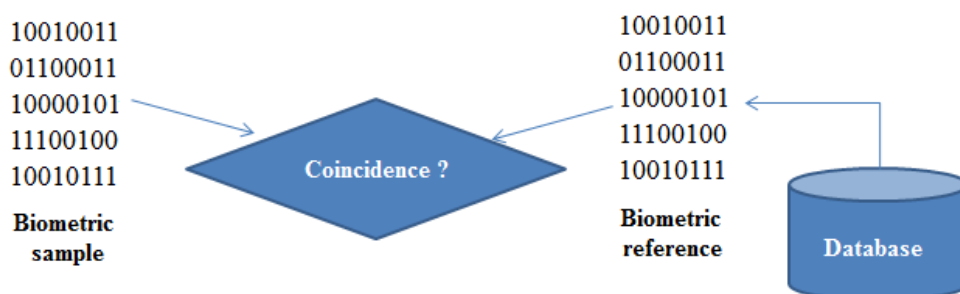


Fig. 5 – Comparison of Biometric sample declared to the system with Biometric reference stored in Database

Each neuron in the neural converter looks at the presented biometric image from its own perspective in its dimension. The more in the neural network transducer, the more reliably it is able to distinguish the biometric form «Own» from the biometric form «Alien» or the biometric form «All aliens». When using a neural network of 256 neurons, the FAR is extremely small. To assess the FRR by conventional methods, it is required to create test databases of biometric formations of a very large size. We propose a transition from the spaces of ordinary codes  $2^{256}$  to the more compact space of Hamming distances:

$$h = 256 - \sum_{i=1}^{256} "c_i" \oplus "x_i" \quad (1)$$

where  $c_i$  - the bit of the code «Own»;

$x_i$  - the bit of the code «Alien».

This transition leads to a significant decrease in the requirements for the size of the test sample. Simplification of calculations is due to the fact that Hamming convolution (1) is a good FRR normalizer. FRR estimation by neural network converter show in the Figure 6.

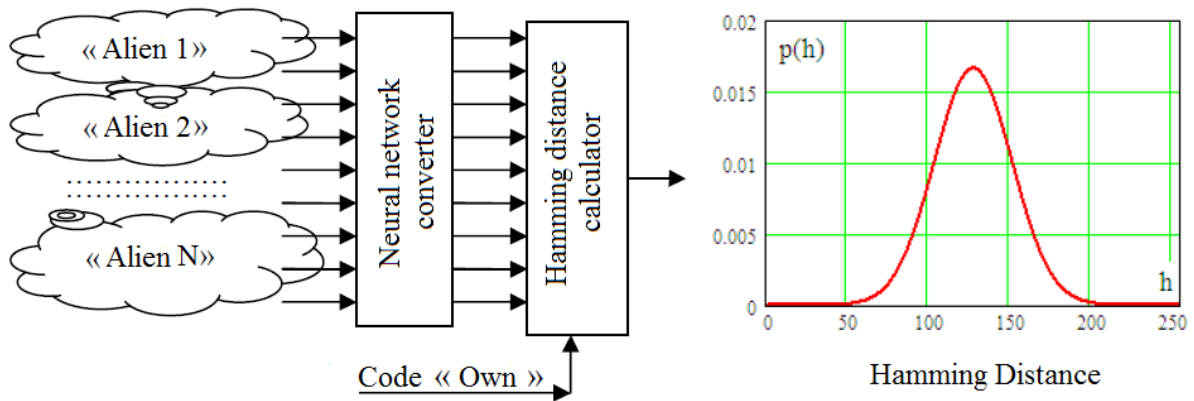


Fig. 6 – FRR estimation by neural network converter

The obtained sample of Hamming distances allows calculating the mathematical expectation -  $E(h)$  and standard deviation -  $\sigma(h)$ . With this data, we can roughly determine the FRR:

$$FRR \approx \frac{1}{\sigma(h)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(E(h)-u)^2}{2(\sigma(h))^2}\right\} \cdot du \quad (2)$$

The probability of a complete match between code «Own» and code «Alien»  $h=0$  is estimated as the probability of hitting in the interval from  $[-\infty; 1]$  continuous normal distribution, which is redundant. That is, estimate (2) is an upper bound for the probability of FAR. The transition to the Hamming distance space makes it possible to estimate the entropy of long codes (full-fledged neurons not degenerate). In this case, the entropy can be calculated both in the space of ordinary Hamming distances, and in the space of Hamming convolutions modulo 256 [6]. Listing of the MathCAD program show in the Figure 7. The expediency of switching to Hamming convolutions modulo 256 is because the encoding of texts in Russian and English is carried out in the ASCII standard (8 code bits per text character).

```

T := "book is intended" ETOL := str2vec(T) last(ETOL) = 15
TXT := str2vec(TTT) last(TXT) = 365
i := 0..(365 - 15)

h256_i := ∑_{j=0}^{15} |TXT_{j+i} - ETOL_j|

h256^T =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	220	387	445	461	405	397	377	231	405	375

mean(h256) = 399.806 stdev(h256) = 98.965

-log(pnorm(1, 399.806, 98.965), 2) = 15.129

15.129 / 16 = 0.946

```

Fig. 7 – Calculation of the entropy of the code in the space of Hamming convolutions modulo 256

It turns out that the meaningful characters of the text must be compared with each other in the metric of 256 states (the number of states is 8 bits of the code).

### Conclusion

Based on the results of the analysis of the biometric technologies market, taking into account information security and the volume of processed data, neural network converters «biometrics-code» was chosen as a biometric data processing method, and fingerprint biometrics and handwriting dynamics used as biometric characteristics. The FAR and FRR errors are fundamentally unremovable and we can only talk about reducing their probability to practically acceptable values. Since the error statistics are determined by the testing technique and duration, the volume and nature of statistical samples, the error probabilities are not only a function of the reliability of the method (statistically justified probability of the coincidence of characteristics in different people), but also a whole range of operating conditions. This is achieved through transition from the spaces of ordinary codes  $2^{256}$  to the more compact space of Hamming distances.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

**Список литературы / References**

1. Крылова, И. Ю. Биометрические технологии как механизм обеспечения информационной безопасности в цифровой экономике / И. Ю. Крылова, О. С. Рудакова. // Молодой ученый. — 2018. — № 45 (231). — С. 74-79.
2. ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. — М.: Стандартинформ, 2011 — 20 с.
3. Третье поколение нейросетей: "Глубокие нейросети" — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mql5.com/ru/articles/1103> (дата обращения: 10.05.2021).
4. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции непрерывных функций одного переменного / А.Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. 1957. № 5 (114). С. 953–956.
5. Серикова Ю. И. Актуальные проблемы безопасности биометрических систем аутентификации / Ю. И. Серикова, В. Н. Князев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 4 (46) Часть 2. — С. 177—182. — DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.105.
6. Иванов А.И. Численная оценка показателей квантовой сцепленности выходных кубит нейросетевой молекулы преобразователя биометрических данных / А.И. Иванов. Пенза – 2018 г. Издательство АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт» (АО «ПНИЭИ») – 27 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Krylova, I. Yu. Biometricheskie tehnologii kak mehanizm obespechenija informacionnoj bezopasnosti v cifrovoj jekonomike [Biometric technologies as a mechanism for ensuring information security in the digital economy] / I. Yu. Krylova, O.S. Rudakova // Young scientist. - 2018. - No. 45 (231). - P. 74-79. [in Russian]
2. GOST R 52633.5-2011. Zashhita informacii. Tehnika zashhity informacii. Avtomaticheskoe nejrosetevyh preobrazovatelej biometrija-kod dostupa [GOST R 52633.5-2011. Information protection. Information protection technology. The neural net biometrics-code converter automatic training]. Moscow: Standartinform Publisher, 2011. [in Russian]
3. Tret'e pokolenie nejrosetej: "Glubokie nejroseti" [The third generation of neural networks: "Deep neural networks"] - [Electronic resource]. URL: <https://www.mql5.com/ru/articles/1103> (accessed: 05/10/2021). [in Russian]
4. Kolmogorov A.N. O predstavlenii nepreryvnyh funkcij neskol'kih peremennyh v vide superpozicii nepreryvnyh funkcij odnogo peremennogo [On the representation of continuous functions of a number in the form of a superposition of continuous functions of one variable] / A.N. Kolmogorov // Dokl. AN SSSR [Dokl. Academy of Sciences of the USSR]. 1957. No. 5 (114). P. 953–956. [in Russian]
5. Serikova Yu. I. Aktual'nye problemy bezopasnosti biometricheskih sistem autentifikacii [Actual problems of biometric authentication systems security] / Yu. I. Serikova, V.N. Knyazev // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International research journal]. - 2016. - No. 4 (46) Part 2. - P. 177-182. - DOI: 10.18454 / IRJ.2016.46.105. [in Russian]
6. Ivanov A.I. Chislennaja ocenka pokazatelej kvantovoj sceplennosti vyhodnyh kubit nejrosetevoj molekuly preobrazovatelja biometricheskih dannyh [Numerical estimation of the parameters of the quantum entanglement of the output qubits of the neural network molecule of the biometric data converter] / A.I. Ivanov. Penza - 2018 Publishing house of JSC «Penza Scientific Research Electrotechnical Institute» (JSC «PNIEI») - 27 p. [in Russian]



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.026>**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
ОСНОВАНИЯ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ Г. ЯКУТСКА**

Научная статья

**Слепцов А.А.<sup>1,\*</sup>, Рожин И.И.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0782-9810;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-9998-6425;<sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия;<sup>2</sup> Якутский научный центр СО РАН Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

\* Корреспондирующий автор (msleptsova[at]mail.ru)

**Аннотация**

Рассматривается проект реконструкции второй взлетно-посадочной полосы (ВПП) длиной в 3400 м аэропорта на территории г. Якутска Республики Саха (Якутия). В данной работе исследуется температурный режим основания взлетно-посадочной полосы аэропорта. Математическая модель постановки задачи динамики температурного поля в массиве выполнена на основе общей постановки задач типа Стефана. Здесь рассчитаны температурные поля массива грунтов под насыпью ВПП в различные моменты времени (от 1 года до 100 лет) в следующем варианте: армобетон (0,24 м), цементобетон (0,24 м), насыпной грунт (0,68 м) и пеностирол (0,08 м). Также рассчитаны глубины оттаивания основания ВПП. Укладка теплоизоляции в основание ВПП позволяет значительно увеличить его теплоустойчивость.

**Ключевые слова:** взлетно-посадочная полоса, теплоизоляция, задача Стефана, математическое моделирование.

**A NUMERICAL STUDY OF THE TEMPERATURE REGIME OF FROZEN BOTTOM SOILS  
OF THE RUNWAY IN YAKUTSK**

Research article

**Sleptsov A.A.<sup>1,\*</sup>, Rozhin I.I.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0782-9810;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-9998-6425;<sup>1</sup> Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia;<sup>2</sup> Yakut Research Center, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

\* Corresponding author (msleptsova[at]mail.ru)

**Abstract**

The current article examines the project of reconstruction of the 3400 m second runway of the Yakutsk airport in the Republic of Sakha (Yakutia) and investigates the temperature regime of the airport runway subgrade. The mathematical model of setting the problem of the dynamics of the temperature field in the array is based on the general formulation of the Stefan-type problems. The study also calculates the temperature fields of the soil mass under the GDP embankment at various points in time (from 1 year to 100 years) in the following version: fiber-reinforced concrete (0.24 m), cement concrete (0.24 m), soil fill (0.68 m) and styrofoam (0.08 m). The depth of thawing of the second runway subgrade is also calculated. Laying thermal insulation in the base of the second runway subgrade allows for a significant increase in its heat resistance.

**Keywords:** runway, thermal insulation, Stefan-type problem, mathematical modeling.

Город Якутск расположен в зоне сплошной мерзлоты. Одним из стратегически важных объектов на территории города является аэропорт. Аэропорт расположен, где толщина слоя вечной мерзлоты достигает 300 метров. Исходя из этого был разработан уникальный проект реконструкции второй взлетно-посадочной полосы (ВПП) длиной в 3400 метров. Функционирование подобных объектов вызывает изменение всех компонентов природной среды, что приводит к изменению свойств оснований сооружений и сказывается на их устойчивости. На сегодняшний день повышение надежности транспортных сетей, построенных в зоне сплошной вечной мерзлоты, является актуальной задачей современной инженерной геокриологии и транспортной строительной отрасли.

Для проектирования ВПП нужно учитывать промерзание, морозное пучение и оттаивание влажного грунта, которые являются сложными термодинамическими процессами в промерзающих основаниях.

В данной работе методами математического моделирования исследуется температурный режим основания ВПП аэропорта на территории г. Якутска. Целью исследования является расчет глубины оттаивания грунтов под насыпью, состоящей из слоев данной последовательности: армобетон, цементобетон, насыпной грунт из песка со щебнем, гидроизоляционная пленка, пенополистирол. Рассматриваемая задача включает модель многослойной конструкции насыпи и основания, состоящей из различных слоев грунта.

При построении математической модели приняты следующие допущения.

1. Перенос тепла внутри массива грунта осуществляется только теплопроводностью, тем самым при расчете температурного поля пренебрегаем массообменными процессами. Это инженерное допущение принято вследствие наличия в насыпи полосы гидроизоляционной пленки.

2. Теплофизические характеристики слоев грунта считаются кусочно-постоянными для талого и мерзлого состояний, учитывая их малое изменение в рассматриваемом диапазоне температур.

3. Фазовое превращение влаги происходит при постоянной температуре фазового превращения ( $T_f - const$ ), без изменения начальной влажности ( $w - const$ ) и объема. В действительности же фазовое превращение «жидкость – твердое тело» отмечается при различных температурах и с некоторым изменением объема. Так, для водонасыщенного

грунта фазовое превращение происходит и при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$  в зависимости от засоленности и влажности грунта, и с изменением влажности при его промерзании [1].

### 1. Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи динамики температурного поля в массиве выполнена на основе общей постановки задач типа Стефана. Модель включает квазилинейное уравнение теплопроводности с соответствующими краевыми условиями, которое с учетом многослойного массива имеет вид:

$$\tilde{C}^k(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda^k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad 0 \leq x \leq H, \quad \tau > 0 \quad (1)$$

где  $\lambda^k(T)$  и  $\tilde{C}^k(T)$  – коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость  $k$ -го слоя массива, которые аппроксимируются как кусочно-постоянные (сглаженные) функции по температуре  $T$  в окрестности фазового перехода. В данной работе используются следующие аппроксимации – линейная зависимость  $\lambda(T)$  и параболическая  $\tilde{C}(T)$  в окрестности фазового превращения:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_s, & \text{при } T < T_f - \Delta_s; \\ \lambda_s - (\lambda_s - \lambda_l) \left[ \frac{T - T_f + \Delta_s}{\Delta_l + \Delta_s} \right], & \text{при } T_f - \Delta_s \leq T < T_f + \Delta_l; \\ \lambda_l, & \text{при } T \geq T_f + \Delta_l; \end{cases} \quad (2)$$

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} C_s, & \text{при } T < T_f - \Delta_s; \\ C_f + (C_s - C_f) \left[ \frac{T - T_f}{\Delta_s} \right]^2, & \text{при } T_f - \Delta_s \leq T < T_f; \\ C_f + (C_l - C_f) \left[ \frac{T - T_f}{\Delta_l} \right]^2, & \text{при } T_f \leq T < T_f + \Delta_l; \\ C_l, & \text{при } T \geq T_f + \Delta_l; \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta$  – температурные полуинтервалы сглаживания  $\delta$ -функции Дирака, которые могут быть не равны друг другу ( $\Delta_l \neq \Delta_s$ ,  $\Delta_l > 0$ ,  $\Delta_s > 0$ ). Нижние индексы означают:  $f$  – фазовое превращение,  $l$  – жидкая фаза,  $s$  – твердая фаза. При этом скрытая теплота фазового превращения  $W = (l_f + T_f c_p) \rho w$  фазового вводится с применением  $\delta$ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость в коэффициент теплоемкости. Здесь  $l_f$  – удельная теплота фазового перехода «вода–лед»,  $c_p$  – удельная теплоемкость воды,  $T_f$ ,  $\rho$ ,  $w$  – температура фазового перехода, плотность и влажность  $k$ -го слоя массива соответственно.

Значение коэффициента теплопроводности при температуре фазового превращения:

$$\lambda_f = \lambda_s - (\lambda_s - \lambda_l) \cdot \left[ \frac{\Delta_s}{\Delta_s + \Delta_l} \right].$$

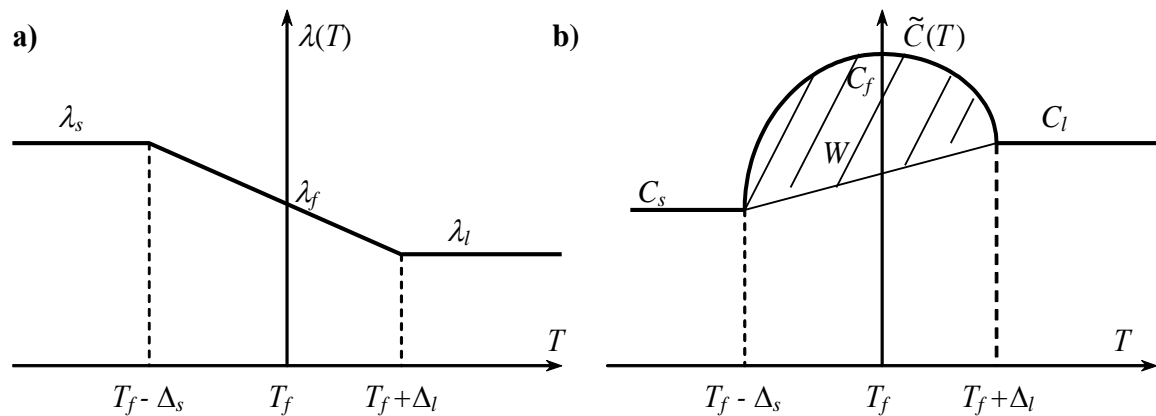
В выражении (3) неизвестную величину  $C_f$  определяем из равенства скрытой теплоты фазового превращения  $W$  количеству теплоты, получаемому при аппроксимации объемной теплоемкости в интервале температур от  $T_f - \Delta_s$  до  $T_f + \Delta_l$  и равному площади заштрихованной области (рис. 1), т.е.

$$W = \int_{T_f - \Delta_s}^{T_f} \left\{ C_f + (C_s - C_f) \cdot \left[ \frac{T - T_f}{\Delta_s} \right]^2 \right\} dT + \int_{T_f}^{T_f + \Delta_l} \left\{ C_f + (C_l - C_f) \cdot \left[ \frac{T - T_f}{\Delta_l} \right]^2 \right\} dT - \\ - \int_{T_f - \Delta_s}^{T_f} \left\{ C_s - \frac{(C_s - C_l) \cdot (T - T_f + \Delta_s)}{(\Delta_s + \Delta_l)} \right\} dT + \int_{T_f}^{T_f + \Delta_l} \left\{ C_l - \frac{(C_s - C_l) \cdot (T - T_f - \Delta_l)}{(\Delta_s + \Delta_l)} \right\} dT.$$

Откуда после интегрирования определяется значение объемной теплоемкости при температуре фазового превращения:



$$C_f = \frac{3W - C_s \Delta_s - C_l \Delta_l}{2(\Delta_s + \Delta_l)} + \frac{3}{4}(C_s + C_l).$$

Рис. 1 – Зависимость  $\lambda(T)$  и  $\tilde{C}(T)$  от температуры.

Температурное поле в начальный момент времени (при  $\tau = 0$ ) задается в виде функции, зависящей только от координаты  $x$ :

$$T_0 = f(x) \text{ при } \tau = 0. \quad (4)$$

На границе между дневной поверхностью массива и окружающей средой принимается граничное условие III рода (закон Ньютона-Рихмана):

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_e \left( T_e + \frac{Q_c (1 - A_e)}{\alpha_e} - T \right), \text{ при } x = 0, \quad (5)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности верхнего слоя массива (армобетона),  $T_e$  – температура воздуха,  $Q_c$  – суммарная солнечная радиация,  $A_e$  – альбедо поверхности,  $\alpha_e$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха. Видно, что в уравнении (5) учитывается поступление тепла излучением [5].

На поверхностях, разделяющих слои массива, выполняются условия идеального теплового контакта, т.е. принимаются граничные условия IV рода: равенство температур и тепловых потоков непосредственно на границах между слоями.

Условием на нижней границе массива является условие тепловой изоляции на достаточно большом расстоянии теплового влияния:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \text{ при } x = H. \quad (6)$$

В разработанной математической модели основания взлетно-посадочной полосы учитываются изменения температуры воздуха со временем, воздействия суммарной солнечной радиации и альбедо поверхности, изменение коэффициента конвективного теплообмена в зависимости от скорости ветра.

Расчеты выполнены при исходных данных, включающих сведения о вещественном составе массива грунтов, их теплофизических характеристиках, данные термометрии. Недостающие данные были получены из опубликованной справочной или научной литературы.

В области многолетней мерзлоты эта задача существенно осложняется, так как здесь необходимо учитывать фазовый переход «лед – вода». Задачи такого рода называются задачами Стефана и для их численного решения используются методы, основанные на подходе, изложенном в монографии [2]. Для этого метода авторы работы [3] разработали экономичную разностную схему сквозного счета со сглаживанием разрывных коэффициентов в уравнении теплопроводности по температуре в окрестности фазового перехода. Схемы со сглаживанием коэффициентов предложены также в работе [4] и характеризуются тем, что граница раздела фаз явно не выделяется, что позволяет использовать однородные разностные схемы.

## 2. Численная реализация модели и алгоритм решения

Для применения разностного метода в области изменения переменных  $x$ ,  $\tau$  вводятся пространственно-временные сетки – основную и потоковую

$$\begin{aligned}\overline{w_x} &= \{x_i = x_{i-1} + h_i, \quad i = \overline{2, n-1}; \quad x_1 = 0; \quad x_n = H\}, \\ \overline{h_i} &= \{h_2/2, \quad i = 1; \quad (h_i + h_{i+1})/2, \quad i = \overline{2, n-1}; \quad h_n/2, \quad i = n\}, \\ \overline{w_t} &= \{\tau_j = j \cdot d\tau, \quad j = \overline{1, J-1}; \quad \tau_0 = 0; \quad \tau_J = \text{Max}(\tau_j)\},\end{aligned}$$

где  $h_i, \overline{h_i}$  – шаги основной и потоковой пространственной сетки соответственно,  $n$  – количество узлов сетки по координате  $x$ ;  $d\tau$  – шаг временной сетки;  $J$  – максимальное число локальных итераций за время  $\text{Max}(\tau_j)$ .

Тип сетки по координатам зависит от шага сетки. Так, например, для равномерной сетки шаг есть постоянная величина равная  $h_i = H/(n-1)$ . При тех значениях аргумента, где функция резко меняется, шаг сетки должен быть малым, иначе точность вычисления по этой сетке будет плохой.

Сеточные методы основаны на замене дифференциальных уравнений эквивалентными алгебраическими соотношениями, которые содержат значения функции в отдельных дискретных точках – узлах сетки. Эти соотношения могут быть получены заменой производных, входящих в дифференциальное уравнение, их приближенными выражениями через разности значений функций в узлах сетки.

Исходное дифференциальное уравнение, таким образом, заменяется системой линейных алгебраических уравнений, начальные и граничные условия также заменяются разностными условиями для сеточной функции. В результате процесс решения сводится к выполнению несложных алгебраических операций. При формулировке разностных аппроксимаций обычно рассматриваются все пространственные узлы на нескольких прямых, соответствующих соседним значениям временной сетки (временным слоям). Процесс решения разностной задачи представляет определение значений искомой функции на всех временных слоях, исходя из известного начального ее распределения. С такой точки зрения разностная схема есть рекуррентное соотношение, связывающее соседние временные слои.

Как известно, явные разностные схемы почти всегда не пригодны для численного решения краевых задач параболического типа (1) из-за того, что они устойчивы лишь при неоправданно малых шагах временной сетки. Поэтому широкое распространение получили неявные разностные схемы.

Для получения консервативной разностной схемы, которая расписывается исходя из законов сохранения энергии в пределах ячейки (методом баланса или интегроинтерполяционным методом [6, 7]), интегрируется уравнение (1) по  $x \in [x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ . В результате получим

$$\tilde{C}_i \frac{T_i - \tilde{T}_i}{d\tau} \cdot \overline{h_i} = \frac{\lambda_{i+1/2}}{h_{i+1}} (T_{i+1} - T_i) - \frac{\lambda_{i-1/2}}{h_i} (T_i - T_{i-1}), \quad i = \overline{2, n-1} \quad (7)$$

где верхний знак « $\sim$ » над  $T$  означает, что величина берется с нижнего временного слоя. При этом разностные аналоги теплофизических параметров (теплоемкости, коэффициента теплопроводности) вычисляются как некоторые средние значения теплофизических функций в пределах ячейки по выражениям (2) и (3):

$$\tilde{C}_i = \tilde{C}(T_i), \quad \lambda_{i+1/2} = \lambda\left(\frac{T_{i+1} + T_i}{2}\right), \quad \lambda_{i-1/2} = \lambda\left(\frac{T_i + T_{i-1}}{2}\right).$$

Распределение температуры  $T_i$  определяется из системы линейных алгебраических уравнений (7) с соответствующими начальными и граничными условиями, которые имеют неособую трехдиагональную матрицу, что позволяет решать их методом прогонки. Пусть известно распределение температур на  $j$ -м временном слое и требуется определить распределение температур на  $(j+1)$ -м временном слое. Так как сглаженные коэффициенты зависят от температуры, получающаяся разностная задача будет нелинейной и решение разностного уравнения будет найдено методом простой итерации с использованием прогоночных алгоритмов. При этом процесс итерации повторяется до тех пор, пока не достигается наперед заданная точность.

Систему разностных уравнений (7) можно записать в каноническом виде:

$$A \cdot T_{i+1} - (A + B + E) \cdot T_i + B \cdot T_{i-1} = -E \cdot \tilde{T}_i, \quad \text{при } i = \overline{2, n-1} \quad (8)$$

где приняты следующие обозначения:  $A = \frac{\lambda_{i+1/2}}{h_{i+1}}, \quad B = \frac{\lambda_{i-1/2}}{h_i}, \quad E = \tilde{C}_i \frac{\overline{h_i}}{d\tau}.$

Решение системы уравнений (8) будем искать в виде

$$T_i = p_i \cdot T_{i+1} + q_i, \quad i = \overline{n-1, 1} \quad (9)$$

где  $p_i, q_i$  – неизвестные коэффициенты, называемые прогоночными.

Соотношение (9) справедливо для всех значений индекса  $i = \overline{n-1, 1}$ . Тогда подставляя значение  $T_{i-1} = p_{i-1} \cdot T_i + q_{i-1}$  в (8), получим выражение

$$T_i = \frac{A \cdot T_{i+1}}{A + E + B \cdot (1 - p_{i-1})} + \frac{E \cdot \tilde{T}_i + B \cdot q_{i-1}}{A + E + B \cdot (1 - p_{i-1})}.$$

Сравнивая последнее уравнение с (9) находим рекуррентные соотношения для определения прогоночных коэффициентов:

$$p_i = \frac{A}{A + E + B \cdot (1 - p_{i-1})}, \quad q_i = \frac{E \cdot \tilde{T}_i + B \cdot q_{i-1}}{A + E + B \cdot (1 - p_{i-1})}, \quad \text{при } i = \overline{2, n-1} \quad (10)$$

Другие прогоночные коэффициенты определяются следующим образом. Из граничного условия (5) в точке при  $i = 1$  имеем

$$p_i = \frac{A}{A + E + \alpha_g}, \quad q_i = \frac{E \cdot \tilde{T}_i + \alpha_g \cdot (T_g + Q_c(1 - A_g)/\alpha_g)}{A + E + \alpha_g} \quad (11)$$

При  $i = n$  с учетом условия тепловой изоляции (6) получим

$$T_i = \frac{E \cdot \tilde{T}_i + B \cdot q_{i-1}}{E + B \cdot (1 - p_{i-1})}. \quad (12)$$

Решение задачи методом прогонки, разделяется на два этапа – сначала определяются прогоночные коэффициенты  $p_i$  и  $q_i$  (прямая прогонка), затем вычисляются значения искомой функции (обратная прогонка). Число арифметических операций пропорционально числу уравнений.

Алгоритм численного решения одномерной задачи теплопроводности с фазовым переходом может описываться следующим образом:

I. Задаются геометрические и физические условия, а также начальное распределение температуры массива  $T_i = T_0$ , дается нулевое приближение  $\overset{s=0}{T}_i = \tilde{T}_i$  при  $i = \overline{1, n}$ .

II. Определяется температурное распределение в рассматриваемом массиве насыпи и ее основания при теплообмене с окружающей средой:

а) находятся прогоночные коэффициенты  $p_i$  и  $q_i$  для всех  $i = \overline{1, n-1}$  по уравнениям (10), (11);

б) по известному значению  $T_n$  (12), используя рекуррентную формулу обратной прогонки (9), определяются последовательно значения  $T_i$  для всех  $i = \overline{n-1, 1}$ ;

в) пункты «а» и «б» повторяются до выполнения условия сходимости итераций  $\max_{i=1, n} \left| T_i^{s+1} - T_i^s \right| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  –

бесконечно малая величина,  $s$  – порядок итерации, т.е. проводятся локальные итерации, так как коэффициенты  $\lambda_i$  и  $\tilde{C}_i$  являются нелинейными функциями температуры.

На каждом временном слое пункт II повторяется.

Данная разностная задача будет вполне определенной, если указать способ выбора параметров сглаживания, который играет определенную роль в точности решения.

Коэффициенты  $\lambda_i$  и  $\tilde{C}_i$  разностного уравнения (7) вычисляются в зависимости от значения температуры по выражениям (2) и (3). Теплота фазового превращения, выделяющаяся или поглощающаяся на фазовом фронте, учитывается в выражении теплоемкости  $\tilde{C}$ , определенном в интервале сглаживания. Если в указанный интервал не попадет ни одно узловое значение температуры, то температурное поле будет определено без учета выделения или поглощения теплоты на фронте. Следовательно, возникает условие выбора длины интервала сглаживания: параметры сглаживания должны быть выбраны так, чтобы на каждом временном шаге интервал сглаживания определялся значениями температур хотя бы в двух соседних узлах, между которыми находится фронт фазового превращения (сглаживание в пределах одной пространственной ячейки).

Если фазовый фронт находится между пространственными узлами  $x_{i-1}$  и  $x_i$ , то должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} \Delta_l + \Delta_s \geq |T_i - T_{i-1}|, \\ (T_i - T_f) \cdot (T_{i-1} - T_f) \leq 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_i - T_f \leq \Delta_l, T_f - T_{i-1} \leq \Delta_s, \text{ при } T_i > T_{i-1}; \\ T_{i-1} - T_f \leq \Delta_l, T_f - T_i \leq \Delta_s, \text{ при } T_i < T_{i-1}. \end{cases}$$

где  $T_i$  и  $T_{i-1}$  – значения температуры в узлах  $X_i$  и  $X_{i-1}$  соответственно.

Для оценки точности конечно-разностной схемы, разработанной на основе метода Самарского-Моисеенко, было проведено сравнение результатов численного расчета с точным автомодельным решением задачи протаивания неограниченного массива грунта при постоянных температурах на границах [8]. Численная модель данной одномерной задачи реализуется на языке программирования «Pascal», при этом величина радиуса теплового влияния берется наибольшей, т.к. аналитическое решение получено для полупространства. Эта задача имеет точное автомодельное решение, а коэффициент пропорциональности в законе движения границы фазового перехода найден с помощью пакета программ «MathCad Professional».

Расчеты были проведены при следующих входных данных:  $T_f = 0$  °C;  $T_0 = -3$  °C;  $T_{i-1} = 10$  °C;  $l_f = 334.4$  кДж/кг;  $\rho = 1400$  кг/м<sup>3</sup>;  $w = 0.2$ ;  $\lambda_l = 1.974$  Вт/(м·°C);  $\lambda_s = 2.601$  Вт/(м·°C);  $C_l = 3745.28$  кДж/(м<sup>3</sup>·°C);  $C_s = 2808.96$  кДж/(м<sup>3</sup>·°C);  $H = 100$  м.

Оказалось, что наибольшая относительная погрешность вычисления координаты фазового превращения наблюдается, если сглаживание проводить в пределах одной пространственной ячейки. Эта погрешность значительно понижается, если фазовая область охватывает больше двух узлов. Очевидно, что в начале процесса протаивания не могут выполняться условия выбора интервала сглаживания, поэтому в эти моменты времени сглаживание можно проводить в пределах одной пространственной ячейки или ограничиться несколькими узлами. При симметричности половинок интервала сглаживания получается, что количества узлов, охватываемых областью фазового превращения как со стороны жидкой, так и твердой фаз будут неодинаковыми. Для задачи протаивания число узлов, входящих в интервал сглаживания со стороны жидкой фазы меньше, чем со стороны твердой.

На рис. 2 показана динамика движения фазового фронта. При этом число узлов, входящих в интервал сглаживания со стороны жидкой фазы равно 3, а со стороны твердой – 5. Видно, что с течением времени скорость движения фазового фронта уменьшается из-за малой теплоинерционности талого грунта. Некоторое различие между результатами объясняется тем, что в точном автомодельном решении в отличие от численного массив грунта считается неограниченным, то есть для движения фронта промерзания создаются как бы благоприятные условия.

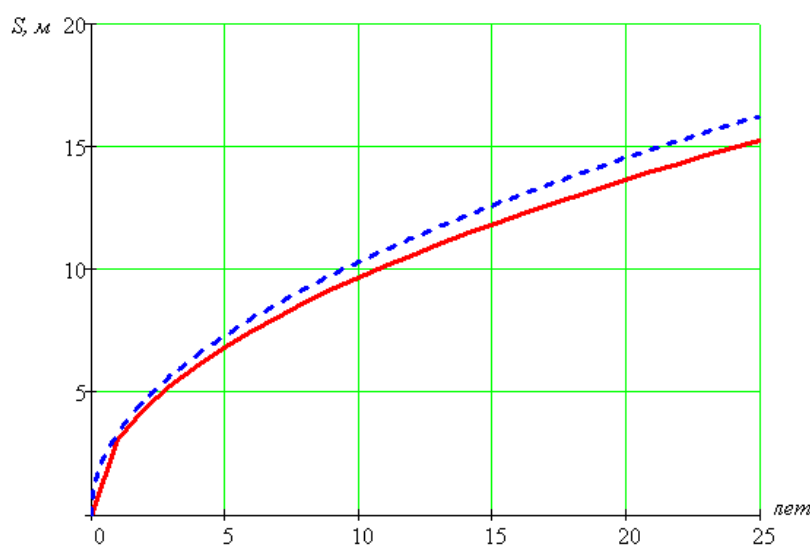


Рис. 2 – Изменение координаты фазового фронта с течением времени: сплошная линия – точное автомодельное решение; штриховая – численное

Сравнение точного автомодельного и численного решений позволяет сделать вывод о правильности разработанной конечно-разностной схемы математической модели и вычислительного алгоритма.

На основе вышеописанного алгоритма был разработан программный комплекс на языке программирования Delphi7, обладающим широким набором сервисных программ, обеспечивающих вывод таблиц, изолиний, отображающих динамику процесса теплообмена. Разработанный комплекс программ, подтвердил свою работоспособность и эффективность на многочисленных расчетах теплового состояния рассматриваемого тела.

В таблице 1 даны среднемесячные значения температуры воздуха ( $T_a$ ), скорости ветра ( $v_a$ ) [5], [8] и суммарной солнечной радиации для условий г. Якутска ( $Q_c$ ) [9]. Значения этих величин между месяцами были аппроксимированы линейными зависимостями. Физические характеристики слоев грунтов приведены в таблице 2. Здесь теплофизические свойства грунтов приняты по нормативным значениям, представленными заказчиком; а свойства бетона и пенополистирола приняты по [10], [11]. В табл. 3 представлены натурные данные температурного поля по глубине массива грунтов.

Таблица 1 – Среднемсячные значения температуры воздуха, скорости ветра и суммарной солнечной радиации

| Параметры                      | Январь  | Февраль | Март     | Апрель  | Май     | Июнь    |
|--------------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| $T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$ | -42,6   | -35,9   | -22,2    | -7,2    | 5,8     | 15,4    |
| $\nu_{\text{в}}, \text{м/с}$   | 1,4     | 1,4     | 2,0      | 2,8     | 3,4     | 3,3     |
| $Q_{\text{с}}, \text{Вт/м}^2$  | 14,188  | 48,363  | 120,594  | 192,515 | 211,320 | 244,213 |
| Параметры                      | Июль    | Август  | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь  | Декабрь |
| $T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$ | 18,7    | 14,9    | 6,2      | -8,0    | -28,3   | -39,5   |
| $\nu_{\text{в}}, \text{м/с}$   | 3,0     | 2,8     | 2,6      | 2,6     | 2,0     | 1,3     |
| $Q_{\text{с}}, \text{Вт/м}^2$  | 225,134 | 165,771 | 106,867  | 51,523  | 21,219  | 7,841   |

Таблица 2 – Характеристики слоев многослойного массива насыпи и ее грунтового основания

| № | Вид слоя                                 | Толщина, м | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Влажность | Температура фазового перехода, °C | Коэффициент теплоемкости, Вт/(м·°C) |             | Объемная теплоемкость $\text{С} \cdot 10^{-6}, \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ |       |
|---|------------------------------------------|------------|------------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|   |                                          |            |                              |           |                                   | $\lambda_l$                         | $\lambda_s$ | $C_l$                                                                                       | $C_s$ |
| 1 | Армобетон                                | 0,24       | 2500                         | 0,00      | 0,00                              | 2,04                                | 2,04        | 2,100                                                                                       | 2,100 |
| 2 | Цементобетон                             | 0,24       | 2500                         | 0,00      | 0,00                              | 2,04                                | 2,04        | 2,100                                                                                       | 2,100 |
| 3 | Насыпной грунт (песок средней крупности) | 0,67       | 1880                         | 0,17      | 0,80                              | 1,814                               | 2,035       | 2,472                                                                                       | 2,015 |
| 4 | Пенополистирол                           | 0,08       | 150                          | 0,00      | 0,00                              | 0,06                                | 0,06        | 0,201                                                                                       | 0,201 |

Таблица 3 – Значения температур по глубине массива грунтов в середине мая

| $x, \text{м}$       | 0    | 1     | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     |
|---------------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| $T, ^\circ\text{C}$ | -1,0 | -1,4  | -2,0  | -2,8  | -3,9 | -4,15 | -4,05 |
| $x, \text{м}$       | 7    | 8     | 9     | 10    | 11   | 12    | 13    |
| $T, ^\circ\text{C}$ | -3,8 | -3,55 | -3,25 | -2,75 | -2,5 | -2,1  | -1,9  |
| $x, \text{м}$       | 14   | 15    | 16    | 17    | 18   | 19    | 20    |
| $T, ^\circ\text{C}$ | -1,5 | -1,3  | -1,2  | -1,2  | -1,2 | -1,2  | 1,2   |

Примечание: при температуре воздуха  $0^\circ\text{C}$

В результате получены температурные поля массива грунтов под насыпью полосы взлета и посадки в различные моменты времени в основании ВПП (насыпь толщиной 1,24 м): армобетон и цементобетон толщиной 0,48 м, насыпной грунт толщиной 0,68 м, пенополистирол толщиной 0,08 м (см. рисунки 3 и 4). В расчетных данных взят май месяц [11].

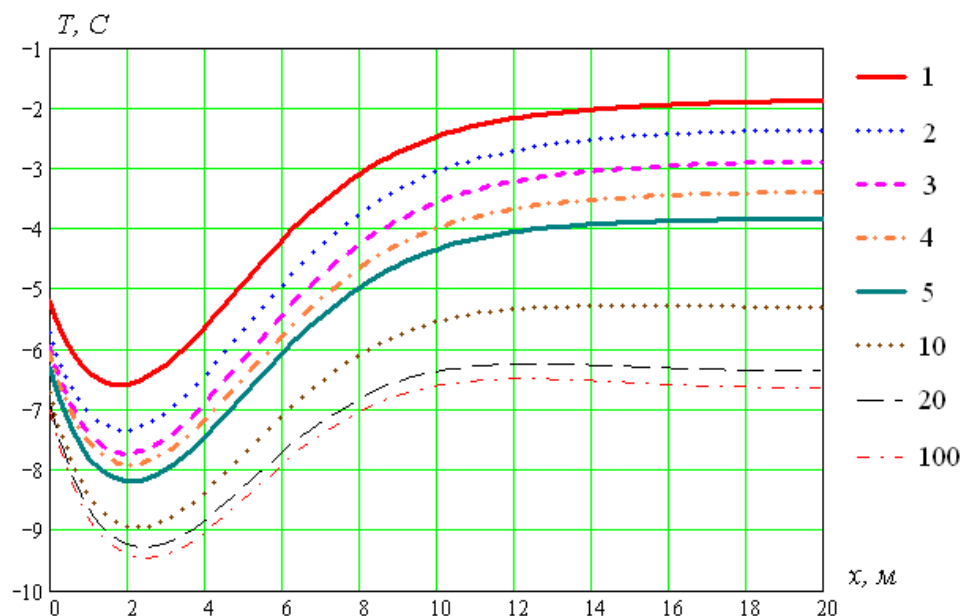


Рис. 3 – Распределение температуры грунтов под насыпью по глубине в мае

Примечание: цифры у кривых соответствуют годам

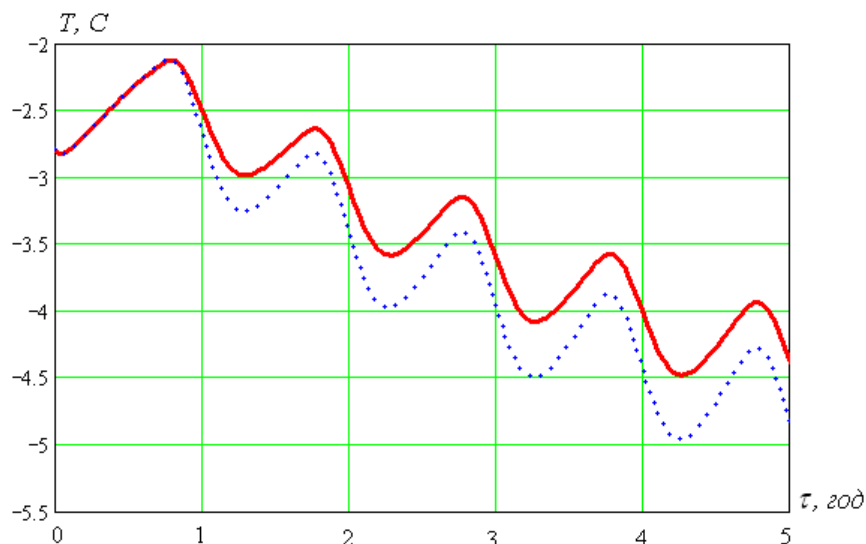


Рис. 4 – Динамика изменения температуры массива грунтов на глубине  $z = 10$  м: сплошная кривая – при толщине изоляции 0,08 м; штриховая – при толщине 0,04 м

В таблице 4 приведена рассчитанная глубина сезонного оттаивания грунтов под насыпью в середине октября (м).

Таблица 4 – Глубина сезонного оттаивания грунтов под насыпью

| Год | 1 вариант насыпи высотой 1.24 м |              | 2 вариант насыпи высотой 1.20 м |              |
|-----|---------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|
|     | с изоляцией (0.08 м)            | без изоляции | с изоляцией (0.04 м)            | без изоляции |
| 1   | 0.52                            | 1.47         | 0.79                            | 1.52         |
| 2   | 0.38                            | 1.11         | 0.62                            | 1.24         |
| 3   | 0.36                            | 1.07         | 0.61                            | 1.15         |
| 4   | 0.34                            | 1.05         | 0.59                            | 1.14         |
| 5   | 0.33                            | 1.03         | 0.58                            | 1.10         |
| 10  | 0.29                            | 1.00         | 0.54                            | 1.00         |
| 20  | 0.28                            | 0.96         | 0.53                            | 0.99         |
| 100 | 0.26                            | 0.95         | 0.51                            | 0.98         |

Укладка теплоизоляции в основание насыпи позволяет существенно уменьшить глубину оттаивания массива, тем самым, снизить объемы земляных работ при строительстве за счет уменьшения высоты насыпи, а также увеличить теплоустойчивость массива. Небольшая насыпь приводит к сокращению срока и снижению стоимости строительства.

Анализ результатов вычислительного эксперимента (опытные данные не могут быть получены в следствие ремонта ВПП на данный момент) показал, что применение слоя теплоизоляции в теплый период года в основание взлетно-посадочной полосы способствует затуханию нестационарных тепловых возмущений. Теплоизоляцию в основание ВВП полосы рекомендуется проложить в зимнее время, что будет способствовать аккумуляции холода в массиве, увеличить несущую способность полосы и продлить срок ее эксплуатации.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Велли Ю.Я. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах / Ю.Я. Велли, В.И. Докучаева, Н.Ф. Федорова. – Л.: Стройиздат, 1977. – 552 с.
2. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
3. Самарский А.А. Экономичная схема сквозного счета для многомерных задач Стефана / А.А. Самарский, Б.Д. Моисеенко // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – Т. 5. – № 5. – С. 816–827.
4. Будак Б.М. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана / Б.М. Будак, Е.Н. Соловьева, А.Б. Успенский // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. – Т. 5. – № 5. – С. 828–840.
5. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР / А.В. Павлов. – Якутск: Якутское книжное изд-во, 1975. – 304 с.
6. Калиткин Н.Н. Численные методы. / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
7. Самарский А.А. Методы решения сеточных уравнений. / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
8. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии / М.К. Гаврилова. – Якутск: Якутское книжное изд-во, 1973. – 120 с.
9. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. Госстрой России. – М.: ГУПП ЦПП, 2000. – 59 с.
10. СНиП II-3-79\*. Строительная теплотехника. Госстрой России. – М.: ГУПП ЦПП, 1998. – 29 с.
11. Порхаев Г.В. Прогнозирование температурного режима вечномёрзлых грунтов на застраиваемых территориях / Г.В. Порхаев, В.К. Щелоков. – Л.: Стройиздат, 1980. – 112 с.

12. Федоров А.Н. Спасская падь / А.Н. Федоров, Т.Х. Максимов, П.П. Гаврильев и др. // Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов. – Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2006. – 210 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Velli Ju.Ja. Spravochnik po stroitel'stvu na vechnomerzlyh gruntah [Handbook of construction on permafrost soils] / Ju.Ja. Velli, V.I. Dokuchaeva, N.F. Fedorova. – L.: Strojizdat, 1977. – 552 p. [in Russian]
2. Tihonov A.N. Uravnenija matematicheskoj fiziki [Equations of mathematical physics] / A.N. Tihonov, A.A. Samarskij. – M.: Nauka, 1977. – 736 p. [in Russian]
3. Samarskij A.A. Jekonomichnaja shema skvoznogo scheta dlja mnogomernyh zadach Stefana [Cost-effective end-to-end counting scheme for multidimensional Stefan problems] / A.A. Samarskij, B.D. Moiseenko // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoj fiziki [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. – 1965. – Vol. 5. – № 5. – P. 816–827. [in Russian]
4. Budak B.M. Raznostnyj metod so sglazhivaniem koeficientov dlja reshenija zadachi Stefana [Difference method with smoothing coefficients for solving the Stefan problem] / B.M. Budak, E.N. Solov'eva, A.B. Uspenskij // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoj fiziki [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 1965. – Vol. 5. – № 5. – P. 828–840. [in Russian]
5. Pavlov A.V. Teploobmen pochvy s atmosferoj v severnyh i umerennyh shirotah territorii SSSR [Heat exchange of the soil with the atmosphere in the northern and temperate latitudes of the territory of the USSR] / A.V. Pavlov. – Yakutsk: Yakutsk publishing house, 1975. – 304 p. [in Russian]
6. Kalitkin N.N. Chislennye metody [Numerical methods] / N.N. Kalitkin. – M. Nauka, 1978. – 512 p.
7. Samarskij A.A. Metody reshenija setochnyh uravnenij. [Methods for solving grid equations] / A.A. Samarskij, E.S. Nikolaev. – M. Nauka, 1978. – 592 p.
8. Gavrilova M.K. Klimat Central'noj Jakutii [Climate of Central Yakutia] / M.K. Gavrilova. – Yakutsk: Yakutsk publishing house, 1973. – 120 p. [in Russian]
9. SNiP 23-01-99. Stroitel'naja klimatologija. Gosstroj Rossii [Construction climatology. Gosstroy of Russia]. – M.: GUPP CPP, 2000. – 59 p. [in Russian]
10. SNiP II-3-79\*. Stroitel'naja teplotehnika. Gosstroj Rossii [Construction heat engineering. Gosstroy of Russia]. – M.: GUPP CPP, 1998. – 29 p. [in Russian]
11. Porhaev G.V. Prognozirovanie temperaturnogo rezhima vechnomerzlyh gruntov na zastraivaemyh territorijah [Forecasting of the temperature regime of permafrost soils in the built-up areas] / G.V. Porhaev, V.K. Shhelokov. – L.: Strojizdat, 1980. – 112 p. [in Russian]
12. Fedorov A.N. Spasskaja pad' [Spasskaya Pad] / A.N. Fedorov, T.H. Maksimov, P.P. Gavril'ev et al. // Kompleksnye issledovaniya merzlotnyh landshaftov [Complex studies of permafrost landscapes]. – Yakutsk: Publishing House of the Institute of Permafrost Studies SB RAS], 2006. – 210 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.027>**ОЧИСТКА ВОДЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЯНЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ,  
СОЛНЕЧНЫМ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Научная статья

**Хамиди Хамед<sup>1</sup>, Ниязманд Милад Ахмад<sup>2</sup>, Асрар Канишка<sup>3</sup>\*, Окольников Г.Е.<sup>4</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7529-9711;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3590-3157;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-1223-4122;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-8143-4614;<sup>1</sup> Джаузджанский университет, Джаузджан, Афганистан;<sup>2, 3, 4</sup> Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (kanshkas[at]mail.ru)

**Аннотация**

В этой статье изучалась обработка синтетических стоков, содержащих углеводороды нефти, с использованием солнечного фотокаталитического процесса с наночастицами TiO<sub>2</sub>, нанесенными на бетонные плиты. Назначенный солнечный фотореактор включал в себя 40-литровый резервуар для хранения загрязняющих веществ с погружным насосом, ступенчатую систему, состоящую из четырех ступеней, которые были стабилизированы фотокатализатором TiO<sub>2</sub>, перелив объемом 4 литра наверху лестницы и металлическое шасси с принадлежностями. В этом реакторе ультрафиолетовая (УФ) часть солнечного света использовалась в качестве источника излучения вместо УФ-ламп. Эффективность этой системы в оптимальных условиях оценивается при pH равном 4, массовой загрузке TiO<sub>2</sub> 80 г / м<sup>2</sup>, продолжительности УФ-облучения 240 мин, начальной концентрации 100 мг / л и концентрации H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 2000 мг. / Л соответствует 77,35% удалению химической потребности в кислороде (ХПК), 79,12% удалению всех нефтяных углеводородов (ТФН) и 86,91% удалению полициклических ароматических углеводородов (ПНА). Результаты испытаний газовой хроматографии / пламенно-ионизационного детектирования (GC-FID) отработанного образца до и после обработки и в оптимальных условиях показали удаление большей части полиароматических углеводородов, а то, что осталось, было безопасными алифатическими углеводородами.

**Ключевые слова:** нефтяные углеводороды, солнечный реактор, диоксид титана, бетон.**PURIFICATION OF WATER CONTAMINATED WITH PETROLEUM HYDROCARBONS  
BY USING THE SOLAR PHOTOCATALYTIC METHOD**

Research article

**Hamidi Hamed<sup>1</sup>, Niazmand Milad Ahmad<sup>2</sup>, Asrar Kanishka<sup>3</sup>\*, Okolnikova G.E.<sup>4</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7529-9711;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3590-3157;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-1223-4122;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-8143-4614;<sup>1</sup> Jawzjan University, Jawzjan, Afghanistan;<sup>2, 3, 4</sup> People's Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

\* Corresponding author (kanshkas[at]mail.ru)

**Abstract**

This paper studied synthetic effluents' treatment containing petroleum hydrocarbons using a solar photocatalytic process with TiO<sub>2</sub> nanoparticles coated on concrete plates. The assigned solar photoreactor included a 40-liter contaminant storage tank with a submersible pump, a stair system including four steps which was stabilized with TiO<sub>2</sub> photocatalyst, an overflow with 4 liters volume at the top of the stairs, and metal chassis with its accessories. In this reactor, the ultraviolet (UV) part of sunlight was used as the radiation source instead of UV lamps. The efficiency of this system in optimal conditions evaluated as at pH equal to 4, mass loading of TiO<sub>2</sub> equal to 80 g/m<sup>2</sup>, duration of UV irradiation equal to 240 min, initial concentration 100 mg/L, and concentration of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at 2000 mg/L equivalent to 77.35% removal of chemical oxygen demand (COD), 79.12% removal of total petroleum hydrocarbons (TPH), and 86.91% removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PHAs). The gas chromatography/flame ionization detection (GC-FID) test results of the effluent sample before and after treatment and under optimal conditions indicated removing most of the polyaromatic hydrocarbons and what remained was safe aliphatic hydrocarbons.

**Keywords:** petroleum hydrocarbons, solar reactor, Titanium dioxide, concrete.**Introduction**

Petroleum and its fractions are a collection of aliphatic and aromatic hydrocarbons. The latter is a stable, environmentally persistent, toxic, mutagenic, and carcinogenic compound [1], [2], [3]. Sources of oil pollution in the aquatic environment include oil spill, refinery effluent, water produced in oil fields, leaks from storage tanks or oil pipelines, ballast water, effluent from car wash, construction materials and, repairing and runoff resulted from rains in pump stations or washing inner-city tunnels [4], [6], [9]. In Afghanistan, oil wells are primarily located in the Afghan-Tajik and the Amu Darya basins [10] in the north of the country (Sar-e-Pul, Faryab Balkh). Simultaneously, the refinery and storage facilities are situated in the Balkh, Herat, and Sare Pul provinces. In the north of Afghanistan, extensive operations to exploit and transport petroleum products, the location of oil and gas facilities near the water sources and, lack of awareness about the causes and effects of oil pollution have increased the potential risk of contamination of water resources with petroleum compounds.



The methods for treatment of water and wastewater contaminated with petroleum compounds include physical, chemical, biological, and combined processes such as adsorption [11], filtration [12], membrane [13], electrochemical coagulation [14], advanced oxidation [15], stabilization ponds [16], anaerobic [17], flotation [18] etc. Moreover, each of these methods has advantages and disadvantages. These methods' efficiency is relevant to the level of treatment, the environment, and facility for application, capital cost, energy costs, technological simplicity, and maintenance. Among these methods, one of the newest, efficient, and most practical chemical methods is advanced oxidation, such as the heterogeneous photocatalytic process. This method uses sunlight to remove different harmful bacterias and organic pollutants with the assistance of a concrete photocatalyst. The photocatalytic process is mainly related to solar energy use, especially photocatalysis, and emphasizes converting solar energy into chemical energy [19]. In this process, complex and hardly-biodegradable organic compounds in the suspended or stabilized form and with the presence of photocatalyst nanoparticles  $\text{TiO}_2$ , expose to UV light and decompose into simpler compounds by producing highly oxidizing hydroxyl radicals [20].

Due to the active feature of the  $\text{TiO}_2$  near-ultraviolet region, this process is usually done with UV-A lamps [21]. In this research, with a unique look at the treatment method's environmental and economic dimensions, solar energy replaced the lamp. Considering that only 5% of the radiation reaching the earth's surface is UV, of which 98% is UV-A, and the intensity of its radiation near the earth's surface on a sunny day is about 20 to 30 watts per square meter, it can be understood that this part of the sunlight contains a small amount of the subtle radiation [22]. Solar photocatalytic methods have already been used to treat wastewater in different industries such as paper, textile, azo dye, detergent, etc. [23], [24]. Shavisi et al. studied photocatalytic degradation of ammonia in petrochemical wastewater using solar light/ $\text{TiO}_2$  photocatalysis. They selected the maximum concentration of ammonia in petrochemical wastewater equal to (975 mg/L). As a result, the solar reactor system led to 96.5% removal of ammonia in pH = 11 [25]. De Andrade et al. used  $\text{TiO}_2$  supported on autoclaved cellular concrete. They assessed the performance of three separate systems,  $\text{TiO}_2/\text{ACC}/\text{UV}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-P25}/\text{UV}$ , and UV in the oxidation of indigo carmine involving liquid chromatography combined with mass spectrometry. The results indicated that  $\text{TiO}_2\text{-P25}/\text{UV}$  and UV systems displayed removal rates of 60%, whereas  $\text{TiO}_2/\text{ACC}/\text{UV}$  about 100%, after 350 min of exposure [26]. Ghaly et al. studied the solar photocatalytic degradation of paper mill wastewater over synthesized nano  $\text{TiO}_2$ . As a result,  $\text{TiO}_2$  optimum dose of 0.75 g/L and pH value of 6.5, with 75% COD removal of the wastewater and 80% reduction of total suspended solids, was achieved within 180 min solar irradiation time [27]. Souza et al. employed photocatalysis to treat textile effluent from industrial laundry jeans and, for this purpose, used catalysts  $\text{TiO}_2$  P25,  $\text{TiO}_2$ , ZnO and  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , under artificial UV irradiation. The result based on textile effluent at pH 3.0 and catalysts concentration of 0.250 g  $\text{L}^{-1}$  indicated 95.91%; 87.35%; 86.95%, and 59.18% of reduction after 300 min of artificial irradiation.

$\text{TiO}_2$  was responsible for reducing 70 % of COD, and the photocatalytic activity of both  $\text{TiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  P25 was very close to each other [28]. The purpose of this study was to use the ultraviolet part of sunlight instead of lamps in the photocatalytic process to save energy and prevent the harmful environmental hazards caused by the production of electricity from other conventional methods.

#### **Materials and Methods. Photoreactor specifications**

In this research, the Manning equation was used for the hydraulic design of the photoreactor-stepped structure. For the thickness of 1.5 mm of effluent, the laminar flow's maximum flow rate was considered 3 liters per min. The photoreactor was built with a continuous rotational flow regime. It consisted of three parts: the contaminant storage tank, the photocatalytic reactor core, and the chassis and connected accessories. The photoreactor's stepped body was made from lightweight concrete with pumice aggregate fixed with  $\text{TiO}_2$  nanoparticles and placed at vertical distances of 2.5 cm. It consisted of four steps with dimensions of 3x9x18 cm and had a slope of 2.5 %. A galvanized sheet overflow with 4 liters volume steadily directed the flow on the concrete stairs' surface on the top of the concrete stairs.

Furthermore, to protect the reactor from wind, rain and prevent evaporation, it was covered with ordinary glass plates with a thickness of 3 mm and an ultraviolet light transmission coefficient of 70%. The 40-liter contaminant storage tank, which was equipped with a submersible aquarium pump, circulated the effluent at a rate of 200 liters per hour. An aeration pump with 250 liters per hour speed was placed in the overflow to compensate for the effluent's dissolved oxygen.

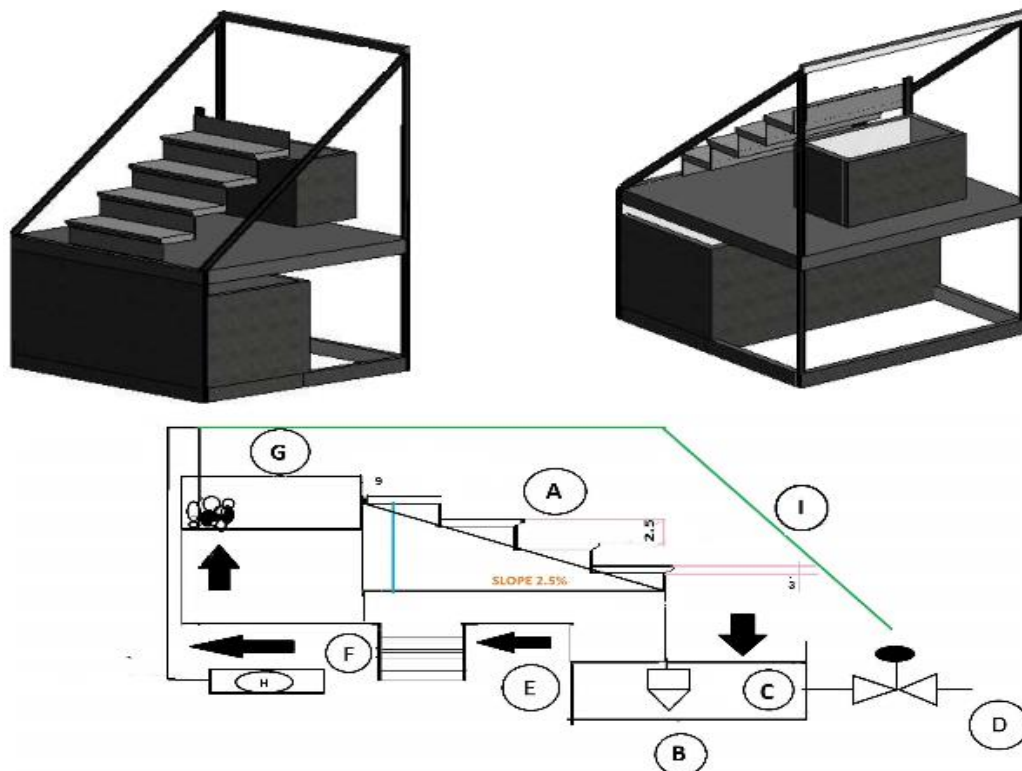


Fig. 1 – The design (scheme) of the solar photoreactor:

A – Concrete stairs; B – supply tank; C – pump; D – sampling valve; E – thermostatic bath; F – connection tube; G – overflow; H – aeration pump; I – glass layer (3mm)

### Concrete structure and nanoparticle covering

The wooden molds with dimensions of 4x12x24 cm were used to make concrete slabs by the preplaced aggregate method.

In this method, first, the mold was filled with coarse pumice stone, then cement-sand slurry with a ratio of 1:1 was added and placed for three days to attain concrete.

Table 1 – The materials and mixing ratios used in the concrete structure

| Cement                   | Water                        | Pumice             | Sand             | Porosity, %                              |
|--------------------------|------------------------------|--------------------|------------------|------------------------------------------|
| Type 2, volume<br>300 KG | 150 liters<br>drinking water | 10-15 mm<br>500 Kg | 2-5 mm<br>500 Kg | 20<br>(based on ASTM D 7063<br>standard) |

In addition, the TiO<sub>2</sub> nanoparticle powder used in this process had a purity of 99.9% and consisted of two phases of anatase, 78.8%, and rutile 21%. Besides, the slurry method was used to stabilize nanoparticles.

### The effluent sample

The studied effluent was prepared synthetically from a combination of distilled water and diesel of Hairatan refinery in different concentrations of 100, 200, 300, 400, and 500 mg/l.

These concentrations had COD equal to 162, 265, 382, 484 and 597 ppm, TPH equal to 33, 82, 135, 189 and 229 ppm, and PAHs equal to 36, 81, 129, 133, 169, 204 ppb.

### The measurement of parameters

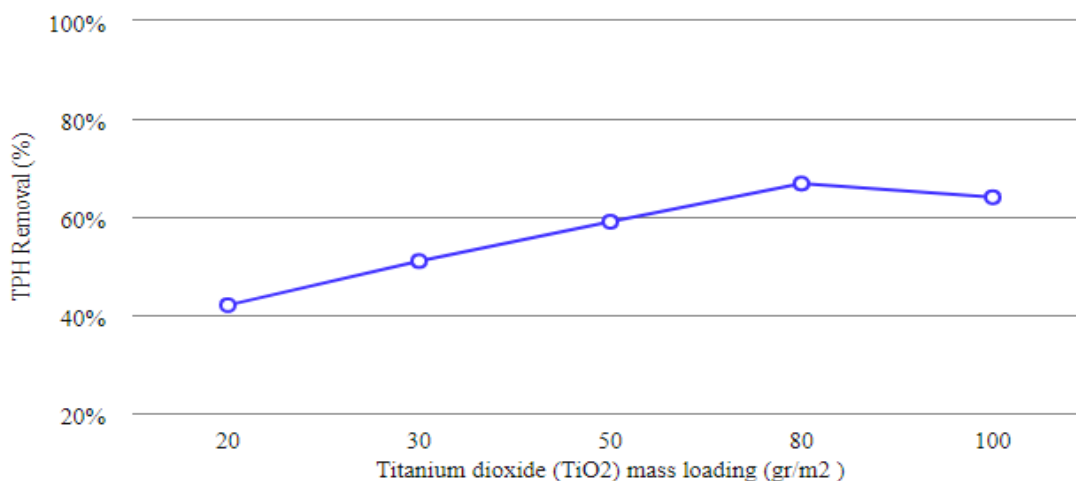
The solar photoreactor was set under direct angle of sunlight in 36°42'42.7"N 67°12'55.4"E and elevation of 357 m from the sea level. Various measuring devices have been used to analyze and measure the necessary parameters (Table 2).

Table 2 – The parameters and devices used for identifying the optimal condition

| Parameter                                                                                                                                  | Tool (the device used for measuring)                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sunlight intensity                                                                                                                         | Lutron UVA-365 UV Light Meter (radiometer).<br>Relevant information was recorded for 30 min from 9 am to 6 pm for four months. |
| Analyzing and measuring effluent samples of total petroleum hydrocarbon (TPH) before and after the process based on ASTM D7066-04 standard | InfraCal 2 TOG/TPH Analyzer of IndiaMART                                                                                       |
| Measuring polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) based on EPA 8100 standard                                                                | HP GC-FID 5890 Series II                                                                                                       |
| Measuring chemical oxygen demand (COD) based on 5220-B standard                                                                            | Hach reactor                                                                                                                   |
| pH adjustment                                                                                                                              | Hydrochloric acid (HCl)                                                                                                        |

### Titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ )

Among the concrete slabs with 20, 30, 50, 80, and 100 g/m<sup>2</sup> titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) loading, 80 g loading amount had the highest removal efficiency of 66.8% for the total petroleum removal, therefore selected as the optimal value.

Fig. 2 – The impact of  $\text{TiO}_2$  on the removal of TPH

### pH level

The highest removal efficiency was observed at an acidic pH of about 4 with 65% removal of TPH. Therefore, pH 4 was the optimal value for the purification of effluent contaminated with petroleum in the photocatalytic process.

### The optimal system condition

By examining the input concentration of pollutants from 100 to 500 mg / L for four months (May, June, July, August) and from 9:00 am to 6:00 pm, the maximum removal efficiency for the lowest input concentration (100 mg/L) after 280 min of UV sunlight was 67% (Figure 3). It was observed that with increasing the concentration of contaminants, the efficiency of the system decreases. The reduction in efficiency with increasing contamination was the decrease in the absorption of light photons, the photocatalyst surface's saturation due to the adsorption of the contaminant's and the inhibition of the reaction between the pollutant hub molecule and hydroxyl radicals.

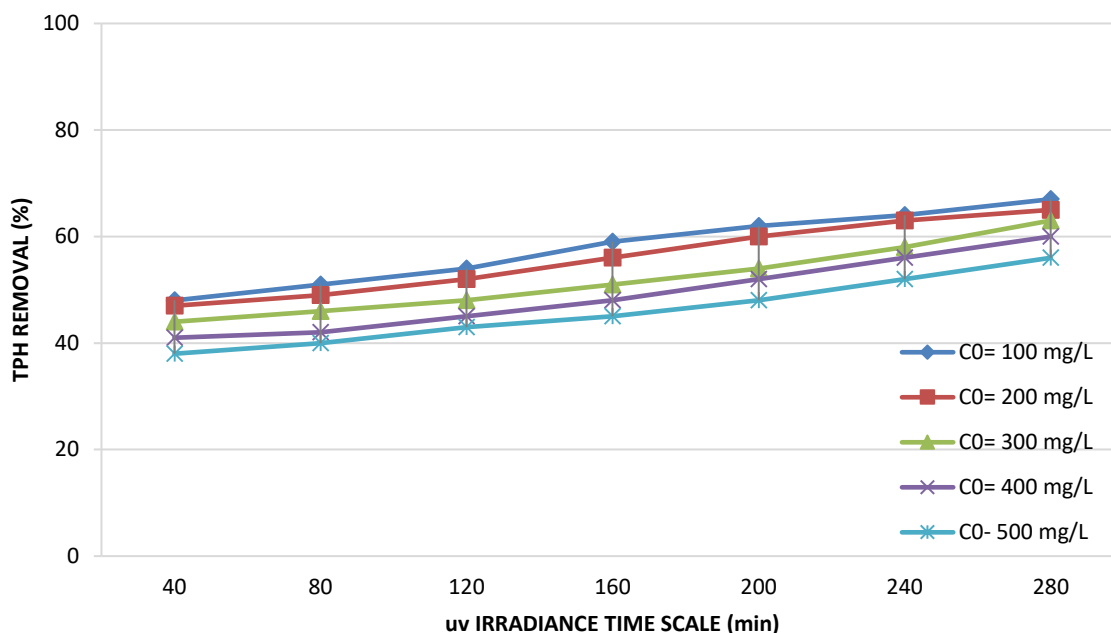


Fig. 3 – The intensity of the sun's UV and percentage of the removal efficiency

#### Launching photoreactor under optimal condition

Finally, after identifying the optimal condition for any parameter, the reactor has been relaunched under pH 4,  $\text{TiO}_2$  loading amount of 80g, input density (effluent simple) 100 mg/L, and  $\text{H}_2\text{O}_2$  density of 2000 mg/L. The highest removal efficiency for PAH was 87% under 240 min UV, TPH 79% under 240 min UV, and COD 77% under 280 min UV irradiation. UV at 240 min was the optimal irradiation for removing petroleum hydrocarbons from contaminated water. The GC-FID test was used on both primary effluent and purified water (treated water after using the photocatalytic method), which indicated a high percentage removal of PAH, TRH, and COD (Figure 4).

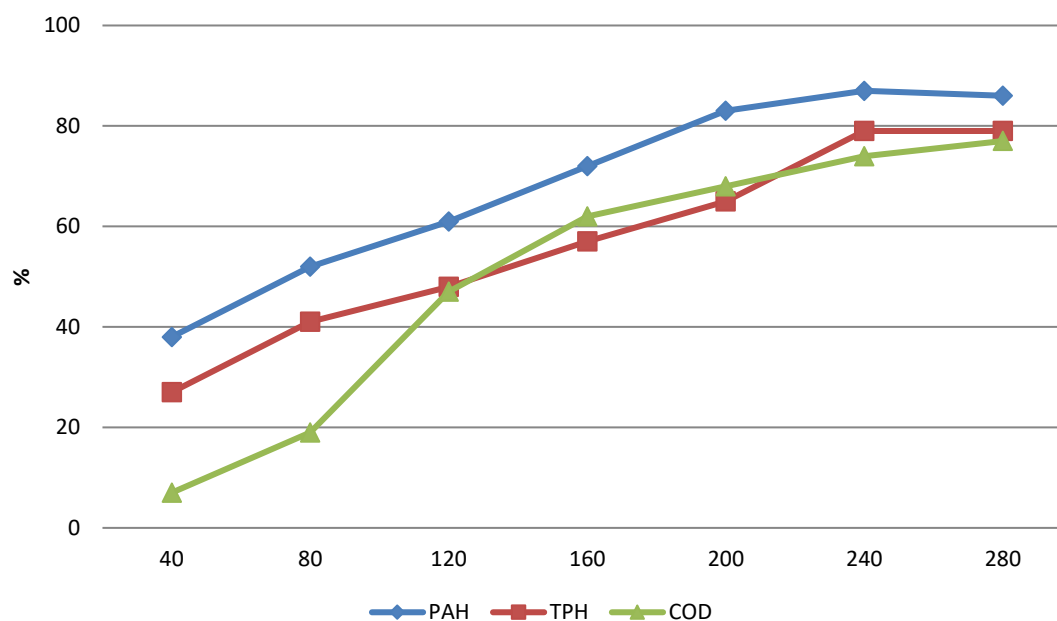


Fig. 4 – The removal efficiency of photoreactor under optimal condition

#### Conclusion

Different studies have already indicated that using the UV part of sunlight instead of UA-V lamp can significantly remove hazardous petroleum hydrocarbons from polluted water and wastewater. The current study results showed that at low-level concentrations under the UV irradiation time equal to 240 minutes (6 days of starting the solar reactor), petroleum pollution could meet the required standards of discharge and purification of polluted water.

It is expected that using solar photocatalytic reactors can be practically and economically beneficial for the treatment of effluents from refineries and oil fields in countries such as Afghanistan, where there is intense sunlight for more than 300 days a year. Also, the stabilization of the photocatalyst on the concrete surface, which is an essential element in the structures of water and wastewater treatment plants, significantly increases the efficiency of this method on an industrial scale.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Hussein I. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation / Hussein I Abdel-Shafy, Mona S.M. Mansour. // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2016. No 25. – P. 107-123.
2. Harris K.L. Bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons: relevance to toxicity and carcinogenesis / Harris K.L., Banks L.D., Mantey J.A. et al. // *Expert Opin Drug Metab Toxicol*. 2013. No 9. – P. 1465-1480.
3. Stepnowski P. Enhanced photo degradation of contaminants in petroleum refinery waste water / Stepnowski P, Siedlecka E.M., Behrend P. et al. // *Water research*. 2002. No 36. – P. 288-294.
4. Zhang B.Y. Marine Oil Spills -Oil Pollution, Sources and Effects. World Seas: An Environmental Evaluation / Zhang B.Y., Matchinski E.J., Chen B. et al. // *Ecological Issues and Environmental Impacts* 2019. No 3. – P. 391-406.
5. Saïen J. Organic Pollutants Removal from Petroleum Refinery Wastewater with Nanotitania Photocatalyst and UV Light Emission / Saïen J, Shahrezaei F. // *International Journal of Photoenergy*. 2012. No 1. – P. 1-5.
6. Bakke T. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry / Bakke T, Klungsøyr J, Sanni S. // *Marine Environmental Research*. 2013. No 92. – P. 154-169.
7. Werschkun B. Emerging risks from ballast water treatment: The run-up to the International Ballast Water Management Convention / Werschkun B, Banerji S. // *Chemosphere*. 2014. No 112. – P. 256-266
8. Tekere M. An assessment of the physicochemical properties and toxicity potential of carwash effluents from professional carwash outlets in Gauteng Province, South Africa / Tekere, M, Sibanda T, Maphangwa K.W. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No 23. – P. 11876–11884.
9. Wang S. The Harm of Petroleum-Polluted Soil and its Remediation Research / Wang S, Xu Y, Lin Z. et al. // *AIP Conference Proceedings*. 2017. No 1864. – P. 1-9.
10. Mehrad A.T. Assessment of oil and gas resources of northern Afghanistan and their impact on energy security in the country / Mehrad A.T., Zvolinski V.P., Kapralova D.O. et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No 976. – P. 1-8.
11. Ali I. Advances in water treatment by adsorption technology / Ali I, Gupta V.K. // *Nature Protocols*. 2007. No 1.- P. 2661-2667.
12. Pooi, C.K. Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities / Pooi C.K., Ng H.Y. // *Clean Water*. 2018. No 1. –P. 1-8.
13. Lee A. Darling SB Membrane materials for water purification: design, development, and application / Lee A, Elam J.W. // *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2016. No 2.- P. 17-42.
14. Guohua C. Electrochemical technologies in wastewater treatment / Guohua C. // *Separation and Purification Technology* 2004. No 38. – P. 11–41.
15. Mehmet A.O. Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review / Mehmet A.O., Jean J.A. // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. No 44. – P. 2577–2641.
16. Dalu J.M. Duckweed based wastewater stabilization ponds for wastewater treatment (a low cost technology for small urban areas in Zimbabwe) Dalu J.M, Ndamba J. // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2003. No 28. – P. 1147-1160.
17. Ozgun H. A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations / Ozgun H, Dereli R.K., Ersahin M.E. et al. // *Separation and Purification Technology*. 2013. No 118. – P. 89-104.
18. Rubio J. Overview of flotation as a wastewater treatment technique / Rubio J, Souza M.L., Smith R.W. // *Minerals Engineering*. 2002. No 15. – P. 139-155.
19. Dong S. Recent developments in heterogeneous photocatalytic water treatment using visible light-responsive photocatalysts: a review / Dong S, Feng J, Fan M. et al. // *RSC Advances*. 2015. No 5. – P. 14610-14630.
20. Pirhashemi M. Review on the criteria anticipated for the fabrication of highly efficient ZnO-based visible-light-driven photocatalysts / Pirhashemi M, Habibi Y.H., Rahim P.S. // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018. No 62. – P. 1-25.
21. Lee S.Y. TiO<sub>2</sub> photocatalyst for water treatment applications / Lee S.Y., Park S.J. // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2013. No 19. – P.1761-1769.
22. Lazar M.A. Photocatalytic Water Treatment by Titanium Dioxide: Recent Updates / Lazar M.A., Varghese S.; Nair S.S. // *Catalysts* 2012. No 2. – P. 572-601.
23. Didier R. Solar photocatalysis: a clean process for water detoxification / Didier R, Malato S. // *Science of The Total Environment*. 2002. No 291. – P. 85-97.
24. Zhang T. Recent Progress in TiO<sub>2</sub>-Mediated Solar Photocatalysis for Industrial Wastewater Treatment / Zhang T, Wang S, Zhang X. // *International Journal of Photoenergy*. 2014. No 1. – P. 1-12.
25. Shavisi Y. Application of solar light for degradation of ammonia in petrochemical wastewater by a floating TiO<sub>2</sub>/LECA photocatalyst / Shavisi Y, Sharifinia S, Zendehzaban M. et al. // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2013. No 5. – P. 2806-2813.
26. De Andrade F.V. A novel TiO<sub>2</sub>/autoclaved cellular concrete composite: From a precast building material to a new floating photocatalyst for degradation of organic water contaminants / De Andrade F.V., De Lima G.M., Augusti R. et al. // *Journal of Water Process Engineering*. 2015. No 7. – P. 27-35.
27. Ghaly Y.M. Treatment of highly polluted paper mill wastewater by solar photocatalytic oxidation with synthesized nano TiO<sub>2</sub> / Ghaly Y.M., Jamil T.S., El-Seesy I.E. et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2011. No 168. – P. 446-454.
28. Souza R.P. Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>, ZnO and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> applied to degradation of textile wastewater / Souza R.P., Freitas TKFS, Domingues F.S. et al. // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2016. No 329. – P. 9-17.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.028>**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКГ**

Научная статья

**Хомяков А.В.\***

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

\* Корреспондирующий автор (KhomyakovA[at]gorodissky.com)

**Аннотация**

В настоящей работе представлены результаты исследования, проведенного с целью анализа современных подходов к проектированию телемедицинских систем для исследования электрокардиограммы (ЭКГ) на основе патентной информации. В ходе исследования проведены количественный анализ патентной активности в целом в области телемедицины, структурный анализ массива найденных патентных документов, включая выделение наиболее активных заявителей, качественный анализ разработанных в последние годы телемедицинских систем для исследования ЭКГ, включая характеристику решаемых технических задач. Существенным недостатком проанализированных систем является необходимость постоянного подключения к сети Интернет для передачи данных для последующего их анализа на удаленном сервере. Результаты исследования показывают актуальность задачи разработки надежного и быстрого алгоритма обработки электрокардиограммы для диагностирования опасных для жизни состояний в реальном времени в портативных приборах.

**Ключевые слова:** телемедицина, электрокардиограмма, проектирование, патентное исследование.

**MODERN APPROACHES TO DESIGNING TELEHEALTH SYSTEMS FOR ECG RESEARCH**

Research article

**Khomyakov A.V.\***

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

\* Corresponding author (KhomyakovA[at]gorodissky.com)

**Abstract**

The current article presents the results of a study conducted to analyze modern approaches to designing telehealth systems for the electrocardiogram (ECG) research based on patent information. The study conducts a quantitative analysis of patent activity as a whole in the field of telehealth, a structural analysis of the array of the found patent documents, including the identification of the most active applicants, a qualitative analysis of telehealth systems developed for ECG research in recent years, including the characteristics of the technical problems to be solved. In the course of the study, the author discovers that a significant disadvantage of the systems under study is the need for a permanent connection to the Internet to transmit data for subsequent analysis on a remote server. The results of the study demonstrate the relevance of the task of developing a reliable and fast algorithm for processing electrocardiograms for diagnosing life-threatening conditions in real-time and in portable devices.

**Keywords:** telehealth, electrocardiogram, design, patent research.

**Введение**

На протяжении последних полутора лет человечество живёт в условиях пандемии COVID-19, вызванной коронавирусом SARS-CoV-2. Специалистам еще предстоит изучить и объективно оценить все последствия, затронувшие социально-экономическую сферу жизни человека, но уже сейчас многие традиционные виды деятельности были перенесены в «удаленный формат». А некоторые области техники получили дополнительный стимул к своему развитию.

К таковым, безусловно, следует отнести и телемедицину. Телемедицина – это форма реализации лечебно-диагностических, превентивных и организационно-управленческих процессов в здравоохранении посредством компьютерных и телекоммуникационных технологий [1]. Принято считать, что телемедицина ведет свою историю с середины XIX века с появления первых средств проводной связи, и развитие телемедицины неразрывно связано с прогрессом средств связи и удаленного обмена информацией.

Целью настоящей работы является анализ современных подходов к проектированию телемедицинских систем для исследования ЭКГ на основе патентной информации. Ставятся задачи:

- количественного анализа патентной активности в области телемедицины;
- структурного анализа массива найденных патентных документов, включая выделение наиболее активных заявителей;
- качественного анализа разработанных в последние годы телемедицинских систем для исследования ЭКГ, включая характеристику решаемых технических задач.

**Количественный анализ патентной активности**

Поиск патентных документов производится с использованием базы данных «PATENTSCOPE», разработанной Всемирной организацией интеллектуальной собственности (ВОИС) и обеспечивающей доступ к полным текстам международных заявок, а также патентным документам национальных и региональных патентных ведомств государств-участников Договора о патентной кооперации (РСТ).

Для проведения поиска задаются ключевые слова, глубина поиска и дополнительные условия для ограничения массива патентных документов, которые будут отобраны для последующего анализа. В качестве ключевых слов были выбраны термины «телемедицина», «телемедицинский», «удаленная», «телеметрия» (англ. *telemedicine*, *remote*, *telemetry*).

Глубина поиска, а именно, временной период, к которому должны быть отнесены исследуемые патентные документы по дате публикации, задана с 01 января 1985г. по 31 декабря 2020г. Середина 80х годов XX века – это период смены технологий и постепенного перехода к современной клинической телемедицине, который характеризуется модернизацией методологии на фоне персонализации компьютерной техники, развития Интернет, появления цифровой диагностической аппаратуры [1]. Соответственно, научно-технические разработки, получившие охрану, начиная с 1985г., представляют наибольший интерес для целей настоящего исследования.

Все патентные документы сопровождаются указанием индекса Международной патентной классификации (МПК). МПК делит всю область техники на восемь разделов, содержащих порядка 70 тыс. рубрик. МПК является незаменимым инструментом для поиска патентных документов [2]. Поэтому целесообразно ограничить исследуемый массив патентных документов индексом А61 «Медицина и ветеринария; гигиена».

С учетом заданных условий поиска обнаружено 28248 патентных документов. На рис. 1 показан график распределения по дате публикации патентных документов, относящихся к телемедицинской тематике («ТМ-патенты», сплошная толстая линия). На рис. 1 дополнительно показан график распределения патентных документов в тот же период по всему мировому патентному фонду («Все патенты», пунктирная толстая линия). Второй график построен на основе сведений, опубликованных Центром статистических данных по интеллектуальной собственности на базе ВОИС [3].

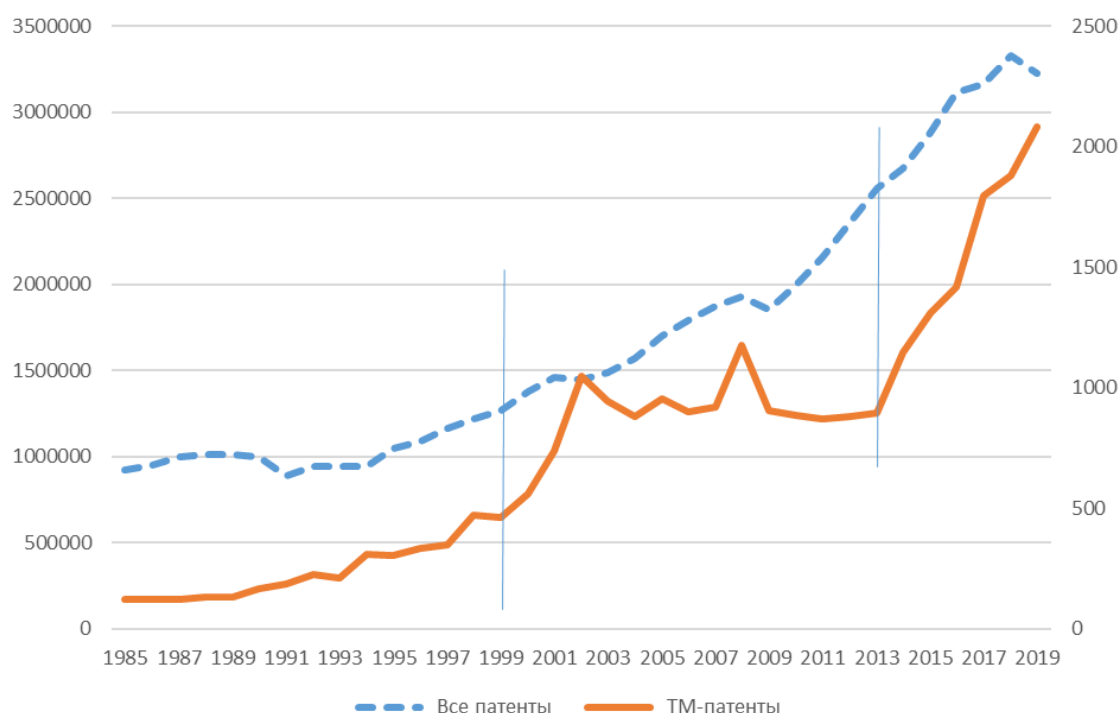


Рис. 1 – Распределение патентных документов по годам

Анализ проиллюстрированного на рис. 1 распределения позволяет обнаружить два пика активности в 2002 и 2008 гг., когда было опубликовано, соответственно, более 1000 и более 1100 патентных документов, относящихся к телемедицинской тематике, что являлось максимальными значениями для того периода. Начиная с 2013г. продолжается постоянный рост количества ежегодно публикуемых патентных документов, относящихся к телемедицинской тематике.

Далее, анализ проиллюстрированного на рис. 1 распределения позволяет выделить три периода научно-технической активности в данной области техники. А именно, до 1999г. – период умеренного роста, с 2000 по 2013г. – период нестабильного роста, после 2013г. – период бурного роста. Границы периодов показаны тонкими вертикальными линиями на рис. 1.

Если анализировать соответствие патентной активности в области телемедицины с общей патентной активностью, то следует отметить, что первый и третий периоды характеризуются высокими значениями коэффициента корреляции между количествами ежегодно публикуемых патентных документов. А именно, 0,88 для периода умеренного роста (до 1999г.) и 0,93 для периода бурного роста (после 2013г.). Коэффициент корреляции между количествами ежегодно публикуемых патентных документов во второй временной период равен 0,23, что говорит о низком соответствии между данными этого периода.

Таким образом, в целом рост количества публикаций патентных документов в области телемедицины соответствует динамике увеличения общемирового патентного фонда. Кроме того, проиллюстрированные закономерности свидетельствуют о растущей научно-технической активности в исследуемой области техники. В частности, в 2019г. в отличие от снижения более чем на 3% количества опубликованных патентных документов по всем областям техники, количество публикаций в области телемедицины выросло приблизительно на 11%.

### Структурный анализ массива найденных документов

На следующем этапе исследования документы, относящиеся к периоду бурного роста (после 2013г.), подвергаются структурному анализу, который включает в себя выделение стран с наибольшим количеством опубликованных патентных документов, выделение наиболее активных заявителей, а также распределение опубликованных патентных документов по наиболее часто встречающимся индексам МПК.

На рис. 2 показано распределение количества опубликованных патентных документов по лидирующим странам: Китай – 5516, США – 2682, и Республика Корея – 304. Россия занимает четвертое место с 294 опубликованными документами по исследуемой тематике.

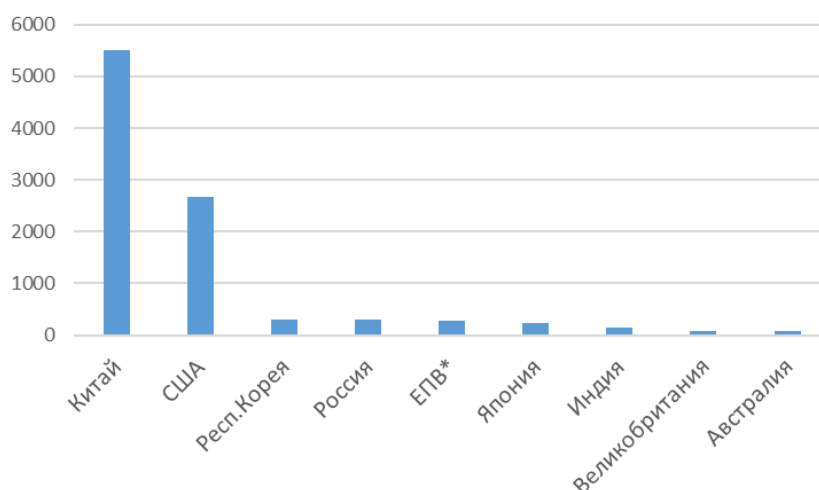


Рис. 2 – Распределение патентных документов по странам

В общую статистику также включены публикации Европейского патентного ведомства (ЕПВ\*) - регионального ведомства, действующего на основании Европейской патентной конвенции, объединяющей европейские страны-участницы.

В табл. 1 представлены сведения о наиболее активных заявителях в исследуемой области техники, включая страну происхождения и количество опубликованных патентных документов в изучаемый период времени. Из анализа табл. 1 видно, что наибольшей патентной активностью в данной области техники характеризуются заявители из США.

Таблица 1 – Активные заявители

| Заявитель                            | Страна     | Количество публикаций |
|--------------------------------------|------------|-----------------------|
| KONINKLIJKE PHILIPS NV               | Нидерланды | 99                    |
| MEDTRONIC INC                        | Ирландия   | 76                    |
| BOSTON SCIENTIFIC NEUROMODULATION CO | США        | 60                    |
| COVIDIEN LP                          | США        | 60                    |
| INTUITIVE SURGICAL OPERATIONS INC    | США        | 49                    |
| DEKA PRODUCTS LP                     | США        | 44                    |
| HELLO INC                            | США        | 35                    |
| CARDIAC PACEMAKERS INC               | США        | 32                    |
| SAMSUNG ELECTRONICS CO LTD           | Респ.Корея | 26                    |
| FRESENIUS MEDICAL CARE HOLDINGS INC  | США        | 25                    |

На рис. 3 показано распределение патентных документов по индексам МПК. Доминирующее положение (более 6400 документов) занимают патентные документы, относящиеся к индексу A61B – «Диагностика; хирургия; опознание личности», также значительную долю (более 1000 документов в каждом классе) занимают патентные документы, относящиеся к индексам A61M «Устройства и приспособления для введения лекарств в организм или для нанесения их на кожный покров человека», A61N «Электротерапия; магнитотерапия; лучевая терапия; ультразвуковая терапия» и A61H «Устройства для физиотерапии, например устройства для определения местонахождения или стимулирования рефлекторных точек на поверхности тела».



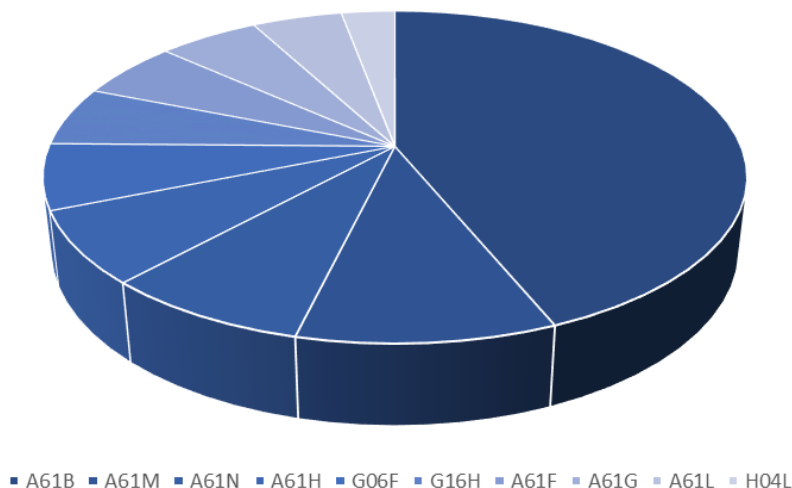


Рис. 3 – Распределение патентных документов по индексам МПК

Следует обратить внимание на наличие среди наиболее часто упоминаемых классов и «немедицинских» индексов МПК. В частности, G06F «Обработка цифровых данных с помощью электрических устройств», G16H «Информация о здравоохранении т.е. информационные и коммуникационные технологии, специально предназначенные для манипулирования медицинскими данными или обработки медицинских данных или данных о здравоохранении» и H04L «Передача цифровой информации».

#### Качественный анализ исследуемой области техники

Для последующего качественного анализа из общего массива документов отобраны документы, непосредственно относящиеся к исследованию ЭКГ, а именно к съему и автоматическому анализу электрокардиосигнала, передаче самого сигнала и измеренных параметров, характеризующих состояние обследуемого человека, в цифровом виде с использованием информационных и коммуникационных технологий.

Для анализа отобрано 30 патентных документов, опубликованных в следующих странах: Китай – 18, Россия – 6, США – 3, Япония и Респ.Корея по одному документу и одна публикация международной заявки на изобретение.

В большинстве отобранных документов описаны системы, содержащие устройство съема ЭКГ, выполненное с возможностью передачи данных посредством беспроводной технологии связи на удаленный сервер. Первичная обработка происходит в устройстве съема ЭКГ, которое может быть выполнено с возможностью выдачи сигнала тревоги, в случае если измеряемые параметры ЭКГ не соответствуют норме. Основная обработка ЭКГ и более точная диагностика происходит на удаленном сервере.

В некоторых примерах известных систем устройство съема ЭКГ может быть выполнено с возможностью передачи данных на персональную ЭВМ или портативное устройство, такое как мобильный телефон, которое в свою очередь связывается с удаленным сервером [4], [5]. В частности, в системе [4], после консультации со врачом пациент получает носимое устройство записи ЭКГ (например, для проведения мониторинга ЭКГ по Холтеру). Далее пациент с помощью своего мобильного телефона должен зарегистрироваться в электронной системе больницы, после чего станет возможной передача записанной ЭКГ сначала на мобильный телефон и затем загрузка данных в электронную систему больницы.

Некоторые из известных систем содержат блок съема и обработки ЭКГ в составе более сложных диагностических комплексов, например, в системах наблюдения за плодом у беременных женщин [6], [7], или, например, в системе мониторинга внутривенных капельниц [8]. В частности, система [6] содержит электронный монитор плода, инфузионный насос и компьютер медсестры, при этом сигнал от электронного монитора передается посредством беспроводной технологии в модуль сбора данных электрокардиограммы в компьютере медсестры, сигнал от инфузионного насоса передается посредством беспроводной технологии в модуль сбора данных об инъекциях в компьютере медсестры. Предусмотренные в системе алгоритм обработки данных и средства обратной связи обеспечивают регулирование скорости инфузии для безопасного введения лекарства по наблюдаемым параметрам ЭКГ.

Кроме того, некоторые из известных систем предназначены для эксплуатации в тяжелых условиях, например, в условиях чрезвычайных ситуаций или военных действий [9], [10]. В частности, мобильный комплекс [9] многоканальной диагностики и дистанционного мониторинга для транспортного и переносного применения содержит транспортный монитор и каналы регистрации, датчики с разъемами для многократного соединения с комплексом и включающие манжету тонометра, назальную канюлю, электроды для снятия ЭКГ, пульсоксиметр, датчик температуры и выносную камеру с микрофоном. Такой комплекс позволяет производить удаленное наблюдение нетранспортабельных и тяжелобольных пациентов вне стационаров, удаленное обследование населения труднодоступных регионов и выполнение мониторинговых исследований в полевых условиях профильными службами МЗ, МО и МЧС.

Наконец, некоторые из известных систем требуют использования значительных вычислительных мощностей микропроцессора для решения специфичных диагностических задач, например, при осуществлении способа вейвлет-интроскопии сосудистой сети кровеносного русла [11], или при кластеризации выделенного подмножества ЭКГ по признаку сходства форм при анализе ЭКГ, записанной в первом стандартном отведении [12]. В частности, медицинская система [12] для удаленного анализа кардиологических данных содержит блок накопления последовательности ЭКГ для каждого пациента, блок выделения по запросу врача из накопленной базы данных подмножества ЭКГ,

принадлежащих целевой группе пациентов, блок кластеризации выделенного подмножества ЭКГ, блок определения меры подобия форм ЭКГ, блок формирования эталонов для каждого кластера, сформированного блоком кластеризации, блок назначения по запросу врача по меньшей мере одного эталона для последующей оценки состояния пациента, блок оценки состояния пациента по последовательности ЭКГ, который оценивает изменение во времени состояния наблюдаемого пациента по изменению во времени расстояний между каждой из вновь поступающих дискретной ЭКГ в последовательности пациента и назначенным эталоном. Такая система обеспечивает возможность эффективного диагностирования пациентов вне лечебно-профилактического учреждения (ЛПУ) при определении состояния пациента и оказания помощи как пациенту в экспресс оценке его текущего состояния, так и оказания помощи клиницисту в мониторинге хода лечения пациента вне ЛПУ, в том числе при оценке кардиотоксичности при применении лекарственных препаратов.

### Заключение

Проведенный анализ патентных документов, относящихся к телемедицинским системам, показал, что:

- патентная активность в данной области техники в целом соответствует росту мирового патентного фонда, при этом наибольшая активность наблюдается, начиная с 2013г.;
- в структуре массива найденных патентных документов преобладают китайские патентные документы, при этом наиболее активными являются заявители из США;
- разработанные в последние годы телемедицинские системы для исследования ЭКГ характеризуются единым концептуальным подходом к проектированию, состоящим в использовании портативных устройств съема ЭКГ, выполненных с возможностью передачи данных на удаленный сервер, где происходит основная обработка.

Общим недостатком таких систем является необходимость постоянного подключения к сети Интернет для передачи данных на удаленный сервер для анализа. Соответственно, не смотря на все достижения техники по-прежнему актуальной является разработка надежного и быстрого алгоритма обработки ЭКГ для диагностирования опасных для жизни состояний в реальном времени, который может быть исполнен в портативном приборе без обязательного подключения к удаленному диагностическому серверу.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Владзимирский А.В. Телемедицина: Curatio Sine Tempora et Distantia / А.В. Владзимирский. - М., 2016 - 663с. ISBN 978-1-77313-486-4
2. Раздел веб-сайта Всемирной организации интеллектуальной собственности «О Международной патентной классификации». – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/ru/preface.html> (дата обращения 15.05.2021)
3. Веб-сайт Центра статистических данных по ИС на базе ВОИС. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www3.wipo.int/ipstats/> (дата обращения 15.05.2021)
4. Пат. 108231183 Китайская Народная Республика, МПК А61В5/00; А61В5/0402; G16Н40/67. Метод дистанционного мониторинга ЭКГ на базе интернет-медицинского сервиса / Ли Шуфань, заявитель и патентообладатель Харбин Гуангаи Сайнс Энд Тех Девелопмент Ко Лтд. - CN201611134539; заявл. 11.12.16; опубл. 29.06.18. – 4 с.
5. Пат. 2698980 Российская Федерация, МПК А61В 5/0402, G16Н 80/00. Дистанционный комплекс для анализа электрокардиосигналов / Ачильдиев В.М., Балдин А.В., Бедро Н.А. и др., заявитель и патентообладатель ООО "НПО Геофизика-НВ", ООО "АРК Системс". - 2018107720, заявл. 02.03.18; опубл. 02.09.19, Бюл. № 25. – 14 с.
6. Пат. 107854748 Китайская Народная Республика, МПК А61М5/142; А61М5/168; G16Н20/17; G16Н40/67. Система обратной связи с насосом для впрыска окситоцина / Жу Сиаолин; Сянь Ниньвуи; Жао Йиньмiao и др., заявитель и патентообладатель Унив Веньжоу Медикал. - CN201710971786; заявл. 18.10.17; опубл. 30.03.18. – 10 с.
7. Пат. 208492844 Китайская Народная Республика, МПК А61М5/142; А61М5/168; G16Н20/17; G16Н40/67. Простая система обратной связи шприцевого насоса / Сянь Ниньвуи; Жао Йиньмiao, Сунь Йилинь и др., заявитель и патентообладатель Унив Веньжоу Медикал. - CN201721345357U; заявл. 18.10.17; опубл. 15.02.19. – 10 с.
8. Пат. 111128338 Китайская Народная Республика, МПК А61В5/0402; А61М5/168; G16Н20/17; G16Н40/67; G16Н50/20. Интеллектуальная система удаленного медицинского обслуживания / Вань Сиаосинь, заявитель и патентообладатель Дзе Фирст Пиоплес Хоспитал Оф Чаньжоу. - CN20201083883; заявл. 10.02.2020; опубл. 08.05.20. – 10 с.
9. Пат. 2683898 Российская Федерация, МПК А61В 5/01, G06F 19/00, А61В 5/022, А61В 5/0404, А61В 5/1455. Мобильный комплекс многоканальной диагностики и мониторинга для дистанционных исследований пациентов в режиме реального времени / Загребин Д.А., Филатов И.А., Адашкин А.В., Быков И.В., заявитель и патентообладатель ООО "БИОСОФТ-М". - 2018110644, заявл. 26.03.18; опубл. 02.04.19, Бюл. № 10. – 26 с.
10. Пат. 211381312 Китайская Народная Республика, МПК А61В5/0205; А61М5/168; G16Н80/00. Телемедицинская система для спасения на поле боя / Вень Синьвей; Дуань Йиму; Луо Хуань и др., заявитель и патентообладатель Луоянь Фанжи Электроник Тех Ко ЛТД. - CN201920477615U; заявл. 10.04.2019; опубл. 01.09.20. – 12 с.
11. Пат. 2723763 Российская Федерация, МПК А61В 5/0402, А61В 5/0295, А61В 5/1455, G06F 17/14. Способ вейвлет-интроскопии сосудистой сети кровеносного русла / Алдонин Г.М., Черепанов В.В., заявитель и патентообладатель ФБУ "Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва". - 2019108517, заявл. 25.03.19; опубл. 17.06.20, Бюл. № 17. – 13 с.

12. Пат. публ. 20200352440 Соединенные Штаты Америки, МПК A61B5/00; A61B5/04; G06K9/62; G16H10/60; G16H40/67. Медицинская система удаленного мониторинга, анализа и прогнозирования состояния пациента по последовательности электрокардиограмм сердца первого отведения и компьютеризированный способ мониторинга, анализа и прогнозирования состояния пациента / Шмид А.В., Березин А.А., Новопапин М.А., заявитель и патентообладатель ЗАО «ЕС-Лизинг». - US16/760,656, заявл. 31.01.18; опубл. 12.11.20. - 14 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Vladimirskej A.V. Telemedicina: Curatio Sine Tempora et Distantia [Telemedicine: Curatio Sine Tempora et Distantia] / A.V. Vladimirskej. - M., 2016 – 663p. ISBN 978-1-77313-486-4 [in Russian]
2. Razdel web-sajta Vsemirnoj organizacii intellektualnoj sobstvennosti «O Mezhdunarodnoj patentnoj klassifikacii» [Page of the World Intellectual Property Organization web-site “About International Patent Classification”] [Electronic resource]. – URL: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/ru/preface.html> (accessed 15.05.2021) [in Russian]
3. Web-sait Centra statisticheskikh dannyh po IS na baze VOIS [Web-site of WIPO IP Statistics Data Center] [Electronic resource]. – URL: <https://www3.wipo.int/ipstats/> (accessed 15.05.2021) [in Russian]
4. Pat. 108231183 People's Republic of China, IPC A61B5/00; A61B5/0402; G16H40/67. Metod distancionnogo monitoringa JeKG na baze internet-medicinskogo servisa [Remote electrocardiogram monitoring method based on Internet medical service] / Li Shufan, the applicant and the patentee HARBIN GUANGKAI SCIENCE & TECH DEVELOPMENT CO LTD - CN201611134539; appl. 11.12.16; publ. 29.06.18. – 4 p. [in Russian]
5. Pat. 2698980 Russian Federation, IPC A61B 5/0402, G16H 80/00. Distancionnyj kompleks dlja analiza elektrokardiosignalov [Remote complex for the analysis of electrocardiosignals] / Achildiev V.M., Baldin A.V., Bedro N.A. et al., the applicant and the patentee OOO "NPO Geofizika-NV", OOO "ARK Sistems" - 2018107720, appl. 02.03.18; publ. 02.09.19, Bul. № 25. – 14 p. [in Russian]
6. Pat. 107854748 People's Republic of China, IPC A61M5/142; A61M5/168; G16H20/17; G16H40/67. Sistema obratnoj svyazi s nasosom dlja vpryska oksitocina [Oxytocin injection pump feedback system] / Zhu Xiaoling; Xiang Ninghui; Zhao Jingmiao et al., the applicant and the patentee UNIV WENZHOU MEDICAL. - CN201710971786; appl. 18.10.17; publ. 30.03.18. – 10 p. [in Russian]
7. Pat. 208492844 People's Republic of China, IPC A61M5/142; A61M5/168; G16H20/17; G16H40/67. Prostaja sistema obratnoj svyazi shpricevogo nasosa [Plain syringe pump feedback system] / Xiang Ninghui; Zhao Jingmiao; Song Yilin et al., the applicant and the patentee UNIV WENZHOU MEDICAL. - CN201721345357U; appl. 18.10.17; publ. 15.02.19. – 10 p. [in Russian]
8. Pat. 111128338 People's Republic of China, IPC A61B5/0402; A61M5/168; G16H20/17; G16H40/67; G16H50/20. Remote intelligent medical care system / Wang Xiaoqing, the applicant and the patentee THE FIRST PEOPLE'S HOSPITAL OF CHANGZHOU. - CN20201083883; appl. 10.02.20; publ. 08.05.20. – 10 p. [in Russian]
9. Pat. 2683898 Russian Federation, IPC A61B 5/01, G06F 19/00, A61B 5/022, A61B 5/0404, A61B 5/1455. Mobilnyj kompleks mnogokanalnoj diagnostiki i monitoringa dlja distancionnyh issledovanij pacientov v rezhime realnogo vremeni [Mobile complex for multichannel diagnostics and monitoring for remote sensing in real time] / Zagrebin D.A., Filatov I.A., Adaskin A.V., Bykov I.V., the applicant and the patentee OOO "BIOSOFT-M" - 2018110644, appl. 26.03.18; publ. 02.04.19, Bul. № 10. – 26 p. [in Russian]
10. Pat. 211381312 People's Republic of China, IPC A61B5/0205; A61M5/168; G16H80/00. Telemedicinskaja sistema dlja spasenija na pole boja [A telemedicine system for battlefield rescue] / Weng Xingwei; Duan Yimu; Luo Huan et al., the applicant and the patentee LUOYANG FANZHI ELECTRONIC TECH CO LTD. - CN201920477615U; appl. 10.04.19; publ. 01.09.20. – 12 p. [in Russian]
11. Pat. 2723763 Russian Federation, IPC A61B 5/0402, A61B 5/0295, A61B 5/1455, G06F 17/14. Spособ vejjvlet-introskopii sosudistoj seti krovenosnogo rusla [Method for wavelet-introspecty of the vascular network of the blood bed] / Aldonin G.M., Cherepanov V.V., the applicant and the patentee FBU "Gosudarstvennyj regionalnyj centr standartizacii, metrologii i ispytanij v Krasnojarskom krae, Respublike Hakasija i Respublike Tyva" - 2019108517, appl. 25.03.19; publ. 17.06.20, Bul. № 17. – 13 p. [in Russian]
12. Pat. Publ. 20200352440 United States of America, IPC A61B5/00; A61B5/04; G06K9/62; G16H10/60; G16H40/67. Medicinskaja sistema udalennogo monitoringa, analiza i prognozirovanija sostojanija pacienta po posledovatel'nosti jelektrokardiogramm serdca pervogo otvedenija i komp'juterizirovannyj sposob monitoringa, analiza i prognozirovanija sostojanija pacienta [Medical system for remote monitoring, analysis and prognosis of the patient's condition by first-lead electrocardiogram series and computer-assisted method for monitoring, analysis and prognosis of the patient's condition] / Aldonin G.M., Cherepanov V.V., the applicant and the patentee ZAO “EC-Leasing” - US16/760,656, appl. 31.01.18; publ. 12.11.20. – 14 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.029>**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Научная статья

**Хохлова М.В.<sup>1</sup>, Дагаев А.В.<sup>2</sup>, Майоров Е.Е.<sup>3,\*</sup>, Арефьев А.В.<sup>4</sup>, Гулиев Р.Б.<sup>5</sup>, Громов О.В.<sup>6</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0714-0132;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4017-6663;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-7634-1771;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-2860-790X;<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-2812-1774;<sup>6</sup> ORCID: 0000-0001-6725-6877;<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> Ивангородский гуманитарно - технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Ивангород, Россия;<sup>3, 4, 5, 6</sup> Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕврАзЭС, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (majorov\_ee[at]mail.ru)

**Аннотация**

Настоящая статья посвящена измерению поверхности объектов сложной формы интерференционной системой в низкокогерентном свете. Показана актуальность работы, так как оптический контроль формы поверхности объектов с высокой точностью и достоверностью важен для решения задач метрологии, оптического приборостроения, а также промышленности. Приведена оптическая схема базовой интерферометрической системы на основе интерферометра Майкельсона и описана работа её. Проанализированы спекл-поля и их влияние на формирование интерференционного сигнала. Предложено пространственное микросканирование зондирующим лучом контролируемой поверхности в продольном направлении. Сформулированы требования к элементам и параметрам сканирования.

**Ключевые слова:** микросканирование, интерферометр, спекл-поля, размер спекла, плоскопараллельная пластина, объектив, светодиод.

**INTERFERENCE SYSTEM FOR MEASURING THE GEOMETRIC PARAMETERS  
OF REFLECTING SURFACES**

Research article

**Khokhlova M.V.<sup>1</sup>, Dagaev A.V.<sup>2</sup>, Mayorov E.E.<sup>3,\*</sup>, Arefyev A.V.<sup>4</sup>, Guliev R.B.<sup>5</sup>, Gromov V.O.<sup>6</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0714-0132;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4017-6663;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-7634-1771;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-2860-790X;<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-2812-1774;<sup>6</sup> ORCID: 0000-0001-6725-6877;<sup>1</sup> Military space Academy named after A. F. Mozhaisky, Saint-Petersburg, Russia;<sup>2</sup> Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute (branch of) Saint-Petersburg University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia;<sup>3, 4, 5, 6</sup> University at the inter-parliamentary Assembly of EurAsEC, Saint-Petersburg, Russia

\* Corresponding author (majorov\_ee[at]mail.ru)

**Abstract**

This article the measurement of the surface of objects of complex shape by an interference system in low-coherent light is devoted. The relevance of the work, since optical control of the surface shape of objects with high accuracy and reliability is important for solving problems of metrology, optical instrumentation, and industry is shown. The optical scheme of the basic interferometric system based on the Michelson interferometer is presented and its operation is described. Speckle fields and their influence on the formation of an interference signal are analyzed. Spatial micro-scanning of a controlled surface in the longitudinal direction by a probing beam is proposed. The requirements for scanning elements and parameters are formulated.

**Keywords:** micro-scanning, interferometer, speckle fields, speckle size, plane-parallel plate, lens, light emitting diode.

**Введение**

Современные методы и средства производства требуют для своего развития совершенствования научной базы исследований. Одно из важных мест в решении этой задачи занимают оптические и оптико-электронные системы и комплексы [1], [3].

Именно эти системы и комплексы дают возможность получать высокоточную и достоверную информацию о геометрических параметрах поверхности объектов. Отсутствие материальных контактов с исследуемой поверхностью делает их перспективными для измерения малоустойчивых поверхностей, пригодными для динамических измерений и расширяет класс измеряемых объектов [2], [4].

Оптические методы и средства измерения напряженно-деформированного состояния объектов с диффузно отражающей поверхностью являются наиболее универсальными методами исследований. К ним относятся интерференционные приборы и системы. Эти приборы и системы используют низкокогерентные источники света и представляют огромный интерес для измерения параметров (высоты вариации рельефа) поверхности любой формы [3], [5].

Они позволяют проводить как статистические, так и динамические, не предъявляя строгих требований к качеству поверхности, исследуют процесс количественно и качественно [4], [7].

Поэтому целью работы явилось исследование разработанной интерференционной системы измерения геометрических параметров отражающих поверхностей.

### Интерференционная система

На рис. 1 показана оптическая схема интерференционной системы (ИС). Работа устройства основана на явлении двухлучевой интерференции [5].

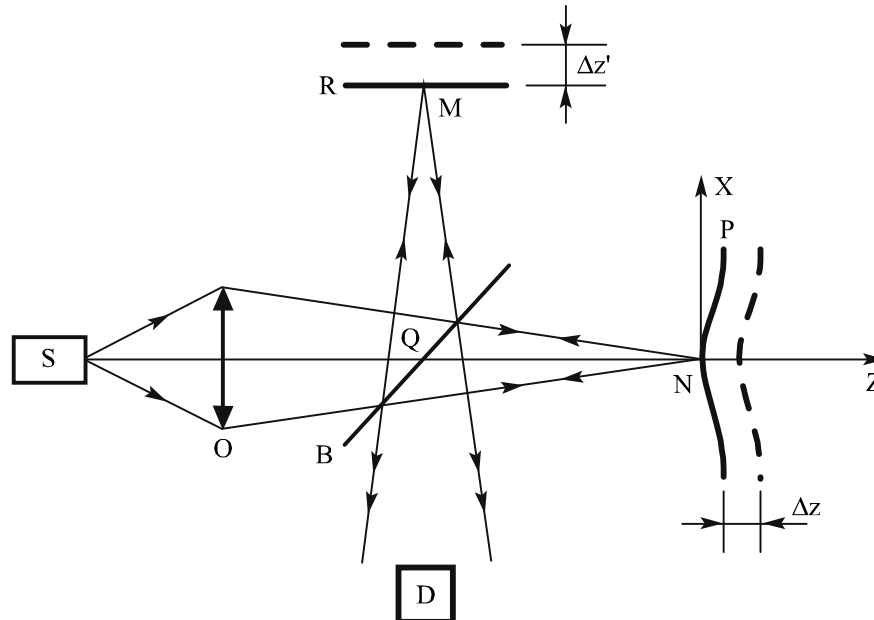


Рис. 1 – Оптическая схема ИС:

$S$  – светодиод;  $O$  – фокусирующая линза;  $B$  – делитель света;  $R$  – опорное зеркало;  $P$  – исследуемая поверхность;  $D$  – фотоэлектронный умножитель

Свет от светодиода  $S$  формируется на сложную форму поверхности  $z = 0$  и на поверхность опорного зеркала. В качестве источника излучения используется суперлюминесцентный диод 1 с длиной волны  $\lambda = 0,83$  мкм, длиной когерентности  $l_c = 30$  мкм, мощностью излучения 3 мВт. Итак, начальное состояние – это равенство оптических длин плеч  $QN$  и  $QM$ . Это означает, что разность хода интерферирующих пучков равна нулю, контраст максимален.

Как только изменяется начальное состояние, точка поверхности смещается на величину  $\Delta z$ . Это происходит по средствам продольного и поперечного перемещения поверхности исследуемого образца. В плоскости фотоэлектронного умножителя поток света сформирован объектной и опорной световыми волнами. Возврат в исходное состояние опорного зеркала происходит со скоростью  $v$ . Отсюда разности фаз  $\varphi$  равна:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2vt \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны ( $\lambda = 0,83$  мкм),  $2vt = 2\Delta z'$  – изменение разности хода интерферирующих лучей. В соответствии с [1], [6], [9] выражение для интенсивности выглядит:

$$I(t) = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} |\gamma_{pr}(t)| \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} vt\right) \quad (2)$$

где  $I_p$  – интенсивность объектного канала,  $I_r$  – интенсивность опорного канала,  $\gamma_{pr}(t)$  – комплексная степень когерентности.

$$\gamma_{pr} = \frac{\langle E_p(t) E_r^*(t) \rangle}{[I_p I_r]^{1/2}}$$

где  $E_p$  и  $E_r$  – световые поля.

При преобразовании светового потока в электрический сигнал необходимо учитывать спектральную характеристику светодиода:

$$F(\nu) = F_o \exp\left(-\frac{\nu - \nu_o}{\Delta\nu}\right)^2,$$

где  $\nu$ ,  $\nu_o$ ,  $\Delta\nu$  – соответственно частота, средняя частота и ширина спектра излучения.

А функция степени когерентности [1], [7], [9]:

$$\gamma_{pr}(t) = \exp\left[-\frac{2\nu(t - t_m)}{l_c}\right]^2 \quad (3)$$

При  $\Delta z = \Delta z'$  будет максимальное значение выходного сигнала. При измерениях поверхности начала отсчета  $t_o$  перемещение опорного зеркала для искомой величины  $\Delta z_i = f(x_i, y_i)$  сводится к измерению соответствующих временных интервалов  $[t_o, t_{mi}]$ , где индекс  $i$  характеризует некоторую точку плоскости  $XY$ .

### Свойства спекл-полей

При исследовании ИС свойства спекл-полей являются основой, так как влияют на точностные параметры системы.

Отраженный свет от поверхности сложной формы формирует картину спеклов [8]. На экране появляется распределение черных и белых точек. Это результат интерференции, обусловленный сложением световых волн от элементарных точек поверхности объекта.

В [1, 5, 9] приведены статистические свойства спекл-полей:

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad (4)$$

где  $p(I)$  – плотность вероятности освещенности  $I$ ;  $\langle I \rangle$  – средняя освещенность.

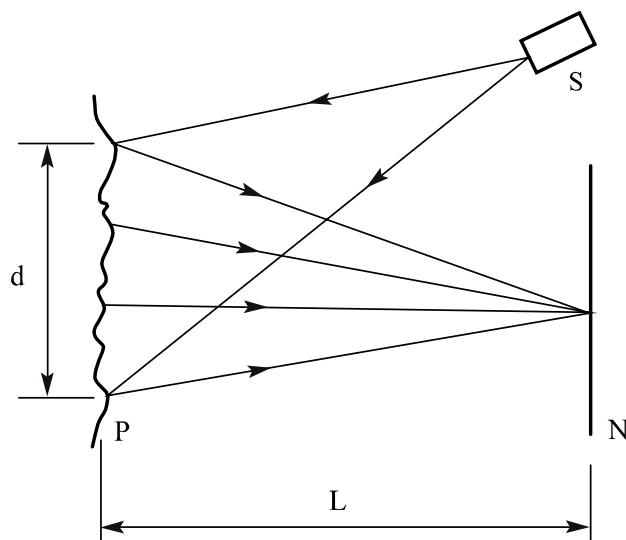


Рис. 2 – Схема формирования спекл-поля:

$S$  – источник света;  $P$  – зондируемая поверхность;  $N$  – плоскость наблюдения

На рис. 2 сформированное спекл-поле называется объектным. Из [5], [9], [10] функция автокорреляции для объективного спекл-поля рассчитывается по формуле:

$$R_I(x, y) = \langle I \rangle^2 \left[ 1 + \text{sinc}^2 \frac{dx}{\lambda L} \text{sinc}^2 \frac{dy}{\lambda L} \right] \quad (5)$$

где  $R_I(x, y)$  – функция автокорреляции в плоскости наблюдения  $x, y$ ,  $L$  – расстояние от объекта до плоскости наблюдения,  $\lambda$  – длина световой волны.

Расстояние между точками с максимальной и минимальной интенсивностями есть индивидуальный спекл. Его рассчитывают по формуле

$$b_s = 1,22 \frac{\lambda L}{d} \quad (6)$$

где  $b_s$  – поперечный размер индивидуального спекла,  $d$  – диаметр зондирующего пятна.

### Пространственное микросканирование поверхности объекта

При движении исследуемой поверхности к ИС учитывать только поперечную составляющую спекл-поля может быть малоэффективным. Во-первых, отраженный свет от поверхности сложной формы помимо поперечной составляющей спекл-поля имеет продольную составляющую спекл-поля. Индивидуальный размер спекла продольной составляющей равен:

$$b_L = \frac{4\lambda L^2}{d^2} \quad (7)$$

где  $b_L$  – продольный размер спекла,  $\lambda$  – длина световой волны,  $L$  – расстояние от зондируемого объекта до плоскости наблюдения,  $d$  – диаметр зондирования.

Применим (6) и (7) найдем  $b_L/b_S$ :

$$\frac{b_L}{b_S} = \frac{L}{0,3d}$$

Итак, при  $L = 100$  мм,  $d = 30$  мкм получаем  $b_L/b_S = 10^4$ . Это означает, что при продольном и поперечном движении исследуемой поверхности изменение спекл-полей в продольном направлении происходит в  $10^4$  раз медленнее. По этой причине невозможно провести независимые измерения. Чтобы спекл-поля были независимыми, реализовано микросканирование поверхности в продольном направлении. Между светодиодом и объективом была введена плоскопараллельная пластина, которая совершала угловые колебания (рис. 3).

Определим параметры микросканирования ИС.

Время одного измерения в продольном направлении исследуемой поверхности к ИС

$$\tau_t = \frac{l_t}{V_t} \quad (8)$$

где  $V_t$  – скорость приближения поверхности к ИС,  $l_t$  – диапазон измерений.

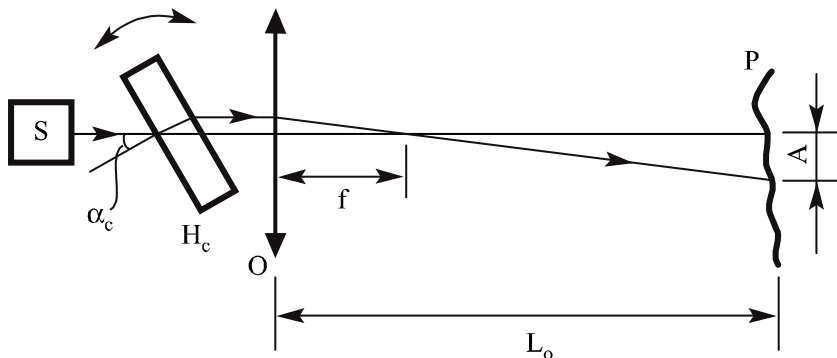


Рис. 3 – Продольное зондирование исследуемой поверхности:

$S$  – светодиод;  $\alpha_c$  – амплитуда колебаний пластины;  $H_c$  – плоскопараллельная пластина;  $O$  – объектив;  $f$  – фокусное расстояние;  $P$  – объект;  $A$  – амплитуда микросканирования

В эксперименте  $\tau_t$  было равно периоду сканирования. Тогда частота сканирования  $f_{ск}$ :

$$f_{ск} = \frac{1}{\tau_t} \quad (9)$$

Теперь введем дополнительное смещение опорного зеркала для фиксации зондирующего пятна. За полупериоды сканирования (отрицательный и положительный) создадим условия равенства числа измерений.

Тогда

$$\frac{\tau_t}{2} = m\tau_1$$

где  $m$  – число измерений за один полупериод,  $\tau_1$  – время одного измерения за один полупериод. Поэтому частота сканирования опорного зеркала равна:

$$f_M = \frac{1}{\tau_1} = \frac{2mV_t}{l_t} \quad (10)$$

Определим амплитуду угловых колебаний плоскопараллельной пластины (рис. 4).

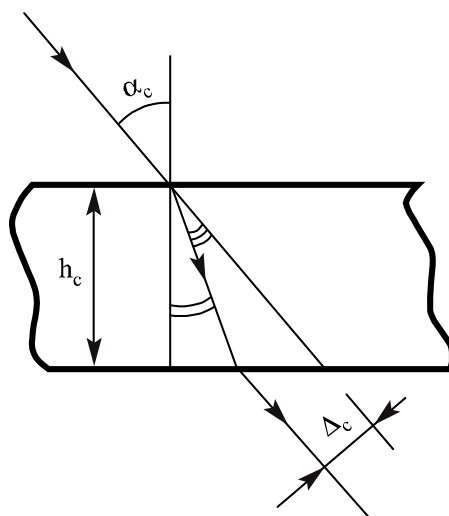


Рис. 4 – Схема для расчета амплитуды

В результате проведенных расчетов получим:

$$A = \frac{(L_o - f)h_c}{f \cos \frac{\sin \alpha_c}{n_p}} \sin \left[ \alpha_c - \arcsin \frac{\sin \alpha_c}{n_p} \right] \quad (11)$$

где  $A$  – амплитуда микросканирования зондирующего пятна,  $L_o$  – расстояние от поверхности объекта до выходного зрачка ИС,  $h_c$  – толщина плоскопараллельной пластины,  $\alpha_c$  – амплитуда колебаний пластины,  $n_p$  – показатель преломления материала пластины.

Для  $L_o = 120$  мм,  $v_t = 50$  мм/с,  $l_t = 100$  мкм,  $m = 3$ ,  $n_p = 1,5$ ,  $f = 15$  мм,  $h_c = 0,5$  мм,  $A = 10$  мкм. Получим  $f_{ск} = 500$  Гц,  $f_M = 3$  кГц,  $\alpha_c = 0,01$  рад.

Для разработанной ИС полученные формулы позволяют рассчитать все параметры сканирования.

Разработанная ИС имеет следующие характеристики:

- погрешность измерений
- $\sigma_Z = (0,03 - 0,1) l_c$  – для  $\theta = (0^\circ - 30^\circ)$ ,
- $\sigma_Z = (0,2 - 0,4) l_c$  – для  $\theta = (45^\circ - 60^\circ)$ ,
- диапазон измерений глубины анализа – 0...4 мм;
- частота измерений – 46 Гц;
- среднее расстояние от микрообъектива до объекта – 120 мм.

### Заключение

В работе представлена разработанная ИС измерения геометрических параметров отражающих поверхностей. Описана работа ИС и получены формулы для преобразования светового потока в электрический сигнал. Проанализированы свойства спекл-полей и приведена схема формирования спекл-полей. Показано, что продольную составляющую при измерениях исключить нельзя, так как это не даст сделать набор независимых измерений. Данные исследования имеют важное значение для метрологии и оптического приборостроения.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Кольер Р. Оптическая голография / К. Беркхарт, Л. Лин. пер. с англ. под ред. Ю.И.Островского. – М.: Мир. 1973. – 686 с.
2. Majorov E.E. A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects / E.E. Majorov, V.T. Prokopenko // Biomedical Engineering. – 2012. – Vol. 46. – No. 3. – Pp. 109-111. DOI: 10.1007/s10527-012-9280-y.
3. Maiorov E.E. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms / E.E. Maiorov, V.T. Prokopenko, A.S. Sherstobitova // Journal of Optical Technology. – 2013. – Vol. 80. – No. 3. – Pp. 162-165. DOI: 10.1364/JOT.80.000162



4. Клименко Н.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия / Н.С. Клименко. – М.: Наука. 1985. – 224 с.
5. Франсон М. Оптика спеклов / М. Франсон ; Пер. с франц. под ред. проф. Ю.И.Островского. – М.: Мир. 1980. – 171 с.
6. Maiorov E.E. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination / E.E. Maiorov, V.T. Prokopenko, L.A. Ushveridze // Biomedical Engineering. – 2014. – Vol. 47. – No. 6. – Pp. 304-306. DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2.
7. Maiorov E.E. Optoelectronic computer system for detection of foreign agents in subsurface layers of skin / E.E. Maiorov, S.V. Udachina T.A. Chernyak, V.T. Prokopenko, G.A. Tsygankova // Biomedical Engineering. – 2016. – Vol. 50. – No. 2. – Pp. 84-87. DOI: 10.1007/s10527-016-9593-3.
8. Maiorov E.E. Experimental study of metrological characteristics of the automated interferometric system for measuring the surface shape of diffusely reflecting objects. / E.E. Maiorov, V.T. Prokopenko, A.C. Mashek et al. // Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 60 (10). – Pp. 1016-1021. DOI: 10.1007/s11018-018-1310-z.
9. Goodman F.W. Laser speckle and related phenomena / F.W. Goodman. – Berlin: Springer-Verlag. – 1975. – Pp. 9-75.
10. Maiorov E.E. In vitro investigation of dental enamel by shift interferometry / E.E. Maiorov, L.I. Shalamay, T.A. Chernyak et al. // Biomedical Engineering. – 2020. – Vol. 54. – Pp. 280-284. DOI: 10.1007/s10527-020-10022-6.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Collier R. Opticheskaja golografija [Optical holography] / K. Burkhart, L. Lin. edited by Yu.I. Ostrovsky. – М.: Mir. 1973. – 686 p. [in Russian]
2. Majorov E.E. A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects / E.E. Majorov, V.T. Prokopenko // Biomedical Engineering. – 2012. – Vol. 46. – No. 3. – Pp. 109-111. DOI: 10.1007/s10527-012-9280-y.
3. Maiorov E.E. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms / E.E. Maiorov, V.T. Prokopenko, A.S. Sherstobitova // Journal of Optical Technology. – 2013. – Vol. 80, – No. 3, – Pp. 162-165. DOI: 10.1364/JOT.80.000162.
4. Klimenko N.S. Golografija sfokusirovannyh izobrazhenij i spekl-interferometrija [Focused image holography and speckle interferometry] / N.S. Klimenko. – М.: Nauka. 1985 – 224 p. [in Russian]
5. Franson M. Optika speklov [Speckle Optics] / M. Franson. edited by Yu.I. Ostrovsky. – М.: Mir. 1980 – 171 p. [in Russian]
6. Maiorov E.E. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination / E.E. Maiorov, V.T. Prokopenko, L.A. Ushveridze // Biomedical Engineering. – 2014. – Vol. 47. – No. 6. – Pp. 304-306. DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2.
7. Maiorov E.E. Optoelectronic computer system for detection of foreign agents in subsurface layers of skin / E.E. Maiorov, S.V. Udachina T.A. Chernyak, V.T. Prokopenko, G.A. Tsygankova // Biomedical Engineering. – 2016. – Vol. 50. – No. 2. – Pp. 84-87. DOI: 10.1007/s10527-016-9593-3.
8. Maiorov E.E. Experimental study of metrological characteristics of the automated interferometric system for measuring the surface shape of diffusely reflecting objects. / E.E. Maiorov, V.T. Prokopenko, A.C. Mashek et al. // Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 60 (10). – Pp. 1016-1021. DOI: 10.1007/s11018-018-1310-z.
9. Goodman F.W. Laser speckle and related phenomena / F.W. Goodman. – Berlin: Springer-Verlag. – 1975. – Pp. 9-75.
10. Maiorov E.E. In vitro investigation of dental enamel by shift interferometry / E.E. Maiorov, L.I. Shalamay, T.A. Chernyak et al. // Biomedical Engineering. – 2020. – Vol. 54. – Pp. 280-284. DOI: 10.1007/s10527-020-10022-6.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.030>

# ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО С УЛУЧШЕННЫМИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Научная статья

Цупкикова Л.С.<sup>1,\*</sup>, Лазарева Т.Л.<sup>2</sup>, Кормилицына Л.В.<sup>3</sup>, Каменчуков А.В.<sup>4</sup><sup>1, 2, 3, 4</sup> Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

\* Корреспондирующий автор (llsts[at] mail.ru)

## Аннотация

В статье рассмотрен подбор состава полимерно-битумного вяжущего для приготовления полимерасфальтобетона эксплуатирующегося в климатических условиях Республики Саха (Якутия). Установлены зависимости влияния рецептурных и технологических факторов на низкотемпературные свойства ПБВ, в том числе на температуру хрупкости. Разработаны принципы управления процессами структурообразования вяжущего, позволяющие корректировать его состав в случае несоответствия требованиям ГОСТ. Рассмотрено влияние марки полимерно-битумного вяжущего на трещиностойкость полимерасфальтобетона, Состав полимерно-битумного вяжущего, технология его приготовления, и полимерасфальтобетонная смесь были апробированы при реконструкции участка автомобильной дороги М-56 «Лена».

**Ключевые слова:** полимерно-битумное вяжущее, блоксополимер СБС, полимерасфальтобетон, адгезионная добавка.

## PRODUCTION OF POLYMER-MODIFIED ASPHALT CEMENTS WITH IMPROVED LOW-TEMPERATURE PROPERTIES FOR THE RECONSTRUCTION OF A HIGHWAY IN THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

Research article

Tsupikova L.S.<sup>1,\*</sup>, Lazareva T.L.<sup>2</sup>, Kormilitsyna L.V.<sup>3</sup>, Kamenchukov A.V.<sup>4</sup><sup>1, 2, 3, 4</sup> Pacific National University, Khabarovsk, Russia

\* Corresponding Author (llsts[at] mail.ru)

## Abstract

The article examines the selection of the composition of polymer-modified asphalt cement for the preparation of polymer-asphalt concrete used in the climatic conditions of the Republic of Sakha (Yakutia). The study establishes the dependences of the influence of prescription and technological factors on the low-temperature properties of PMA, including the brittleness temperature. The authors also present the principles of controlling the processes of structure formation of PMA that allow to adjust its composition in case of non-compliance with the requirements of GOST. They also study the influence of the brand of polymer-modified asphalt cement on the crack resistance of polymer-asphalt concrete, the composition of polymer-modified asphalt cement, the technology of its preparation, and the polymer-asphalt mixture were tested during the reconstruction of the M-56 "Lena" highway section.

**Keywords:** polymer modified asphalt cement, SBS block copolymer, polymer-asphalt concrete, adhesive additive.

## Введение

В условиях резко континентального климата Якутии предъявляются повышенные требования к дорожно-строительным материалам. При реконструкции участка автомобильной дороги М-56 «Лена» встал вопрос о применении более современных и долговечных материалов. Вместо традиционного асфальтобетона было решено использовать полимерасфальтобетон. Вместо битума в полимерасфальтобетоне используются полимерно-битумные вяжущие (ПБВ), отличающиеся высокой эластичностью, в том числе при низких температурах, низкой температурой хрупкости и высокой температурой размягчения. Все это актуально для климатических условий Восточной Сибири. Перед испытательным центром строительных материалов Тихоокеанского государственного университета, на кафедре автомобильных дорог, была поставлена задача разработать состав вяжущего, с учетом имеющихся материалов и климатических условий района строительства, технологический регламент для приготовления ПБВ, а также оценить качество полимерасфальтобетона на полученном вяжущем.

## Методы исследования и результаты

Основная задача при подборе состава модифицированного битума состояла в том, чтобы улучшить низкотемпературные свойства вяжущего, главным образом температуру хрупкости, а также повысить его дуктильность и пенетрацию при температуре 0°C и расширить интервал пластичности вяжущего. Для климатических условий Якутии оптимальным с точки зрения вязкости является полимерно-битумное вяжущее марки ПБВ130. В качестве основы для приготовления вяжущего был взят битум БНД 130/200, который поставляется предприятием ООО «Битум», г. Красноярск. Для модификации вяжущего использовался блоксополимер марки СБС Р 30-00А производства АО «Воронежсинтезкаучук». Полимер этой марки хорошо совмещается с битумом, сочетая в себе высокую прочность при растяжении, присущую термопластам и, вместе с тем, высокую эластичность и очень низкую температуру стеклования характерные для эластомеров. В качестве пластификатора использовалось индустриальное масло марки И-40А. В ходе испытаний различных образцов вяжущего была установлена зависимость температуры хрупкости от количества пластификатора и процентного содержания блоксополимера, таблица 1.

Таблица 1 – Зависимость температуры хрупкости от содержания пластификатора и расхода полимера

| Содержание СБС Р30-00А | Содержание пластификатора, % |     |     |     |     |
|------------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                        | 0                            | 5   | 10  | 15  | 20  |
| 0                      | -20                          | -25 | -32 | -39 | -41 |
| 2,5                    | -21                          | -25 | -30 | -38 | -40 |
| 3,0                    | -22                          | -25 | -31 | -38 | -40 |
| 3,5                    | -22                          | -26 | -32 | -39 | -42 |

Из результатов испытаний видно, что на снижение температуры хрупкости влияет количество пластификатора, в то время как корреляции с содержанием полимера нет. Аналогичные результаты были получены при использовании пластификатора ПН-6 Омского НПЗ.

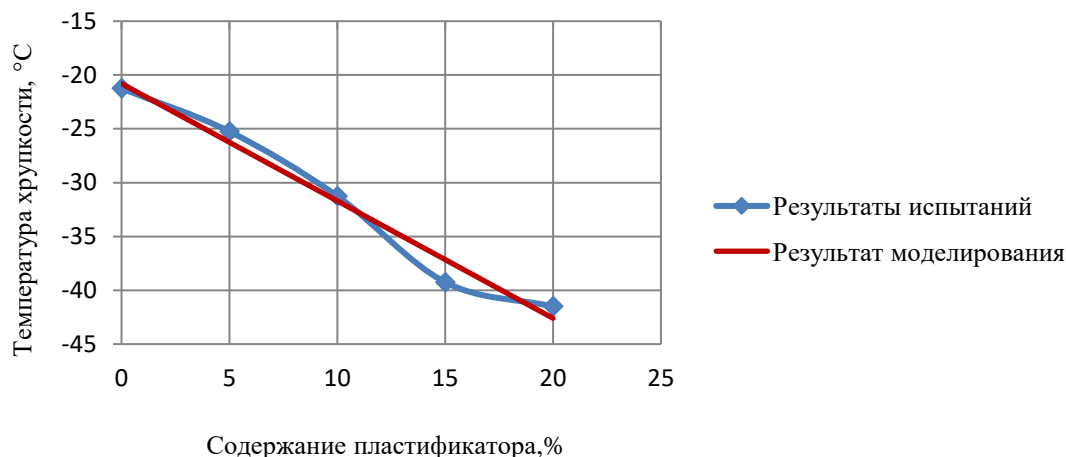


Рис. 1 – Зависимость температуры хрупкости от содержания пластификатора

Уравнение теоретической линии регрессии, найденное с помощью MS Excel, имеет вид:

$$y = -1,09x - 20,8 \quad (1)$$

где  $x$  – содержание пластификатора, %

$y$  – температура хрупкости, °C

Коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,9769, то есть регрессионную модель можно использовать для прогноза температуры хрупкости вяжущего и выбора оптимального количества пластификатора.

Добавка блоксополимера СБС Р 30-00А позволяет повысить температуру размягчения вяжущего и расширить интервал пластичности. На рисунке 2 показаны результаты испытаний вяжущего с содержанием пластификатора 12 %.

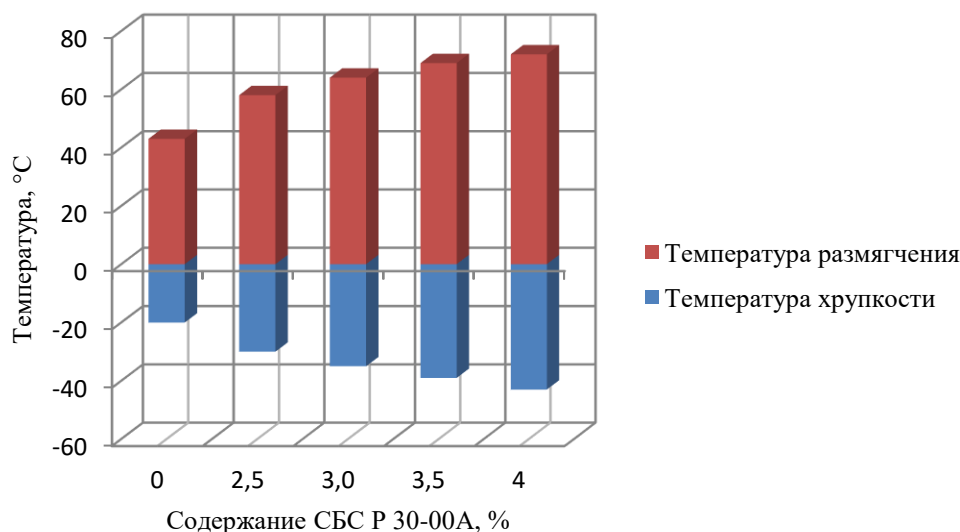


Рис. 2 – Зависимость интервала пластичности ПБВ от содержания блоксополимера СБС Р 30-00А

Из низкотемпературных свойств вяжущего важна также эластичность при 0°C, которая влияет на трещиностойкость полимерасфальтобетона при отрицательных температурах, результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние содержания СБС Р30-00А и пластификатора на эластичность вяжущего

| Содержание СБС Р30-00А,<br>% | Эластичность при 0°С, % |    |    |    |    |
|------------------------------|-------------------------|----|----|----|----|
|                              | 0                       | 5  | 10 | 15 | 20 |
| 0                            | -                       | -  | -  | -  | -  |
| 2                            | 30                      | 42 | 44 | 45 | 47 |
| 2,5                          | 55                      | 60 | 62 | 61 | 63 |
| 3                            | 78                      | 78 | 78 | 79 | 79 |
| 3,5                          | 78                      | 78 | 78 | 77 | 79 |
| 4                            | 80                      | 78 | 79 | 80 | 80 |

Требуемая эластичность (не менее 75% в соответствии с ГОСТ 9128) достигается при содержании полимера более 3%. При таком количестве полимера, содержание пластификатора практически не влияет на эластичность полимерно-битумного вяжущего.

Изучены и другие физико-механические свойства различных составов ПБВ. Установлено, что растяжимость при 0°С повышается с увеличением содержания пластификатора и СБС Р30-00А.

Так как наличие пластификатора, представляющего собой масляные фракции нефти, приводит к снижению адгезии вяжущего, предложено использовать адгезионную добавку RedisetWMX. Введение RedisetWMX в состав вяжущего повышает смачиваемость минеральных частиц полимерасфальтобетонной смеси и ее удобоукладываемость и позволяет снизить температуру уплотнения смеси на 30°С. Это дает возможность увеличить продолжительность строительного сезона при реконструкции автомобильной дороги в условиях якутского климата. Оценка адгезии к мрамору, определенная в соответствии с ГОСТ 12801, составила четыре балла для немодифицированного битума и пять баллов для ПБВ.

В качестве оптимального состава ПБВ130 был предложен следующий:

- вязкий дорожный битум БНД 130/200 – 83,5%
- блоксополимер СБС Р30-00А – 3,5%
- индустриальное масло И-40А – 12%
- адгезионная добавка RedisetWMX – 1%.

Состав и свойства исходного битума и полученного на его основе полимерно-битумного вяжущего представлены в таблице 3. Особо следует отметить значительное снижение температуры хрупкости вяжущего: с – 20 °С, до – 39 °С. Другие низкотемпературные свойства ПБВ также улучшились. По всем параметрам ПБВ соответствует требованиям ГОСТ и существенно превосходит по свойствам исходный битум.

Таблица 3 – Результаты испытаний полимерно-битумного вяжущего

| Наименование показателя                                          | Значения показателей       |           | Требования<br>ГОСТ Р 52056-<br>2003 для ПБВ<br>130 |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|----------------------------------------------------|
|                                                                  | БНД 130/200                | ПБВ 130   |                                                    |
| 1. Глубина проникания иглы, 0,1 мм,<br>– при 25 °С<br>– при 0 °С | 140<br>36                  | 138<br>58 | Не менее 130<br>Не менее 50                        |
| 2. Температура размягчения по кольцу и шару, °С                  | 43                         | 67        | Не менее 49                                        |
| 3. Растяжимость, см<br>- при 25 °С<br>- при 0 °С                 | 112<br>8,9                 | 55<br>42  | Не менее 30<br>Не менее 20                         |
| 4. Температура хрупкости, °С                                     | – 20                       | – 39      | Не выше – 30                                       |
| 5. Изменение температуры размягчения после прогрева, °С          | 3,0                        | 4,0       | Не более 7                                         |
| 6. Эластичность, %<br>- при 25 °С<br>- при 0 °С                  | отсутствует<br>отсутствует | 90<br>80  | Не менее 85<br>Не менее 75                         |
| 7. Температура вспышки, °С                                       | 220                        | 231       | Не ниже 220                                        |
| 8. Однородность                                                  | –                          | однородно | однородно                                          |

Полимерно-битумное вяжущее приготовленное на зарубежном аналоге полимерной добавки – термоэластопласте СБС LG-501 («Chemical partner», Ю. Корея) показало практически такие же результаты, поэтому решено было сделать выбор в пользу более доступного отечественного блоксополимера.

Для получения полимерно-битумного вяжущего, соответствующего требованиям ГОСТ, требуется комплексный подход, так как отдельные компоненты вяжущего по-разному влияют на его технические свойства. Поскольку дорожно-строительная организация, для которой проводились исследования, сама планировала готовить полимерно-битумное вяжущее на установке для модификации битума УВБ-2, оснащенной коллоидной мельницей, кроме подбора оптимального состава вяжущего, был также разработан технологический регламент по приготовлению ПБВ и подобраны и испытаны составы полимерасфальтобетона на полученном вяжущем. Горячий мелкозернистый полимерасфальтобетон типа А II марки соответствует требованиям ГОСТ 9128-2013 по всем показателям, включая трещиностойкость. Составы полимерасфальтобетонов на менее вязких ПБВ не соответствуют требованиям ГОСТ, несмотря на более низкую температуру хрупкости, из-за недостаточной когезии вяжущего, таблица 4.

Таблица 4 – Влияние марки ПБВ и его температуры хрупкости на трещиностойкость полимерасфальтобетона

|                                                               | ПБВ 130                     | ПБВ 200 | ПБВ 300 |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|
| Глубина проникания иглы, 0,1 мм, 25 °С                        | 138                         | 215     | 320     |
| Температура хрупкости, °С                                     | – 39                        | – 42    | – 46    |
| Трещиностойкость полимерасфальтобетона, МПа                   | 2,57                        | 1,75    | 0,85    |
| Требования ГОСТ 9128-2013 по показателю трещиностойкости, МПа | не менее 2,0 и не более 6,0 |         |         |

Состав полимерно-битумного вяжущего, технология его приготовления и асфальтобетонная смесь на этом вяжущем были успешно внедрены в производство ОАО Дальстроймеханизация при реконструкции участка автомобильной дороги М-56 «Лена» на участке от Невера до Якутска с 825 по 849 километр.

### Выводы

Выявлены факторы, влияющие на низкотемпературные свойства ПБВ, и предложены рекомендации, позволяющие корректировать его состав в случае несоответствия требованиям ГОСТ:

если температура хрупкости выше требуемой – необходимо увеличить содержание пластификатора, ориентировочное содержание пластификатора можно определить, используя найденную в ходе исследования зависимость;

если растяжимость при 0°С меньше требуемой, следует увеличить количество пластификатора или блоксополимера;

если эластичность меньше требуемого значения, необходимо увеличить количество блоксополимера.

Увеличенный интервал пластичности, на первый взгляд позволяющий сместить его в сторону более низких температур, используя вместо ПБВ 130 менее вязкие ПБВ 200 или ПБВ 300 с более низкими температурами хрупкости, не позволяет получить требуемую трещиностойкость полимерасфальтобетона из-за недостаточной когезии вяжущего. Поэтому ПБВ 130 является оптимальным для приготовления полимерасфальтобетона.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Гохман Л.М. Битумы, полимерно-битумные вяжущие, асфальтобетон, полимерасфальтобетон / Л.М. Гохман. Учебно-методическое пособие. – М.: ЗАО «Экон-Информ», 2008. – 117 с.
2. Методические рекомендации по применению полимерно-битумного вяжущего (на основе ДСТ) при строительстве дорожных, мостовых и аэродромных асфальтобетонных покрытий. М.: Союздорнии, 1988 – 25 с.
3. ОДМ 218.2.003-2007. Рекомендации по использованию полимерно-битумных вяжущих материалов на основе блоксополимеров типа СБС при строительстве и реконструкции автомобильных дорог. – М.: Москва, 2007 – 120 с.
4. Цупикова Л. С. Особенности подбора состава полимерно-битумного вяжущего в условиях дорожных лабораторий / Л. С. Цупикова, Н. И. Ярмолинская // Дальний Восток: Автомобильные дороги и безопасность движения: международный сборник научных трудов / под ред. А. Е. Казаринова – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2002 – №2, С 136 – 140.
5. Ярмолинская, Н.И. Модификация дорожных битумов полимерами для высококачественных дорожных покрытий северных регионов Дальнего Востока / Н.И. Ярмолинская, Т.Л. Лазарева // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: международный сборник научных трудов. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – № 16. С. 135-140.
6. Порадек, С. В. Изучение процесса растворения полимерных материалов в нефтепродуктах при модифицировании битума / С. В. Порадек, // Автомоб. дороги: информ. сб. / Информавтодор. – 1996. – Вып. 5. – С 34 – 42.
7. Колбановская, А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. – М. : Транспорт, 1973. – 264 с.
8. Гохман, Л.М. Полимерно-битумные вяжущие материалы на основе СБС для дорожного строительства : обзорная информация / Л.М. Гохман, Е.М. Гуракий, А.Р. Давыдова и др. Вып.4. – М. : Информавтодор, 2002. – 112с.
9. Гохман, Л. М. Влияние эластичности вяжущих на усталостную прочность полимерасфальтобетона / Л.М. Гохман // Наука и техника в дорожной отрасли. - 2012. - № 4. - С. 21-24.
10. Высоцкая, М. А. Влияние морфологии на качественные показатели полимерно-битумного вяжущего / М. А. Высоцкая, С. Ю. Шеховцова // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. - 2015. - № 11. - С. 18-24.

11. Галдина, В. Д. Моделирование составов и свойств полимерно-битумных вяжущих методом планирования эксперимента / В. Д. Галдина, М. С. Черногородова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. - 2015. - Вып. 5 (45). - С. 62-66.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Gokhman L. M. Bitumy, polimerno-bitumnye vjazhushhie, asfal'tobeton, polimerasfal'tobeton [Bitumen, polymer-bitumen binders, asphalt concrete, polymerasfaltobeton] / L. M. Gokhman. Educational and methodological manual. - M.: ZAO "Ekon-Inform", 2008 -- 117 p. [in Russian]

2. Metodicheskie rekomendacii po primeneniju polimerno-bitumnogo vjazhushhego (na osnove DST) pri stroitel'stve dorozhnyh, mostovyh i ajerodromnyh asfal'tobetonnyh pokrytij [Methodological recommendations for the use of polymer-bitumen binder (based on DST) in the construction of road, bridge and airfield asphalt concrete coatings]. Moscow: Soyuzdornii, 1988 -25 p. [in Russian]

3. ODM 218.2.003-2007. Rekomendacii po ispol'zovaniju polimerno-bitumnyh vjazhushhih materialov na osnove blokopolimerov tipa SBS pri stroitel'stve i rekonstrukcii avtomobil'nyh dorog [Recommendations for the use of polymer-bitumen binders based on block copolymers of the SBS type in the construction and reconstruction of highways]. - Moscow: Moscow, 2007-120 p. [in Russian]

4. Tsupikova L. S. Osobennosti podbora sostava polimenno-bitumnogo vjazhushhego v uslovijah dorozhnyh laboratorij [Features of the selection of the composition of polymer-bitumen binder in the conditions of road laboratories] / L. S. Tsupikova, N. I. Yarmolinskaya // Dal'nij Vostok: Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizhenija: mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov [Far East: Automobile roads and traffic safety: international collection of scientific papers] / edited by A. E. Kazarinov-Khabarovsk: Publishing House of the Pacific State University, 2002-No. 2, pp. 136-140. [in Russian]

5. Yarmolinskaya, N. I. Modifikacija dorozhnyh bitumov polimerami dlja vysokokachestvennyh dorozhnyh pokrytij severnyh regionov Dal'nego Vostoka [Modification of road bitumen with polymers for high-quality road surfaces in the northern regions of the Far East] / N. I. Yarmolinskaya, T. L. Lazareva // Dal'nij Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizhenija: mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov [The Far East. Highways and traffic safety: an international collection of scientific papers]. - Khabarovsk: Publishing House of the Pacific State University, 2016. - No. 16. pp. 135-140. [in Russian]

6. Radadek, S. V. Izuchenie processa rastvorenija polimernykh materialov v nefteproduktah pri modifizirovanii bituma [Study of the process of dissolution of polymer materials in petroleum products when modifying bitumen] / S. V. Radadek, // Avtomob. dorogi: inform. sb. / Informavtodor [Avtomob. roads: inform. sb. / Informavtodor]. -- 1996. - Issue 5. -- P. 34-42. [in Russian]

7. Kolbanovskaya, A. S. Dorozhnye bitumy [Road bitumen] / A. S. Kolbanovskaya, V. V. Mikhailov -- M.: Transport, 1973 -- 264 p. [in Russian]

8. Gokhman, L. M. Polimerno-bitumnye vjazhushhie materialy na osnove SBS dlja dorozhnogo stroitel'stva : obzornaja informacija [Polymer-bitumen binders based on SBS for road construction: overview] / L. M. Gokhman, E. M. Gurari, A. R. Davydova, etc. Vol.4. - M.: Informavtodor, 2002. -- 112 p. [in Russian]

9. Gokhman, L. M. Vlijanie j elastichnosti vjazhushhih na ustalostnuju prochnost' polimerasfal'tobetona [The influence of the elasticity of binders on the fatigue strength of polymer-asphalt concrete] / L. M. Gokhman // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli [Science and Technology in the road industry]. - 2012. - No. 4. - pp. 21-24. [in Russian]

10. Vysotskaya, M. A. Vlijanie morfologii na kachestvennye pokazateli polimerno-bitumnogo vjazhushhego [Influence of morphology on the quality indicators of polymer-bitumen binder] / M. A. Vysotskaya, S. Yu. Shekhovtsova // Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanyh kompanij [The world of petroleum products. Bulletin of Oil Companies]. - 2015. - No. 11. - pp. 18-24. [in Russian]

11. Galdina, V. D. Modelirovanie sostavov i svoystv polimerno-bitumnyh vjazhushhih metodom planirovanija jeksperimenta [Modeling of compositions and properties of polymer-bitumen binders by the method of experiment planning] / V. D. Galdina, M. S. Chernogorodova // Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy]. - 2015. - Issue 5 (45). - pp. 62-66. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.031>**ОЦЕНКА САМОВОЗГОРАНИЯ ЛЕСОВ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ**

Научная статья

**Чалдаева Е.И.\***

Томский политехнический университет, Томск, Россия

\* Корреспондирующий автор (katerino4ka\_94[at]mail.ru)

**Аннотация**

Статья посвящена проблеме возникновения самовозгораний лесного массива Томской области. Рассмотрены принципы и проведена оценка пожарного риска возгорания лесных массивов Томской области от воздействия загрязнителей. В качестве объектов выбраны образцы пород – лесных подстилок лесного массива Сибирского региона (опад пород, представляющих собой лесной горючий материал). Предметом исследования является время индукции процесса самовозгорания выбранных образцов пород лесного горючего материала. Исследования выполнены с помощью экспериментальной установки, собранной в лабораторных условиях. Получена степенная функция, послужившая основой для оценки вероятности возникновения самовозгораний и оценке пожарного риска.

**Ключевые слова:** загрязнитель, лесной массив, самовозгорание.

**AN ASSESSMENT OF SPONTANEOUS COMBUSTION IN THE FORESTS OF TOMSK OBLAST FROM EXPOSURE TO POLLUTANTS**

Research article

**Chaldaeva E.I.\***

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

\* Corresponding author (katerino4ka\_94[at]mail.ru)

**Abstract**

The article is devoted to the problem of spontaneous combustion of the forest area of the Tomsk region. The study examines the principles and conducts an assessment of the risk of forest fires in Tomsk Oblast from the impact of pollutants. The authors selected samples of rocks – forest floor of the Siberian forest area (the fall of rocks that represent forest combustible material). The subject of the study is the time of induction of the spontaneous combustion process of selected samples of forest fuel material. The studies were carried out using an experimental setup assembled in the laboratory. As a result, a power function was obtained, which served as the basis for estimating the probability of spontaneous combustion and fire risk assessment.

**Keywords:** pollutant, forest area, spontaneous combustion.

**Введение**

Проблема в области возникновения и распространения лесных пожаров является актуальной. Наибольшее внимание в настоящее время уделяется вопросам вычисления времени индукции процесса самовозгорания, что имеет практический интерес: предотвращение возникновения пожаров в условиях природной среды и аварий на производстве. Оно вызывает интерес ученых с конца XIX-го века, и по сей день.

Оценка пожарного риска позволяет своевременно определять пожарную опасность [2]. В литературе [3] известны различные примеры самовозгораний угольных объемов, лесных материалов и сухостоев [4]. Самовозгорание – одна из самых главных причин возникновения пожаров в условиях природной среды. [1] Рассматриваемая лесная подстилка (опад пород) в Томской области – объект возникновения природной чрезвычайной ситуации.

Расчетные величины пожарного риска определяются с использованием методик, утвержденных МЧС Российской Федерации.

Общие методики оценки риска должны содержать порядок:

- а) анализа пожарной опасности объекта защиты;
- б) определения частоты реализации пожароопасных ситуаций;
- в) построения полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- г) оценки последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития;
- д) вычисления пожарного риска.

Данные исследования развивают прикладные направления теории рисков при определении пожарной опасности именно в лесах Томской области с учетом особенностей климатических условий, растительности и почв, что придает теоретическую значимость исследований.

Формулировка общей прогностической модели развития лесных пожаров ставит много новых широкомасштабных задач.

**Основная часть**

Объектом исследования стала кора березы и хвоя сосны.

Определение температуры самовозгорания проводится с помощью ГОСТ 12.1.044-89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов» [1]. Исследования выполнены с помощью экспериментальной установки, собранной в лаборатории Томского политехнического университета, включающей в себя определение времени индукции процесса самовозгорания твердых лесных горючих материалов с точки зрения пожаро- и взрывоопасности, изучения особенностей самовозгорания различных составов лесной подстилки, характерной для лесов Томской области. Работа выполнена в масштабе температур от 40°C до 450°C.

При выполнении опытной части исследования образец помещен в медный контейнер толщиной около 10 мм и отправлен в специальную камеру. Рабочее место лаборатории удовлетворяет требованиям пожарной безопасности и санитарно-гигиеническим требованиям.

В качестве методов исследования применялся аналитический обзор информации по теме исследования и темам смежным с областью обеспечения пожарной безопасности в условиях лесных насаждений, а также обзорная часть статистики лесных пожаров по региону Томской области.

Проблемой пожарной безопасности в лесах становится то, что с позиции теплофизики большинство органических материалов при сочетании ряда условий могут самовозгораться. Это подтверждает практика самовозгорания хлопка, угля, пыли на элеваторах и в зернохранилищах, торфов в болотистых местностях по территории Томских лесов [8].

Авторы [9] отмечают, что в слоях породы определенного размера происходят процессы самонагрева и подъема температуры за счет реакций с выделением определённого количества теплоты – экзотермическая реакция. Отсюда и возникает проблема исследовательской работы – каким образом данное самовозгорание предотвратить. В том числе, актуальной задачей становится уменьшение влияния антропогенного загрязнения в лесах.

При исследовании березовой пыли массой 2,5 г, объемной плотностью  $0,05 \text{ г/см}^3$  при постоянной температуре окружающего воздуха в  $23^\circ\text{C}$  и влажности в лаборатории равной 65%, по измененным физико-химическим составляющим самовозгорания образца не наблюдается, а именно отмечается характерный процесс пиролиза [6]. Перед горением наблюдалась фаза спекания.

Для большей точности лабораторные исследования были выполнены несколько раз. Рабочая температура самовозгорания образца – минимальная температура самовозгорания нескольких исследуемых образцов.

При исследовании брикета утрамбованной хвои сосны массой 5 г, объемной плотностью  $0,08 \text{ г/см}^3$  при постоянной температуре окружающего воздуха в  $23^\circ\text{C}$  и влажности в лаборатории равной 65% возникает самовозгорание при температуре в печи около  $200^\circ\text{C}$  [7]. Время индукции процесса самовозгорания составило примерно 1,5 минуты.



Рис. 1 – Вид экспериментальной установки

Смешанный лес самовозгорится при искусственном уменьшении времени индукции начала тления. Процесс ускорится за счет загрязнителя в зависимости от его размеров [10].

Полученная степенная функция (1), служит основой оценки пожарного риска и указывает об опасности загрязнителя [6]:

$$y = 8E + 18 \cdot x^{-7,01} \quad (1)$$

Зависимость (1), говорит о том, что при максимальной температуре воздуха области в  $37^\circ\text{C}$  самовозгорание происходит в течение 3 лет. При удачном сочетании факторов происходит сокращение времени индукции зажигания с 3 лет до 2 минут [5]:

Рассмотрим один из загрязнителей – пятно машинного масла размером  $24 \times 39 \text{ см}$ . Максимальная рабочая площадь солнечной инсоляции в виде вписанного в четырехугольник эллипс составляет 70%. Собранный объем на поверхности воды выглядит как конус с основанием до  $640 \text{ см}^2$  и высотой 1 см, что составит  $192 \text{ см}^3$ . Времени для испарения такого объема жидкости при температуре  $20^\circ\text{C}$  потребуется 20 часов. Самовозгорание возникнет в течении 1,5 часов.

На основании экспериментального определения времени индукции твердых горючих веществ возможно определить соответствующую оценку пожарного риска. Данные факторы оценки пожарного риска отдельно или в совокупности будут оказывать влияние на процесс самовозгорания и на развитие пожара соответственно:

1. Климатические факторы – время года, продолжительность штилевой погоды, количество осадков, количество солнечных дней;
2. Влияние факторов на процесс самовозгорания: температура среды, время индукции, факторы теплоотвода, влажность среды и объекта, плотность объекта;
3. Вид природного ландшафта для определенной территории региона Российской Федерации: мокрые болота, сухие торфяные болота, хвойный лес, лиственный лес, смешанный лес;
4. Влияние источников зажигания – естественные или искусственные источники;
5. Зажигание при наличии антропогенного фактора – размещение промышленно-технологических отходов, мусора с близлежащих свалок;



6. Вид и способ самовозгорания – микробиологическое, химическое, температурное.

Первым мероприятием по предотвращению пожаров является профилактика среди населения в области пожарной опасности в лесах. Необходимо четко разъяснить правила поведения на природе, показать последствия безответственности [10]. В качестве законодательного способа предлагается введение ужесточений административной ответственности за несоблюдение норм пожарной безопасности. Необходимой мерой становится обеспечение должного ухода за местами сбора и хранения, организация переработки и утилизации отходов человека [9].

### Заключение

В ходе исследования экспериментальным путем определено время индукции самовозгорания лесного горючего материала, результат представлен в виде степенной функции, позволяющий прогнозировать развитие определенных событий, процессов, происходящих при пожарах в природной среде, что дает основания для принятия каких-либо предупредительных мероприятий. Данная функция положена в основу формирования оценки пожарного риска.

Практическое значение исследовательской работы состоит в реализации прогностической картины вероятных самовозгораний и принятия соответствующих мер, направленных на предотвращение их возникновения, что устраняет или существенно снижает ущерб, наносимый чрезвычайной ситуацией.

Результаты исследований могут стать основой при ведении лесного хозяйства, прогнозировании состояния лесных массивов и обеспечить своевременную уборку остатков продуктов жизнедеятельности [7].

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. ГОСТ 12.1.044-89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов» – Введ. 01.01.1991. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 107с.
2. Губский С.В. Причины самовозгорания лесной подстилки в зимний период времени / С.В. Губский, А.М. Зайцев// Научный вестник Воронежского гос-ударственного архитектурно-строительного университета. Серия: Студент и наука. – 2016. – № 9. – С. 133-138.
3. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: Наука СО РАН, 2008. – 404 с.
4. Чалдаева, Е. И. Критерии определения показателей оценки пожарного риска очагов возгорания лесных горючих материалов в природных ландшафтах Томской области / Е. И. Чалдаева, А. И. Сечин // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 26-30 октября 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. Е. Н. Пашкова . — Томск : Томский политехнический университет , 2020 . — С. 255-256 .
5. Чалдаева, Е. И.. Критерии оценки пожарного риска очагов возгорания природных ландшафтов Томской области / Е. И. Чалдаева, А. И. Сечин // Современные проблемы машиностроения сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 28 октября - 1 ноября 2019 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. А. Ю. Арляпова и др. — Томск : Изд-во ТПУ , 2019 . — С. 327-330.
6. Фурьев В.В. Комплексы напочвенных горючих материалов и возможность их регулирования в профилактике лесных пожаров / В.В. Фурьев, Л.П. Злобина, В.И. Заболотский и др. // Лесн. хоз-во. – 2007. – № 1. – С. 43–44.
7. Карауш С.А. Расчет параметров процессов горения: учебное пособие / С.А. Карауш. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 120 с
8. Крикунов Г.Н. О критических размерах скоплений самовозгорающихся материалов / Г.Н. Крикунов, А.М. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1977. – № 8. – С. 45-49.
9. Андриянова М.А. Управление риском эксплуатации потенциально опасных объектов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тулу, ТулГУ, 1999.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST 12.1.044-89 Pozharovzryvoopasnost' veshhestv i materialov [Fire and Explosion Hazard of Substances and Materials - Introduced. 01.01.1991]. - Moscow: Publishing house standartov, 1991 – 107 p. [in Russian]
2. Gubsky S. V. Prichiny samovozgoraniya lesnoy podstilki v zimniy period vremeni [Causes of Spontaneous Combustion of Forest Litter in the Winter Period of Time] / S. V. Gubsky, A.M. Zaytsev // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gos-udarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Student i nauka [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Student and Science]. - 2016. - No 9, pp. 133-138 [in Russian]
3. Dorrer G. A. Dinamika lesnykh pozharov [Dynamics of Forest Fires] / G. A. Dorrer. - Novosibirsk: Nauka SB RAS, 2008. - 404 p. [in Russian]
4. Chaldaeava, E. I. Kriterii opredeleniya pokazatelej ocenki pozhar'nogo riska ochagov vozgoraniya lesnykh gorjuchikh materialov v prirodnykh landshaftakh Tomskoj oblasti [Criteria for Determining the Indicators for Assessing the Fire Risk of Fires of Forest Combustible Materials in the Natural Landscapes of Tomsk Oblast] / E. I. Chaldaeava, A. I. Sechin // Sovremennye problemy mashinostroeniya sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii, g. Tomsk, 26-30 oktjabrja 2020 g.: [Modern problems of mechanical engineering proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference, Tomsk, October 26-30, 2020]: / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU); ed. N. Pashkova . Tomsk: Tomsk Polytechnic University , 2020 . — pp. 255-256. [in Russian]

5. Chaldaeva, E. I. Kriterii ocenki pozharnogo riska ochagov vozgoranija prirodnykh landshaftov Tomskoj oblasti [Criteria for Assessing the Fire Risk of Fires in Natural Landscapes of the Tomsk Region] / E. I. Chaldaeva, A. I. Sechin // *Sovremennye problemy mashinostroenija sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, g. Tomsk, 28 oktjabrja - 1 nojabrja 2019 g. [Modern Problems of Mechanical Engineering Collection of Scientific Papers of the XII International Scientific and Technical Conference, Tomsk, October 28 - November 1, 2019:] / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU); ed. Yu. Arlyapova [et al.]. - Tomsk: TPU Publishing House, 2019. — pp. 327-330. [in Russian]
6. Furyaev V. V. Kompleksy napochvennykh gorjuchikh materialov i vozmozhnost' ikh regulirovanija v profilaktike lesnykh pozharov [Complexes of Ground-Based Combustible Materials and the Possibility of Their Regulation in the Prevention of Forest Fires] / V. V. Furyaev, L. P. Zlobina, V. I. Zabolotsky et al. // *Lesn. khoz-vo.* [Forestry] - 2007. - No 1, pp. 43-44 [in Russian]
7. Karaush S. A. Raschet parametrov processov gorenija: uchebnoe posobie [Calculation of Parameters of Combustion Processes: A Textbook] / S. A. Karaush. - Tomsk: Publishing house of the Tomsk State University of Architecture and Building, 2015 – 120 p. [in Russian]
8. Krikunov G. N. O kriticheskikh razmerakh skoplenij samovozgorajushchiksja materialov [On the Critical Dimensions of Accumulations of Self-Igniting Materials] / G. N. Krikunov, A.M. Zaitsev // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gorny Zhurnal.* [Bulletin of the Higher Educational Institutions. Mining Journal]. - 1977. - No. 8. - pp. 45-49 [in Russian]
9. Andrianova M. A. Upravlenie riskom ehkspluatatsii potencial'no opasnykh ob"ektov [Managing the Risk of Operating Potentially Hazardous Facilities]. Extended abstract of Candidate's Thesis. Engineering Sciences / M. A. Andrianova. Tula, Tula State University, 1999 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.032>

## АНАЛИЗ ТЕКУЩИХ ПРОБЛЕМ НЕФТЕСЕРВИСНОЙ ОТРАСЛИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФОНДА НЕЗАКОНЧЕННЫХ СКВАЖИН В РОССИИ

Научная статья

Шабалин А.А.<sup>1,\*</sup>, Катыхшева Е.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9994-9421;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1935-8013;

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (ashabalin750[at]gmail.com)

### Аннотация

В данной статье проанализированы основные предпосылки к формированию фонда незаконченных скважин на территории Российской Федерации, степень готовности НГК России к реализации подобного решения. Рассмотрены экспертные мнения, касающиеся применения подобного способа бурения в России, а также запланированные Министерством энергетики мероприятия, способствующие скорейшей реализации данной технологии, задекларированные в тексте «Энергетической Стратегии – 2035». Кроме того, был проанализирован зарубежный опыт формирования подобного фонда незаконченных скважин (в частности, на территории Соединённых Штатов Америки), а также благоприятный эффект данного решения в контексте кризиса нефтегазовой отрасли в 2014-2016 гг.

**Ключевые слова:** незаконченная скважина, нефтесервис, бурение, углеводороды, нефть.

## AN ANALYSIS OF THE CURRENT ISSUES OF THE OILFIELD SERVICES INDUSTRY IN THE FORMATION OF THE DRILLED BUT UNCOMPLETED WELLS (DUC) FUND IN RUSSIA

Research article

Shabalin A.A.<sup>1,\*</sup>, Katysheva E.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9994-9421;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1935-8013;

<sup>1,2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

\* Corresponding author (ashabalin750[at]gmail.com)

### Abstract

This article analyzes the main prerequisites for the formation of the fund of the drilled but uncompleted wells on the territory of the Russian Federation, the degree of preparedness of the Russian oil and gas companies to implement this solution. The study assesses expert opinions concerning the use of such a drilling method in Russia, as well as the measures planned by the Ministry of Energy of the Russian Federation to promote the early implementation of this technology declared in the content of "Energy Strategy – 2035". In addition, the article also analyzes the foreign experience of the formation of the fund of the drilled but uncompleted wells (in particular, in the United States of America), as well as the favorable effect of this decision in the context of the crisis of the oil and gas industry in the period from 2014 to 2016.

**Keywords:** drilled but uncompleted well, oilfield service, drilling, hydrocarbons, oil.

### Введение

Пандемия коронавируса в 2020 году негативно повлияла на экономику многих стран мира. Введение карантинных мер, закрытие международных границ ожидаемо повлекли за собой довольно резкое падение спроса на энергоносители, исключением не стала и нефть. Помочь странам легче преодолеть кризис призвано заключенное в апреле 2020г. соглашение ОПЕК+ о сокращении темпов отбора нефти.

Подобное сокращение темпов отбора прогнозируемо влечёт за собой также снижение спроса на нефтесервисные услуги, в частности спрос на услуги бурения. Для минимизации негативного эффекта подобных ограничений за рубежом активно применяется технология бурения DUC-скважин ("drilled, but uncompleted" – «пробуренные, но незаконченные»).

Согласно отчёту, предоставленному международной сетью компаний «Deloitte», за первый квартал 2020 г. цены на нефть опускались до 20 долларов США за баррель. Данный факт, а также дисбаланс спроса и предложения на рынке жидких углеводородов потребовали незамедлительного вмешательства стран-производителей нефти для урегулирования сложившейся ситуации на мировом рынке нефти. Результатом такого вмешательства стало заключение 12 апреля 2020 г. соглашения между 23 странами-экспортёрами нефти о добровольном ограничении добычи нефти в течение двух лет для стабилизации цен на нефтяном рынке. [1, С. 6]

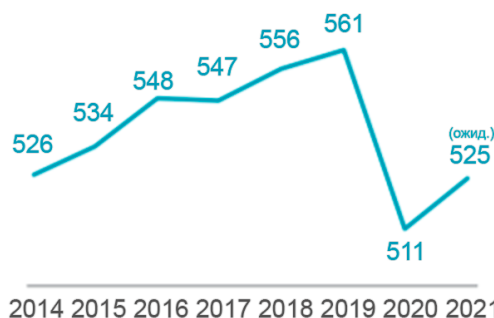


Рис. 1 – Добыча нефти и газоконденсата в РФ, млн т

Примечание: источник – BP Statistical Review of World Energy, EIU

Согласно условиям соглашения, российские компании должны уменьшить добычу на 2,5 млн барр. в сутки, что в свою очередь составляет 26% от всего объема сокращения (так, наибольшая доля объема сокращения добычи приходится на Россию). Резкое падение объемов добычи жидких углеводородов в 2020 году можно проследить на рис. 1. [1, С. 8], [2]

Снижение спроса на нефть, её цены на мировом рынке, а также объемов добычи, несомненно, способно повлечь за собой и снижение спроса на услуги нефтесервисных компаний. Так, согласно данным аналитического отдела «Deloitte», падение нефтесервисного рынка приблизительно равно 77 млрд долларов США (рис. 2). [1, С. 7]

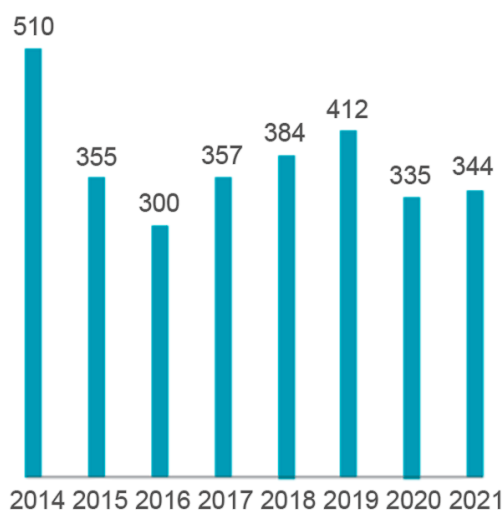


Рис. 2 – Мировой рынок нефтесервиса, млрд долл. США

Примечание: источник – Barclays E&amp;P Spending Surveys (2014-2019 гг.)

Похожие тенденции наблюдаются и на российском рынке при его рассмотрении в долларовом эквиваленте: наблюдается падение с 27,5 млрд до 21,9 млрд долларов США.

Таким образом, множество вышеупомянутых факторов способствуют формированию неблагоприятной экономической ситуации в сфере нефтегазодобычи и нефтесервиса, поскольку темпы бурения на протяжении последних лет неуклонно росли, а снижение темпа добычи углеводородов в перспективе способно привести к сокращению темпов бурения. Способствуют этому и изменения в законодательстве: добывающим компаниям выдвигаются более жёсткие требования касательно извлечения углеводородов, особенно трудноизвлекаемых запасов. В связи с этим добывающие компании начинают увеличивать затраты на эксплуатацию месторождений, зачастую в ущерб разведке и бурению [3].

До начала пандемии коронавируса бурение в РФ показывало положительную динамику: российские нефтяные компании за январь-апрель 2020 года, по подсчётам аналитиков «Deloitte», увеличили разведочное бурение на 15%, а проходка в эксплуатационном бурении выросла на 2,8%. Ожидаемый многими рост специалисты связывают с активным внедрением новых технологий в производство, как например бурение горизонтальных скважин [1], [4].

Однако уже в апреле министр энергетики Александр Новак попросил президента РФ оказать поддержку нефтесервисной отрасли путем формирования фонда незаконченных скважин. Министр предупредил, что падение заказов для нефтесервисных компаний составит до 30–40% в условиях пандемии и снижения спроса на нефть в мире. В мае правительству было поручено создать условия для формирования фонда незаконченных нефтяных скважин, а уже в сентябре Минэнерго предложило программу «Незавершённая скважина». Благодаря её реализации государство планирует сохранить спрос на нефтесервисные услуги на уровне 80% от данного показателя за 2019 год. По словам Александра Новака, реализация данной программы также позволит дополнительно привлечь в бюджет РФ 1,15 трлн рублей за время её действия [5].

Несмотря на кажущуюся необходимость в скорейшей реализации проекта, а также многие его положительные стороны, он был раскритикован главами ВИНК, в частности: Александром Дюковым, генеральным директором ООО «Газпром нефть». По его мнению, компании могут понести дополнительные убытки, связанные с реализацией программы. Стоит также отметить, что ООО «Газпром нефть» начало реализовывать меры по преодолению

сложившейся кризисной ситуации ещё летом 2020 года, введя отсрочку платежей на полгода по контрактам с нефтесервисными компаниями, впоследствии предложив им продление действия такой отсрочки на 2021 год.

Таким образом, можно отметить актуальность проблемы снижения спроса на услуги нефтесервисного сектора в краткосрочной перспективе, а также, несомненно, необходимость её решения. Кроме того, следует принимать во внимание факт публичной критики программы и возможную необходимость в её доработке.

Потребность в тщательном изучении международного опыта в области незаконченных скважин складывается ввиду того, что некоторые государства уже сталкивались с необходимостью создания набора средств для формирования системной гибкости. Незаконченные скважины (НЗС) уже значительное время являются частью такого набора в Соединённых Штатах Америки, в первую очередь, при добыче сланцевой нефти. Данный факт также подтверждает статистика.

Механизм применения такого инструмента заключается в следующем: в период падения цен на энергоноситель бурение скважин не прекращается, капитальные затраты на бурение остаются на прежнем уровне, однако бурятся скважины лишь до определённой глубины – продуктивный пласт остаётся нетронутым. Это позволяет, прежде всего, оперативно вводить эксплуатацию при стабилизации уровня цен, без серьёзных временных затрат на полный цикл бурения скважины.

Так, согласно отчёту Управления энергетической информации США, в ответ на падение нефтяных цен в период 2014-2016 гг. доля DUC-скважин резко выросла с 23% до 75%, а затем стабилизировалась на уровне около 50% (рис. 3) [6], [7].

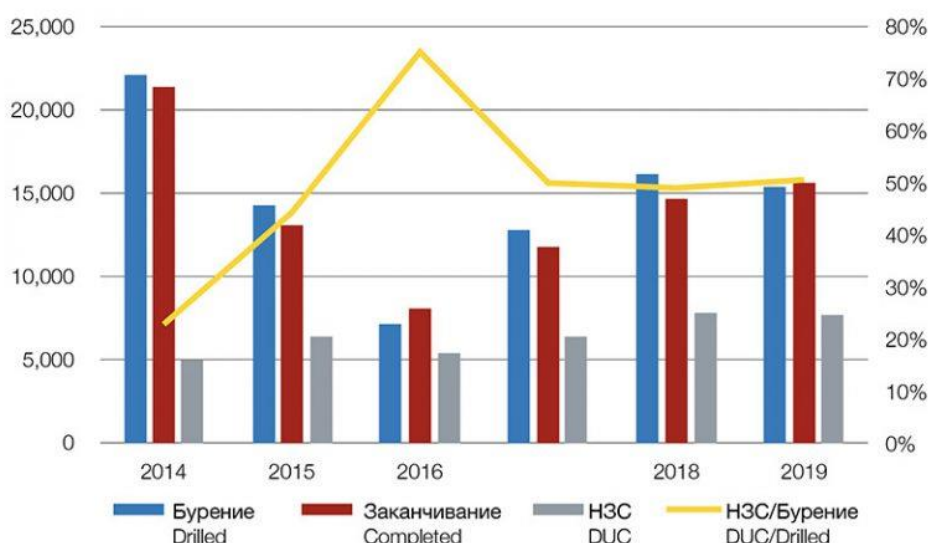


Рис. 3 – Бурение незаконченных скважин в США  
Примечание: источник – *ROGTEC Magazine* № 64

Долгое время существовало мнение о том, что подобное преимущество использования фонда незаконченных скважин лишь мнимое, а такая задержка в завершении строительства способна негативно сказаться на начальном уровне добычи. Однако исследование, проведенное Управлением энергетической информации США, показало, что даже задержка строительства на 4 года «способна повлиять на начальный уровень добычи малозначительно». В исследовании рассматривались скважины Баккенской формации, пробуренные в 2014 году, когда обвал цен на нефть вызвал резкий рост количества НЗС из-за попыток компаний сократить затраты на заканчивание скважин. Старший аналитик УЭИ США, Джозеф Льесковский, также отметил, что значительная часть скважин, пробуренных ранее (за 3-4 года до заканчивания), достигали пика отбора на несколько более высоком уровне, нежели более молодые (1-2 года перед вскрытием продуктивного пласта). Несомненно, существуют некоторые факторы, способные влиять на такие расхождения в показаниях, например: корректировки, сделанные для ограничения влияния эксплуатационных различий, а также сдерживание ранней добычи из-за ограничения пропускной способности трубопроводов и др. Однако в подтверждение тезиса о возможном увеличении пиковой добычи при вскрытии продуктивного пласта НЗС Дж. Льесковский предоставляет данные, полученные Отделом нефти и газа Промышленной комиссии Северной Дакоты, который обладает одной из наиболее полной выборкой данных, охватывающих заканчивание скважин и непосредственно эксплуатацию. Именно в Северной Дакоте скважины, пробуренные ранее, максимально сопоставимы с новыми скважинами по длине ствола, а также по применяемым для вскрытия технологиям. По мнению Льесковского, «больше песка, воды и многостадийный ГРП могут компенсировать любой ущерб, нанесенный за это долгое ожидание» [8].

Таким образом, программа «Незавершенная скважина», предложенная Министерством энергетики РФ, должна стать одной из первоочередных мер в ответ на качественное изменение условий после периода непрерывного роста добычи нефти в РФ с 1998 года [1].

Несмотря на весьма обширную базу нормативно-правовых актов, регулирующих отношения в области проектирования объектов нефтегазовой отрасли, существуют и некоторые проблемы, мешающие формированию фонда незаконченных скважин в Российской Федерации. Они достаточно подробно рассматриваются в работах российских учёных.

Так, в статье «Незаконченные скважины в контексте энергетической стратегии» кандидат технических наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Гнибидин В.Н. говорит о необходимости рассмотрения программы формирования фонда НЗС в контексте новой представленной ЭС-2035. В статье обозначена немаловажная проблема – отсутствие определения «незаконченной скважины» в законодательстве. Да, «незаконченные скважины» упоминаются в Энергетической стратегии, однако реализация связанных с ними пунктов значительно осложнено отсутствием юридической декомпозиции скважины. Несомненно, данный факт тормозит развитие и укрепление нефтесервисной отрасли в Российской Федерации. Ведь наличие в законодательных актах понятия «незаконченной скважины» юридически способно декомпозировать процесс освоения скважины на следующие составляющие: бурение основного ствола (которое, в свою очередь, также может быть разбито на этапы), вскрытие пласта, осуществление мероприятий по повышению нефтеотдачи, вызов притока и освоение. Данный факт позволил бы со значительной лёгкостью делегировать процесс освоения между нефтесервисными организациями, что, в свою очередь, позволило бы снизить себестоимость освоения. Более того, юридическая декомпозиция скважины необходима в случае следования важным глобальным трендам управления эффективностью на месторождениях [9].

Для того, чтобы избежать дальнейших расхождений в толковании термина «незаконченной скважины», обратимся к учебному пособию по бурению горизонтальных скважин А.В. Кустышева: «Незаконченная скважина – это скважина, вскрывшая продуктивный пласт без вторичного вскрытия путём перфорации, обсаженная металлической обсадной колонной». Таким образом, углеводороды остаются в естественном резервуаре, которым непосредственно служит сама ловушка [10].

Следует также отметить, что в связи с отсутствием закреплённого определения «незаконченной скважины» в нормативно-правовых актах термин зачастую претерпевает изменения, утрачивая свой изначальный смысл. Некоторые эксперты весьма настороженно относятся к такой лёгкой замене «незаконченных» скважин, о которых говорил в своём обращении к президенту А. Новак на «незавершенные».

Так, например, независимый эксперт С. Рудницкий в своей статье «О незаконченном и незавершённом» говорит о том, что изменение понятия «незаконченной скважины» на «незавершённую» подразумевает собой выпадение стадий заканчивания и освоения. Их суммарная доля в общей стоимости скважины можно ориентировочно оценить в 15-25 процентов (верхняя планка в диапазоне приведена автором для горизонтальных скважин, т.к. их среди новых объектов большинство) [11].

«Таким образом, по цепочке встают вопросы о количестве скважин, их конструкции, ожидаемых дебитах скважин и уровне добычи и — что и должно интересовать Минфин — об оценке ожидаемых бюджетных доходов». Стоит отметить, что такая оценка является максимально нетривиальной, ведь она должна учесть целый ряд факторов, к которым следует отнести и некоторые мало прогнозируемые. Так, например, часть заранее пробуренных «незавершённых» скважин в ожидании часа «икс» придётся глушить, что означает высокий риск не восстановить их первоначальную, обозначенную до глушения продуктивность. Более того, вполне ожидаемо возникнут вопросы по соблюдению требований законодательно установленных правил технической безопасности [11].

Как уже было сказано ранее, юридическая декомпозиция скважины может послужить хорошей подпоркой для нефтесервисных организаций. Однако существуют некоторые сложности и с определением нефтесервисных компаний, а именно: определённое положение нефтесервиса в качестве объекта, но не субъекта в отношениях между участниками нефтедобывающей отрасли. В правовом поле присутствует двойственность определения нефтесервиса, где в одном случае под «нефтесервисной компанией» понимается субъект в отношениях с заказчиком и государством, а в другом – объект управления со стороны государства. Данное противоречие также было обнаружено В.Н. Гнибидиным при рассмотрении оценки количества работников в компаниях «нефтесервисной направленности». Анализируя отчёты правительственной межведомственной комиссии, Министерства энергетики и Торгово-промышленной палаты РФ, было выделено расхождение в количестве работников почти в 4 раза (от 150 до 600 тыс. чел.). Так, можно сделать вывод о том, что разные органы придерживаются разных критериев оценки при выделении «объектов нефтесервисной направленности» [9]. Данный факт, несомненно, также мешает формированию единой и целой картины складывающейся ситуации на рынке нефтесервиса.

### Заключение

Таким образом, в работе были проанализированы основные предпосылки к формированию на территории РФ фонда незаконченных скважин. Необходимость реализации подобного решения обусловлена во многом стремлением к минимизации негативных эффектов заключённого соглашения о сокращении темпов отбора нефти. В работе также был рассмотрен положительный зарубежный опыт использования незаконченных скважин в условиях снижения цен на нефть на примере США в 2014-2016 гг. Кроме того, были выделены основные сложности при реализации программы «Незавершённая скважина», к которым можно отнести: отсутствие чёткого определения «незаконченной скважины» в российском правовом поле, отсутствие юридической декомпозиции скважины, а также положение нефтесервиса в качестве объекта, но не субъекта в отношениях между участниками нефтедобывающей отрасли. Преодоление данных сложностей способно благоприятно повлиять на развитие как российского НГК в целом, так и на преодоление последствий кризиса 2020 года, вызванного падением спроса на нефть ввиду пандемии.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Обзор нефтесервисного рынка России. Исследовательский центр Deloitte – 2020 [Электронный ресурс] – URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/energy-resources/Russian/oil-gas-survey-russia-2020.pdf> (дата обращения: 12.05.2021)

2. Пимонов, В. Новая сделка ОПЕК+ [Электронный ресурс] / В. Пимонов. – ТЭК России №4 – 2020. URL: [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2020/4/741/](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2020/4/741/) (дата обращения: 12.05.2021)
3. Лебедева Н. Е. Тенденции развития нефтегазового машиностроения РФ в условиях реализации политики импортозамещения / Н. Е. Лебедева // Инновации и инвестиции. – 2019. – №. 11.
4. Зуев А. Рост горизонтального бурения — технологический прорыв / А. Зуев. // ТЭК РОССИИ: ежемес. интернет-изд. 2019. №12. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2019/12/694/](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2019/12/694/) (дата обращения: 14.03.2021).
5. Доклад Александра Новака на совещании Президента РФ Владимира Путина по вопросам развития топливно-энергетического комплекса страны [Электронный ресурс] // Министерство энергетики. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/17733> (дата обращения: 14.03.2021).
6. U. S. Energy Information Administration. 2016. Estimates of Drilled but Uncompleted Wells (DUCs), Supplement report [Electronic resource] // US EIA. URL: [https://www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/duc\\_supplement.pdf](https://www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/duc_supplement.pdf) (accessed 14.03.2021).
7. U. S. Energy Information Administration. 2017. Drilling Productivity Report [Electronic resource] // US EIA. URL: <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/#tabs-summary-3> (accessed 14.03.2021).
8. Rassenfoss S. E&P Notes (November 2018) / Stephen Rassenfoss, Matt Zborowski. // Journal of Petroleum Technology. – 2019. – Vol. 71. – №. 11. – P. 22.
9. Гнибидин В.Н. Незаконченные скважины в контексте энергетической стратегии / В.Н. Гнибидин, С.В. Рудницкий // ROGTEC: Russian oil & gas technologies. – 2020. – №. 63. – С. 72-78.
10. Зозуля Г. П. Особенности добычи нефти и газа из горизонтальных скважин / Г. П. Зозуля, А. В. Кустышев, И. С. Матияшин. М.: Издательский центр «Академия». – 2009.
11. Рудницкий С. О незаконченном и незавершенном / Сергей Рудницкий // Нефть и Капитал. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://oilcapital.ru/comment/sergey-rudnitskiy/07-12-2020/sergey-rudnitskiy-o-nezakonchennom-i-nezavershyonnom> (дата обращения: 10.04.2021).

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Obzor nefteservisnogo ryinka Rossii – 2020 [Overview of the Russian oilfield services market – 2020]. Research Center Deloitte – 2020. [Electronic resource]. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/energy-resources/Russian/oil-gas-survey-russia-2020.pdf>. (accessed: 12.05.2021) [in Russian]
2. Pimonov, V. Novaya sdelka OPEC+ [New OPEC+ deal] / V. Pimonov. – TEC Rossii №4 [Fuel and Energy Complex of Russia #4] – 2020. [Electronic resource]. URL: [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2020/4/741/](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2020/4/741/). (accessed: 12.05.2021) [in Russian]
3. Lebedeva N.E. Tendentsii razvitiya neftegazovogo mashinostroyeniya RF v usloviyah realizatsii politiki importozamescheniya [Trends in the development of oil and gas engineering in the Russian Federation in the context of the implementation of the import substitution policy] / N.E. Lebedeva // Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments]. – 2019. – №. 11. [in Russian]
4. Zuyev A. Rost gorizontalnogo bureniya – tekhnologicheskii proryv [The growth of horizontal drilling — a technological breakthrough] / A. Zuyev // TEC Rossii №12 [Fuel and Energy Complex of Russia #12]. – 2019. [Electronic resource]. URL: [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2019/12/694/](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2019/12/694/). (accessed: 12.05.2021) [in Russian]
5. Doklad Aleksandra Novaka na soveshchani Prezidenta RF Vladimira Putina po voprosam razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa strany [Alexander Novak's report at the meeting of Russian President Vladimir Putin on the development of the country's fuel and energy complex] // Ministry of Power. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/17733> (accessed: 12.05.2021) [in Russian]
6. U. S. Energy Information Administration. 2016. Estimates of Drilled but Uncompleted Wells (DUCs), Supplement report [Electronic resource] // US EIA. URL: [https://www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/duc\\_supplement.pdf](https://www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/duc_supplement.pdf) (accessed 14.03.2021).
7. U. S. Energy Information Administration. 2017. Drilling Productivity Report [Electronic resource] // US EIA. URL: <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/#tabs-summary-3> (accessed 14.03.2021).
8. Rassenfoss S. E&P Notes (November 2018) / Stephen Rassenfoss, Matt Zborowski. // Journal of Petroleum Technology. – 2019. – Vol. 71. – №. 11. – P. 22.
9. Gnibidin V.N. Nezakonchenniye skvazhiny v kontekste energeticheskoy strategii [Uncompleted wells in the context of energy strategy] / V.N. Gnibidin, S.V. Rudnitskiy // ROGTEC: Russian oil & gas technologies. – 2020. – №. 63. – Pp. 72-78. [in Russian]
10. Zozulya G.P. Osobennosti dobychi nefti i gaza iz gorizontalnykh skvazhin [Features of oil and gas production from horizontal wells] / G.P. Zozulya, A.V. Kustyshev, I.S. Matiyashin. M.: Publishing center “Akademiya” – 2009 [in Russian].
11. Rudnitskiy S. O nezakonchennom i nezavershennom [About uncompleted and unfinished] / Sergey Rudnitskiy // Neft i kapital [Oil and Capital]. 2020. [Electronic resource]. URL: <https://oilcapital.ru/comment/sergey-rudnitskiy/07-12-2020/sergey-rudnitskiy-o-nezakonchennom-i-nezavershyonnom>. (accessed 14.03.2021). [in Russian]