

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Г.Ф. МОРОЗОВА»

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Материалы Всероссийской научно-методической конференции
с международным участием,
посвящённой 80-летию со дня рождения профессора В.В. Постникова,
приуроченной к 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова

Воронеж, 15 апреля 2025 г.

Воронеж 2025

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
VORONEZH STATE UNIVERSITY OF FORESTRY AND TECHNOLOGIES
NAMED AFTER G.F. MOROZOV

PHYSICAL BASIS OF SCIENCE-INTENSIVE TECHNOLOGIES
IN THE MODERN WORLD

Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference
with International Participation,
dedicated to the 80th anniversary of the birth of Professor V.V. Postnikov,
timed to the 95th anniversary of VSUFT named after G.F. Morozov

Voronezh, April 15, 2025

Voronezh 2025

Ф50 Физические основы наукоемких технологий в современном мире : материалы Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвящённой 80-летию со дня рождения профессора В. В. Постникова, приуроченной к 95-летию ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова, Воронеж, 15 апреля 2025 г. / отв. ред. Н. Ю. Евсикова, С. В. Внукова ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2025. – 343 с. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2025/fizicheskie-osnovy-naukoemkih-tehnologij-v-sovremennom-mire/> – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7994-1179-4

В сборнике представлены материалы Всероссийской научно-методической конференции с международным участием «Физические основы наукоемких технологий в современном мире», посвященной 80-летию со дня рождения профессора В.В. Постникова, приуроченной к 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, которая прошла 15 апреля 2025 года в ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Конференция проведена в целях ознакомления с результатами научно-исследовательской работы научно-педагогических работников, аспирантов и студентов вузов, обмена опытом применения законов физики и методов системного анализа и компьютерного моделирования для решения задач в научной, технической, технологической, педагогической и других сферах, рассмотрения вопросов методики преподавания естественнонаучных и общетехнических дисциплин, повышения мотивации обучающихся к углубленному изучению законов физики. Представленные статьи посвящены актуальным вопросам физики, техники и технологий, применению методов моделирования и системного анализа для решения научно-технических задач, аспектам педагогики высшей школы.

Материалы конференции предназначены для научно-педагогических работников, аспирантов и студентов вузов, широкого круга специалистов, интересующихся вопросами применения физико-математических методов для решения научно-технических задач в различных сферах деятельности.

УДК 53

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	7
Постников С.В., Камалова Н.С., Евсикова Н.Ю. К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА В. В. ПОСТНИКОВА.....	7
Камалова Н.С., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Лисицын В.И. К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТВЕРДОСТИ БИОКОМПОЗИТА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	18
Хоай Тхыонг Нгуен ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИТОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ДАВЛЕНИЯ.....	24
Иевлева Е.В., Коротков Л.Н. ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА СТРУКТУРУ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА SrTiO_3	29
Титова Л.В., Любашевский Д.Е., Ключников С.В., Кострюков П.В., ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАДИУСА ШЕЙКИ ЯДРА В ТОЧКЕ ЕГО РАЗРЫВА ...	37
Белозерцев Ю.В., Омороков Д.Б., Евсикова Н.Ю. О МЕТОДАХ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТОВ НА СИСТЕМАХ SiO_2/Si С ЗАПОЛНЕННЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ Ni И Cu ИОННЫМИ ТРЕКАМИ.....	47
Лисицын В.И., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Хворых А.М. ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ В СВЕТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ (ЛОКАЛЬНЫХ) ТАБЛИЦ ХОДА РОСТА.....	53
Лисицын В.И., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Полумиско А.А. ВЛИЯНИЕ ГЕОГРАФИИ РЕГИОНА НА КАЧЕСТВО СОСНОВОГО ДРЕВОСТОЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭКСЭРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА.....	63
Кочетова Ж.Ю., Внукова С.В., Тронин А.Л., Дубачева А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ХАОСА ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР.....	72
Зубанков А.А. ПРОЦЕССОРЫ ЭЛЬБРУС ДЛЯ НАУЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ.....	83
Стародубцев Д.Е., Горбунов В.А., Плашенков В.В. МЕТОД ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГО КОДИРОВАНИЯ.....	87
Панюшкин А.Н., Панюшкин Н.Н., Бирюкова И.П. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЧАСТОТЫ СБОЕВ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗА СПЛОШНОЙ ЗАЩИТОЙ В ФОРМЕ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА.....	91

Котляров В.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА СЕЧЕНИЯ СБОЯ МИКРОСХЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	95
Руссу А.В., Хворых А.М., Шамаев В.А. ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ.....	105
Васильев В.В., Афоничев Д.Н. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОЛИКОВОГО ТРАНСПОРТЕРА ДЛЯ СПУСКА ПЛОСКИХ СПЛОТОЧНЫХ ЕДИНИЦ В ВОДОЕМ.....	110
Четверикова И.В., Зимарин С.В. ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕСНЫХ МАШИН ДЛЯ ТРАКТОРНОЙ ТРЕЛЕВКИ.....	120
Панченко С.Л., Толстов С.А. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООТДАЧИ В ТРУБАХ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВОМАСЛЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА.....	127
Толстов С.А., Панченко С.Л., Толстова А.С., Набатов Д.Р., Трощенко Р.В. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДВС С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВО-ВОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ.....	136
Секция 2. ТЕХНОЛОГИИ. НАУКА. МОЛОДЕЖЬ.....	142
Полумиско А.А., Евсиков И.Д., Попиков В.П. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ ЛЕСНОГО ГИДРОМАНИПУЛЯТОРА С МАГНИТНЫМ ДЕМПФИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ....	142
Хворых А.М. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ....	150
Рыжков В.В., Кожевников А.Е., Кольцова А.В. ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ.....	156
Моргачева В.С. МЕТОДИКА СВЧ-РАДИОМЕТРИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ.....	164
Петрищев К.О., Асеева А.А., Кургалин С.Д., Борзунов С.В., Гончарова Н.Ю., Кирьянова А.А. ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА КОМБИНИРОВАННЫХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ.....	172
Иванов Н.А., Киселев А.М. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КОЛОРИРОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ.....	181

Смирнова М.П., Буринская А.А., Кудрявцева Е.В., Амарантов С.В. НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ L-ЛИЗИНА: СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОТИВОГРИБКОВАЯ АКТИВНОСТЬ.....	188
Шарапова А.А., Буринская А.А. СИНТЕЗ СТАБИЛЬНЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СРЕДЫ.....	202
Роднин А.В., Горбунов В.А. СРАВНЕНИЕ АРХИТЕКТУР НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ...	209
Горбунов В.А., Кочкин Д.В., Панкратов Д.В. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЛУЧАТЕЛЕЙ ГОСУДАРСТВЕННЫХ УСЛУГ ИЗ ЧИСЛА МАЛОМОБИЛЬНЫХ ГРУПП НАСЕЛЕНИЯ.....	215
Горбунов В.А., Кочкин Д.В., Самойлов М.А. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ В ВЕБ- СЕРВИСЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ ОНЛАЙН-ДОСКИ.....	222
Горбунов В.А., Кочкин Д.В., Сорокин Д.О. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ API ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ.....	230
Макаровский М.А., Швецов А.Н. АРХИТЕКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕМОНТАМИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	237
Чекавинский А.А., Виноградова А.П., Софронов А.Д., Десятова А.А. АНАЛИЗ НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ.....	245
Мамонтов О.В., Ягодкин А.С., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	249
Федорова О.А., Савенко Е.С. ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ, ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАРОК РЕАГЕНТОВ.....	257
Федорова О.А., Федоров Д.М., Савенко Е.С. РАСЧЁТ ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ УСТАНОВКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО КОНТУРА ОХЛАЖДЕНИЯ АЭС.....	263

Ткачев В.В., Бородин Н.А., Князев А.В., Доманин К.А. К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕПАРИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ СЕМЯН НА РЕШЕТАХ.....	271
Мещерякова А.А. СИМУЛЯЦИЯ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСОПИЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ.....	276
Шамков Е.Ю., Кабанцов В.Д., Самодуров И.А., Яцюта Р.Д., Камалова Н.С. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ.....	282
Повалюхин Д.В., Иванов Д.А., Скрыльников Н.В., Камалова Н.С., Евсикова Н.Ю. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.....	287
Секция 3. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	293
Сушко Т.И., Кожемякин А.Е., Майорова Т.Л., Хухрянская Е.С. ПРОЕКТНОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ КАК ОСНОВА ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ АВИАЦИОННОГО ВУЗА.....	293
Громова Е.М., Беркутова Д.И., Горшкова Т.А., Веселовская Ю.А., Сидорова Н.В. ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОПАРКОВ В РЕАЛИЗАЦИИ STEM-ОБРАЗОВАНИЯ.....	300
Бирюкова И.П., Саврасова Н.А. НАУЧНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ОБУЧЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ.....	306
Бирюкова И.П., Саврасова Н.А. ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ В ФОРМЕ ТЕСТИРОВАНИЯ В РАМКАХ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА.....	310
Платонова М.А., Платонов А.А. ФОРМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ СВЯЗЕЙ В РАМКАХ ПРЕПОДАВАНИЯ ОБЩЕПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН.....	316
Камалова Н.С., Евсикова Н.Ю., Агафонова М.В. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ.....	322
Фесикова О.В., Мазур А.А. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЛИЧНОСТЬ.....	328
Фесикова О.В., Матвиец П.В. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ.....	333
Филиппова А.В., Фесикова О.В. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ.....	338

Секция 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

DOI: 10.58168/PHBSc-IT2025_7-17

УДК 929

К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА В. В. ПОСТНИКОВА

ON THE 80TH ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF PROFESSOR V. V. POSTNIKOV

Постников С.В., кандидат физико-математических наук, Воронеж, Россия

Postnikov S.V., PhD in Physics and Mathematics, Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Публикация посвящена памяти доктора физико-математических наук, профессора Валерия Валентиновича Постникова (1945-2020 гг.). Описаны основные этапы жизни, направления научной работы и общественная деятельность ученого.

Ключевые слова: направления научных исследований, модификация древесины, общественная деятельность.

Abstract. The publication has dedicated to the memory of Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor Valery Valentinovich Postnikov (1945-2020). The main stages of life, areas of scientific work and social activities of the scientist have described.

Keywords: areas of scientific research, wood modification, social activities.

В 2025 г. исполнилось 80 лет со дня рождения Валерия Валентиновича Постникова, доктора физико-математических наук, профессора, почётного работника высшего профессионального образования Российской Федерации, профессора кафедры общей и прикладной физики Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (ВГЛТУ). Более 40 лет жизнь этого талантливого учёного, опытного педагога и замечательного человека была связана с ВГЛТУ [1].

Валерий Валентинович Постников родился 20 января 1945 года в городе Ростове-на-Дону. Его отец, Валентин Семёнович Постников, 1915 г. рождения, участник Великой Отечественной войны, с 1945 по 1949 г. руководил спецсвязью Ростова-на-Дону, с 1949 по



Валерий Валентинович
Постников
(1945 – 2020)

1952 г. учился в аспирантуре Московского института стали [2, 3]. Мать, Постникова Тамара Николаевна, 1923 г. рождения, была домохозяйкой. В сентябре 1952 года Валерий Валентинович пошёл в школу в г. Кемерово, куда заведующим кафедрой физики горного института после успешной защиты кандидатской диссертации Министерство высшего образования направило Валентина Семёновича. В 1960 году отец Постникова В.В. защитил докторскую диссертацию по специальности «Физика твердого тела», и семья переехала в Воронеж, где он сначала работал заведующим кафедрой физики Воронежского технологического института (ВТИ), а в 1962 г. был назначен на должность ректора Воронежского политехнического института (ВПИ), где стал основателем

передовой научной школы мирового уровня – школы релаксационных исследований в твёрдых телах [4]. В Воронеже Валерий Валентинович Постников учился в школе №28, по окончании которой в 1963 г. поступил в Воронежский политехнический институт на физико-технический факультет (ФТФ). В 1968 году с отличием окончил полный курс названного института по специальности «Физика металлов», решением экзаменационной комиссии ему присвоена квалификация «Инженер-металлофизик-металлург», решением Учёного Совета физико-технического факультета оставлен в аспирантуре по специальности «Физика твердого тела». 20 октября 1971 г. успешно защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук [5].

С сентября 1971 года Валерий Валентинович работал на кафедре физики металлов Воронежского политехнического института преподавателем, с февраля 1972 года – старшим преподавателем, с января 1975 года по декабрь 1978 года – доцентом. За время педагогической деятельности в ВПИ В.В. Постниковым были подготовлены лекции и лабораторный практикум по курсам: «Физика низких температур», «Материалы электронной техники», «Техника физического эксперимента». В характеристике с места работы отмечено качество читаемых В.В. Постниковым лекций, их высокий физико-математический и научный уровень. Учёное звание доцента по кафедре физики металлов присвоено решением Высшей аттестационной комиссии при Совете Министров СССР от 22 декабря 1976 года.

С 1971 по 1978 годы В.В. Постников руководил криогенной лабораторией ВПИ, которая выполняла большой объём госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ (НИР) по изучению сверхпроводимости тонких плёнок. Необходимо отметить, что исследования в области низкотемпературной сверхпроводимости материалов находились на самом пике физической науки 70-80-х гг. прошлого века. Результаты НИР были опубликованы в материалах международных конференций [6], в отечественных и зарубежных журналах: «Физика и химия обработки материалов» [7-9], «Физика металлов и металловедение» [10], «Physica Status Solidi» [11-13], «Физика твердого тела» [14].

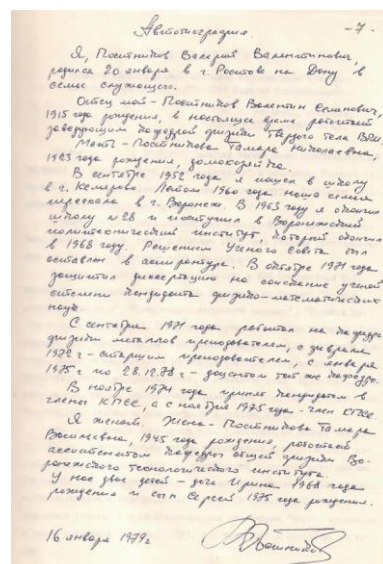
Помимо научно-педагогической В.В. Постников вел большую общественную работу в ВПИ. Был куратором студенческих групп, руководителем физического семинара физико-



В. С. Постников
(1915 – 1988)



В. В. Постников в 1979 г.



Страница из личного дела
В. В. Постникова
с автобиографией
(архив ВГЛТУ)

технического факультета, главным редактором институтской радиогазеты (с 1975 г.), членом методического Совета ФТФ, членом Совета по усилению физико-математической подготовки студентов, председателем общества охраны памятников истории и культуры (на ФТФ). В ноябре 1974 года принят кандидатом в члены КПСС, с ноября 1975 года – член КПСС. Научно-педагогическая и общественная деятельность Постникова В.В. неоднократно отмечалась благодарностями, в апреле 1976 года за образцовое выполнение служебных обязанностей ректорат ВПИ наградил его Почётной грамотой, в декабре 1978 года за активное участие в пропаганде памятников истории и культуры ему вручена Почётная грамота городского отделения Всероссийского общества охраны памятников истории и культуры.

В январе 1979 г. Постников Валерий Валентинович переходит работать на кафедру физики факультета технологии деревообработки (ТДО) Воронежского лесотехнического института (ВЛТИ). В течение первого года работы в ВЛТИ он успешно осваивает лекционный курс и лабораторный практикум по общей физике, активно включается в общественную жизнь кафедры и вуза. Общительность, уважительное отношение к коллегам, обязательность выполнения любого поручения позволили ему в короткий срок приобрести авторитет среди сотрудников кафедры и студентов. Значимыми для кафедры физики плодами методической работы доцента Постникова В.В. в 1980-е гг. стали лекционная демонстрация по магнитному взаимодействию токов, установки с методическими указаниями к выполнению лабораторных работ «Определение изменения энтропии при плавлении твёрдого тела», «Изучение электрических характеристик полупроводникового диода» и «Изучение электрических характеристик биполярного транзистора», которые не потеряли своей значимости и в современном физическом практикуме кафедры общей и прикладной физики ВГЛТУ [15, 16]. Общее количество учебно-методических изданий, в подготовке которых к публикации в соавторстве с коллегами принимал активное участие В.В. Постников за время своей работы в ВГЛТУ с 1979 по 2020 г., составляет 49 единиц.

Научно-исследовательскую работу в 1980-е гг. В.В. Постников ведёт по двум направлениям: 1) «Исследование электрических и магнитных свойств некоторых тонкоплёночных неравновесных систем»; 2) «Исследование некоторых характеристик фильтровальных тканей, применяемых для очистки аспирационного воздуха деревообрабатывающих предприятий». Первая тема была продолжением предыдущей научной работы учёного, проводилась при специализированной лаборатории кафедры физики ВТИ. Над второй темой, связанной со спецификой факультета ТДО, работа велась совместно с ассистентом кафедры древесиноведения ВЛТИ А.М. Голубевым. По первой теме разработаны и изготовлены лабораторные установки: высоковакуумная установка с безмасляной откачкой для получения образцов; электронный испаритель для испарения и конденсации химически активных элементов; система испарения «квазизамкнутый объём» для приготовления плёночных образцов двухкомпонентных систем типа Cd-S; криостат для исследования в температурном интервале 77-300 К; система для измерения электрических свойств плёнок; система для измерения магнитной восприимчивости плёнок. Результаты НИР опубликованы в работах [17, 18]. По второй теме проведены исследования гидравлического сопротивления тканей, применяемых для очистки воздуха от древесной пыли, результаты опубликованы в «Лесном журнале» [19-21].

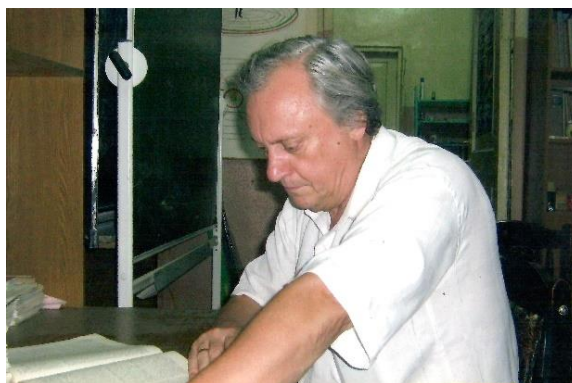
Направлением научной работы В.В. Постникова с начала 1990-х годов стало изучение явлений в диэлектрических материалах под действием физических полей различной природы. Вместе с доцентами кафедры физики Н.Н. Матвеевым и В.В. Саушкиным исследовались поляризационные явления в кристаллизующихся полимерах и высокомолекулярном композите природного происхождения – древесине. Результаты этой работы опубликованы в материалах конференций различного уровня, статьях [22, 23] и систематизированы в монографии [24].



Коллектив кафедры физики ВЛТИ в 1980-е гг.
В.В. Постников – первый слева в верхнем ряду



Профессор В.В. Постников на лекции



Профессор В.В. Постников в лаборатории

Спектр общественной работы В.В. Постникова в 1980-1990-е гг. необыкновенно широк. В 1979-1981 гг. он возглавлял Совет молодых учёных ВЛТИ, был членом Совета молодых учёных при райкоме ВЛКСМ Центрального района города Воронежа, членом Президиума Совета молодых учёных при обкоме ВЛКСМ Воронежской области, в 1980 г. награждён обкомом ВЛКСМ денежной премией за активную работу Совета молодых ученых ВЛТИ. В 1981-84 гг. руководил семинаром ВЛТИ «Философские проблемы естествознания». С 1979 по 1984 г. по линии общества «Знание» прочитал 12 лекций по актуальным проблемам физики для школьников города и работников предприятий. В 1985-1989 гг. являлся членом Методического совета вуза по усилению физико-математической подготовки студентов. Был членом партбюро факультета ТДО (в разные годы отвечал за сектор научных исследований, общественный сектор, сектор культмассовой и спортивной работы) и членом Профсоюзного комитета вуза. Являлся общественным тренером сборных команд сотрудников и студентов ВЛТИ по настольному теннису, участвовал в межфакультетских и межвузовских соревнованиях, несколько раз с успехом защищал честь института в спартакиадах «Дружба» лесотехнических и технологических вузов СССР. Был куратором студенческих групп, дежурил в общежитиях, занимался профориентационной работой со школьниками города и области, участвовал в рейдах Добровольной народной дружины по охране общественного правопорядка, выезжал со студентами на сельскохозяйственные работы, работал на строительстве воронежского кукольного театра.

Научно-исследовательская работа В.В. Постникова с начала 2000-х гг. посвящена изучению влияния слабых магнитных полей на фазовые превращения в диамагнитных материалах. Основные результаты проведённых исследований влияния воздействия слабых импульсных магнитных полей на фазовые переходы в диамагнитных полупроводниковых и сегнетоэлектрических кристаллах и кристаллизующихся полимерах были получены впервые. Обнаруженные закономерности показали, что слабые магнитные поля можно применять для модификации свойств диамагнитных материалов. Опубликованные результаты исследований (см., например, [25-27]) легли в основу докторской диссертации, для завершения работы над которой с февраля 2002 года по июнь 2003 года В.В. Постников был переведён на должность научного сотрудника. Защита диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» по теме «Фазовые и структурные превращения в диамагнитных материалах после воздействия

слабых магнитных полей» состоялась 21 сентября 2004 года на заседании диссертационного совета Д 212.037.06 Воронежского государственного технического университета [28].

В последующие годы внимание учёного было обращено на исследование физических свойств модифицированной древесины после воздействия слабых импульсных магнитных полей и ультразвука. Работа велась в творческом сотрудничестве с профессором кафедры древесиноведения В.А. Шамаевым. Материалы исследования докладывались и обсуждались на научных конференциях всероссийского и международного уровней, публиковались в рецензируемых журналах [29-31], был получен патент на способ модифицирования древесины [32]. По результатам научных исследований под руководством В.В. Постникова в 2008 и 2011 гг. были защищены две диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»: ассистентом Н.С. Камаловой – по теме «Влияние слабых импульсных магнитных полей на механические и адсорбционные свойства модифицированной древесины» [33] и соискателем С.В. Кальченко – по теме «Воздействие ультразвука и импульсного магнитного поля на высокомолекулярный биоккомпозит» [34]. Основы физики модифицирования древесины изложены в опубликованной профессором В.В. Постниковым и доцентом Н.С. Камаловой в 2019 г. монографии [35]. Учёное звание профессора по кафедре общей и прикладной физики присвоено В.В. Постникову приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 ноября 2012 г.

В 2002 г. учёный был награждён Почётной медалью им. А.С. Попова «За заслуги в деле изобретательства» в области модификации материалов в магнитных полях. За заслуги в области образования В.В. Постникову Приказом Минобрнауки России от 26 августа 2010 г. присвоено звание «Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Валерия Валентиновича Постникова не стало 6 июня 2020 г. Работы по исследованию воздействия слабых магнитных полей и ультразвука на древесину и композиционные материалы на её основе продолжают в ВГЛТУ и сегодня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механический факультет ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова: история и современность / А.А. Аксенов, Л.В. Брындина, И.М. Бартенев, П.И. Попиков, В.К. Зольников, Н.Ю. Евсикова, Б.М. Кумицкий, А.А. Грибанов // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 4 (40). – С. 5-22.
2. Иевлев, В.М. К 100-летию В.С. Постникова / В.М. Иевлев // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №3 (167). – С. 11-12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-100-letiyu-v-s-postnikova>.
3. Карпачева, Н. Валентин Семёнович Постников (1915-1988) / Н. Карпачева // Воронежцы: известные люди в истории края / ред.-сост. Ю.Л. Полевой. – Воронеж: Кварта, 2011. – С. 54-56.
4. Щетинин, А.А. Кафедре «Материаловедение и Физика металлов» 50 лет / А.А. Щетинин // Вестник ВГТУ. – 2012. – №11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kafedre-materialovedenie-i-fizika-metallov-50-let>.

5. Постников, В.В. О сверхпроводимости тонких плёнок свинца, висмута и двухслойных «сэндвичей» висмут-свинец: дис. канд. физ.-мат. наук / В.В. Постников. – Воронеж: ВПИ, 1971. – 117 с.
6. Постников, В.С. Dunne supraleitende Schichten / V.S. Postnikov, G.E. Schunin, V.V. Postnikov // Reinstoffe in Wissenschaft und Technik: 4 int. symp. – Berlin, 1977. – P. 535-553.
7. Постников, В.В. О сверхпроводимости двухслойных плёнок Bi-Pb / В.В. Постников, И.В. Золотухин // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – Т. 2. – С. 155-157.
8. Постников, В.С. О повышении температуры сверхпроводящего перехода в плёночных образцах сплавов Nb-Ge / В.С. Постников, В.В. Постников, В.С. Железный // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – Т. 5. – С. 172-173.
9. Постников, В.С. Метастабильность и сверхпроводимость в тонких плёнках / В.С. Постников, В.В. Постников, В.М. Фёдоров // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – Т. 5. – С. 69-82.
10. Постников, В.В. О сверхпроводимости тонких плёнок свинца / В.В. Постников, И.В. Золотухин // Физика металлов и металловедение. – 1972. – Т. 34, № 5. – С. 1096-1098.
11. Постников, В.С. Superconductivity in Mo-Re System Alloy Films Produced by Electron Beam Evaporation in High Vacuum / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.S. Zeleznii // Physica status solidi (A). Applied research. – 1977. – Vol. 39. – P. 21-23.
12. Постников, В.С. Instability and Superconductivity in Pd-Ag-D and Pb-H system / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.M. Fedorov // Physica status solidi. – 1978. – Vol. 85. – P. 115-117.
13. Постников, В.С. Metastability and superconductivity in thin films / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V. M. Fedorov // Physica status solidi. – 1978. – Vol. 87. – P. 11-22.
14. Постников, В.С. Сверхпроводимость и фоновое размягчение в системе палладий-водород / В.С. Постников, В.В. Постников, В.М. Фёдоров // Физика твердого тела. – 1978. – Т. 20, вып. 11. – С. 3442-3444.
15. Физика: лаб. практикум: в 2 ч. Ч. 1 / Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, В.И. Лисицын, Н.Н. Матвеев, В.В. Постников, В.В. Саушкин; М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова». – Воронеж, 2018. – 199 с.
16. Физика: лаб. практикум: в 2 ч. Ч. 2 / Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, В.И. Лисицын, Н.Н. Матвеев, В.В. Постников, В.В. Саушкин; М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова». – Воронеж, 2018. – 270 с.
17. Постников, В.С. Superconductivity and Phonon Softening in Instable Systems / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.M. Fedorov // Physica status solidi. – 1979. – Vol. (b) 92. – P. 347-351.
18. Постников, В.В. Об электрических и магнитных свойствах плёночных образцов сульфида кадмия, полученных вакуумной конденсацией в квазизамкнутом объеме / В.В. Постников, А.В. Буданов, И.П. Казанин // Физико-химические основы надежности микроэлектронных структур: межвуз. сб. науч. тр. / ВПИ. – Воронеж, 1987. – С. 58-60.

19. Голубев, А.М. Гидравлическое сопротивление некоторых фильтровальных тканей для очистки аспирационного воздуха / А.М. Голубев, В.В. Постников // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1984. – № 5. – С. 119-121.
20. Голубев, А.М. Об эффективности фильтрации аспирационного воздуха деревообрабатывающих предприятий / А.М. Голубев, В.В. Постников // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1987. – № 5. – С. 75-78.
21. Голубев, А.М. Об эффективности фильтрации аспирационного воздуха / А.М. Голубев, В.В. Постников // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1988. – № 2. – С. 131-133.
22. Матвеев, Н.Н. Identification of Crystal-crystal Transition in Cellulose Using Pyroelectric Currents / N.N. Matveev, V.V. Postnikov // Ferroelectrics. – 1994. – Vol. 153, № 1. – P. 341-346.
23. Термополяризационные свойства древесины березы / Н.Н. Матвеев, В.В. Постников, В.В. Саушкин, В.В. Мордвинов // Пластические массы. – 1995. – № 1. – С. 19-20.
24. Матвеев, Н.Н. Поляризационные эффекты в кристаллизующихся полимерах: монография / Н.Н. Матвеев, В.В. Постников, В.В. Саушкин. – Воронеж, 2000. – 170 с.
25. Постников, В.В. Влияние импульсного магнитного поля на кинетику кристаллизации и плавления органосилоксанов / В.В. Постников, Н.Н. Матвеев, М.Н. Левин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Сер. Материаловедение. – 2001. – Вып. 1.9. – С. 19-23.
26. Структурные превращения в твёрдых растворах Sb-As при воздействии импульсного магнитного поля / В.В. Постников, М.Н. Левин, Г.В. Семенова, Т.П. Сушкова, Э.А. Долгополова // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2002. – Т. 4, № 4. – С. 326-332.
27. Левин, М.Н. Selective Effect of Weak Magnetic Field on Triglycine Sulfate Crystal / M.N. Levin, V.V. Postnikov, M.Y. Palagin // Ferroelectrics. – 2003. – Vol. 285. – P. 173-178.
28. Постников, В.В. Фазовые и структурные превращения в диамагнитных материалах после воздействия слабых магнитных полей: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / В.В. Постников; Воронеж. гос. техн. ун-т. – Воронеж, 2004. – 338 с.
29. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на модифицированную древесину / В.В. Постников, М.Н. Левин, Н.Н. Матвеев, Р.В. Скориданов, Н.С. Камалова, В.А. Шамаев // Письма в журнал технической физики. – 2005. – Т. 31, вып. 9. – С. 14-19.
30. Шамаев, В.А. Получение модифицированной древесины с высокими прочностными свойствами / В.А. Шамаев, Р.В. Скориданов, В.В. Постников // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2006. – № 4. – С. 78-89.
31. Постников, В.В. Ультразвуковая пластификация лигнина в модифицированной древесине / В.В. Постников, Н.С. Камалова, С.В. Кальченко // Известия РАН. Серия физическая. – 2010. – Т. 74, № 9. – С. 1375-1376.
32. Пат. 2340443 РФ, МПК В27К 5/06, В27М 1/08. Способ получения модифицированной древесины / В.А. Шамаев, С.А. Бурлов, В.В. Постников, Н.А. Трубников, О.А. Калинина, М.Н. Левин; заявитель и патентообладатель ООО «Лигнум». – № 2006117652/04; заявл. 22.05.2006; опубл. 10.12.2008. – 2008.

33. Камалова, Н.С. Влияние слабых импульсных магнитных полей на механические и адсорбционные свойства модифицированной древесины: специальность 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук / Камалова Нина Сергеевна. – Воронеж, 2008. – 145 с.

34. Кальченко, С.В. Воздействие ультразвука и импульсного магнитного поля на высокомолекулярный биоккомпозит: специальность 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук / Кальченко Сергей Владимирович. – Воронеж, 2011. – 120 с.

35. Камалова, Н.С. Физические основы модифицирования древесины / Н.С. Камалова, В.В. Постников. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2019. – 164 с.

REFERENCES

1. The Mechanical Faculty of VSUFT named after G.F. Morozov: history and modernity / A.A. Aksenov, L.V. Bryndina, I.M. Bartenev, P.I. Popikov, V.K. Zolnikov, N.Yu. Evsikova, B.M. Kumitsky, A.A. Gribanov // Forestry journal. – 2020. – Vol. 10, № 4 (40). – P. 5-22 (in Russian).

2. Ievlev, V.M. On the 100th anniversary of V.S. Postnikov / V.M. Ievlev // Alternative energy and ecology. – 2015. – No. 3 (167). – P. 11-12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-100-letiyu-v-s-postnikova>.

3. Karpacheva, N. Valentin Semenovich Postnikov (1915-1988) / N. Karpacheva // Voronezh residents: famous people in the history of the region / ed. and compiled by Yu.L. Polevoy. – Voronezh: Kvarta, 2011. – P. 54-56.

4. Shchetinin, A. A. The Department of Materials Science and Physics of Metals is 50 years old / A. A. Shchetinin // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2012. – Vol. 8, No. 11. – P. 4-8.

5. Postnikov, V.V. On superconductivity of thin films of lead, bismuth and two-layer "sandwiches" bismuth-lead: dis. ... Cand. of Physical and Mathematical Sciences / V.V. Postnikov. – Voronezh: VPI, 1971. – 117 p.

6. Postnikov, V.S. Dunne supraleitende Schichten / V.S. Postnikov, G.E. Schunin, V.V. Postnikov // Reinstoffe in Wissenschaft und Technik : 4 int. symp. – Berlin, 1977. – P. 535-553.

7. Postnikov, V.V. On superconductivity of two-layer Bi-Pb films / V.V. Postnikov, I.V. Zolotukhin // Physics and chemistry of materials processing. – 1972. – Vol. 2. – P. 155-157.

8. Postnikov, V.S. On the increase in the superconducting transition temperature in film samples of Nb-Ge alloys / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.S. Zhelezny // Physics and Chemistry of Materials Processing. – 1977. – Vol. 5. – P. 172-173.

9. Postnikov, V.S. Metastability and superconductivity in thin films / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.M. Fedorov // Physics and chemistry of materials processing. – 1977. – Vol. 5. – P. 69-82.

10. Postnikov, V.V. On superconductivity of thin lead films / V.V. Postnikov, I.V. Zolotukhin // Physics of Metals and Metal Science. – 1972. – Vol. 34, No. 5. – P. 1096-1098.

11. Postnikov, V.S. Superconductivity in Mo-Re System Alloy Films Produced by Electron Beam Evaporation in High Vacuum / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.S. Zeleznii // *Physica status solidi (A)*. Applied research. – 1977. – Vol. 39. – P. 21-23.
12. Postnikov, V.S. Instability and Superconductivity in Pd-Ag-D and Pb-H system / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.M. Fedorov // *Physica status solidi*. – 1978. – Vol. 85. – P. 115-117.
13. Postnikov, V.S. Metastability and superconductivity in thin films / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V. M. Fedorov // *Physica status solidi*. – 1978. – Vol. 87. – P. 11-22.
14. Postnikov, V.S. Superconductivity and phonon softening in the palladium-hydrogen system / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.M. Fedorov // *Soviet Physics, Solid State*. – 1978. – Vol. 20, No. 11. – P. 1987-1988.
15. Physics: lab. practical course: in 2 parts. Part 1 / N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, V.I. Lisitsyn, N.N. Matveev, V.V. Postnikov, V.V. Saushkin; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal state budget educational institution of higher education "Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov". – Voronezh, 2018. – 199 p.
16. Physics: lab. practical training: in 2 parts. Part 2 / N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, V.I. Lisitsyn, N.N. Matveev, V.V. Postnikov, V.V. Saushkin; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal state budget educational institution of higher education "Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov". – Voronezh, 2018. – 270 p.
17. Postnikov, V.S. Superconductivity and Phonon Softening in Instable Systems / V.S. Postnikov, V.V. Postnikov, V.M. Fedorov // *Physica status solidi*. – 1979. – Vol. (b) 92. – P. 347-351.
18. Postnikov, V.V. On the electrical and magnetic properties of film samples of cadmium sulfide obtained by vacuum condensation in a quasi-closed volume / V.V. Postnikov, A.V. Budanov, I.P. Kazanin // *Physicochemical foundations of the reliability of microelectronic structures: inter-university. collection of scientific papers / VPI*. – Voronezh, 1987. – P. 58-60.
19. Golubev, A.M. Hydraulic resistance of some filter fabrics for cleaning aspiration air / A.M. Golubev, V.V. Postnikov // *News of higher educational institutions. Forestry magazine*. – 1984. – No. 5. – P. 119-121.
20. Golubev, A.M. On the efficiency of filtering aspiration air of woodworking enterprises / A.M. Golubev, V.V. Postnikov // *News of higher educational institutions. Forestry magazine*. – 1987. – No. 5. – P. 75-78.
21. Golubev, A.M. On the efficiency of filtering aspiration air / A.M. Golubev, V.V. Postnikov // *News of higher educational institutions. Forestry magazine*. – 1988. – No. 2. – P. 131-133.
22. Matveev, N.N. Identification of Crystal-crystal Transition in Cellulose Using Pyroelectric Currents / N.N. Matveev, V.V. Postnikov // *Ferroelectrics*. – 1994. – Vol. 153, № 1. – P. 341-346.
23. Thermal polarization properties of birch wood / N.N. Matveev, V.V. Postnikov, V.V. Saushkin, V.V. Mordvinov // *Plastics*. – 1995. – No. 1. – P. 19-20.
24. Matveev, N.N. Polarization effects in crystallizing polymers: monograph / N.N. Matveev, V.V. Postnikov, V.V. Saushkin. – Voronezh, 2000. – 170 p.

25. Postnikov, V.V. Effect of pulsed magnetic field on the kinetics of crystallization and melting of organosiloxanes / V.V. Postnikov, N.N. Matveev, M.N. Levin // Bulletin of the Voronezh State Technical University. Series: Materials Science. – 2001. – Iss. 1.9. – P. 19-23.
26. Structural transformations in Sb-As solid solutions under the influence of a pulsed magnetic field / V.V. Postnikov, M.N. Levin, G.V. Semenova, T.P. Sushkova, E.A. Dolgoplova // Condensed media and interphase boundaries. – 2002. – Vol. 4, No. 4. – P. 326-332.
27. Levin, M.N. Selective Effect of Weak Magnetic Field on Triglycine Sulfate Crystal / M.N. Levin, V.V. Postnikov, M.Y. Palagin // Ferroelectrics. – 2003. – Vol. 285. – P. 173-178.
28. Postnikov, V.V. Phase and structural transformations in diamagnetic materials after exposure to weak magnetic fields: dis. ... Dr. of Phys. and Mathematics: 01.04.07 / V.V. Postnikov; Voronezh. state tech. univ. – Voronezh, 2004. – 338 p.
29. The Effect of Weak Pulsed Magnetic Fields on Modified Wood / V.V. Postnikov, M.N. Levin, R.V. Skoridanov, N.S. Kamalova, V.A. Shamaev, N.N. Matveev // Technical Physics Letters. – 2005. – Vol. 31, No. 5. – P. 364-366.
30. Shamaev, V.A. Producing Modified Timber with High Strength Properties Method of trilateral pressing allowing to produce modified timber with high physico-mechanical properties is developed / R.V. Skoridanov, V.V. Postnikov // Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). – 2006. – No. 4. – P. 78-89.
31. Postnikov, V.V. Ultrasonic plasticization of lignin in modified wood / V.V. Postnikov, N.S. Kamalova, S.V. Kalchenko // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2010. – Vol. 74, No. 9. – P. 1319-1320.
32. Patent 2340443 RF, IPC B27K 5/06, B27M 1/08. Method for producing modified wood / V.A. Shamaev, S.A. Burlov, V.V. Postnikov, N.A. Trubnikov, O.A. Kalinina, M.N. Levin; applicant and patent holder Lignum LLC. – No. 2006117652/04; declared 22.05.2006; published 10.12.2008. – 2008.
33. Kamalova, N.S. Influence of weak pulsed magnetic fields on mechanical and adsorption properties of modified wood: specialty 01.04.07 "Physics of condensed matter": dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences / Kamalova Nina Sergeevna. – Voronezh, 2008. – 145 p.
34. Kalchenko, S.V. Effect of ultrasound and pulsed magnetic field on high-molecular biocomposite: specialty 01.04.07 "Physics of condensed matter": dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences / Kalchenko Sergey Vladimirovich. – Voronezh, 2011. – 120 p.
35. Kamalova, N.S. Physical principles of wood modification / N.S. Kamalova, V.V. Postnikov. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2019. – 164 p.

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТВЕРДОСТИ БИОКОМПОЗИТА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

ON THE QUESTION OF ASSESSING THE CHANGES IN THE BIOCOMPOSITE HARDNESS
AFTER EXPOSURE TO A PULSED MAGNETIC FIELD

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Матвеев Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Matveev N.N., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Лисицын В.И., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Lisitsyn V.I., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье приводятся данные экспериментов по исследованию влияния импульсного магнитного поля на торцевую твёрдость образцов модифицированной уплотнённой древесины берёзы. Качественный анализ результатов многочисленных измерений позволяет с достаточной уверенностью утверждать, что в лингоуглеводной матрице модифицированной древесины импульсами магнитного поля стимулируются процессы, которые целесообразно моделировать в рамках классической термодинамики.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, торцевая твёрдость древесины, лингоуглеводная матрица, надмолекулярная структура древесины.

Abstract. The article presents data from experiments on the study of the effect of a pulsed magnetic field on the end hardness of samples of modified compacted birch wood. A qualitative analysis of the results of numerous measurements allows us to state with sufficient confidence that in the lignocarbhydrate matrix of modified wood, magnetic field pulses stimulate processes that are appropriate to model within the framework of classical thermodynamics.

Keywords: pulsed magnetic field, end grain hardness of wood, lignocarbohydrate matrix, supramolecular structure of wood.

Современный рынок деталей для поддержания вращающихся компонентов механизмов представлен широким ассортиментом втулок и подшипников скольжения, изготовленных из различных материалов. Наибольшей износостойкостью отличаются детали, выполненные из цветных и чёрных металлов (чугун, бронза, баббит и др.) [1-3]. Однако, при использовании в узлах трения различных механизмов металлические подшипники довольно быстро изнашиваются. Поэтому в современном физическом материаловедении остается актуальной задача расширения сферы сравнительно дешёвых неметаллических материалов, способных эффективно заменить активно используемые дорогостоящие металлические аналоги [3, 4]. Как показывает практика, в качестве такого материала целесообразно рассматривать уплотнённую древесину, поскольку неоспоримым преимуществом последней, по сравнению с другими конструкционными материалами, является постоянное возобновление её запасов [3, 4]. Особенно это выгодно для нашей страны, значительная часть которой покрыта лесами. Природная древесина отличается малой плотностью, относительно высокой прочностью и жёсткостью и вместе с тем лёгкой, по сравнению с другими материалами, обрабатываемостью. Для изменения её механических свойств в соответствии с целями эксплуатации выполненных из неё изделий довольно давно разработаны различные способы обработки: уплотнение, пропитка, сушка, облучение и их различные комбинации. Кроме того, использование древесины вместо металлических материалов позволяет существенно снизить стоимость деталей, что в любое время будет восприниматься как существенное преимущество. В настоящий момент наибольший интерес вызывают физические способы обработки природной и модифицированной древесины. Одна из таких технологий – обработка импульсным магнитным полем. Однако, структура древесины, по сравнению с металлами, является слабо упорядоченной. Из всех её составляющих лишь целлюлоза обладает частичной кристалличностью [6, 7]. Поэтому выявление механизма изменений надмолекулярной структуры этого сложного композита природного происхождения крайне затруднено.

Цель данной работы – провести анализ экспериментальных данных об изменении торцевой твёрдости модифицированной древесины берёзы после обработки импульсным магнитным полем и сформулировать вербальную модель механизма формирования новой надмолекулярной структуры её лингоуглеводной матрицы, обуславливающей эти изменения.

На рисунке 1а представлен фрагмент поперечного среза типичного образца так называемой неделовой древесины берёзы, которая после модифицирования часто используется для изготовления подшипников скольжения [1, 2]. Легко заметить годовичные слои, сосуды, повышающие сопротивляемость упругому деформированию в радиальном направлении по сравнению с тангенциальным, сердцевинные лучи и состоящий из клеток и придающий ей прочность и твёрдость либриформ [6, 7]. Таким образом, уникальность механических свойств древесины во многом определяется сложностью её микроструктуры. Исследования воздействия на химический состав, структуру и свойства древесины оснований, кислот, окислителей и агрессивных физических факторов (например, радиации) позволяют моделировать её строение как лингоуглеводную матрицу, представляющую из себя

взаимопроникновение сеток углеводов и лигнина (см. Рис. 1б и 1в) [8]. Таким образом, сложно представить надмолекулярную структуру древесины некоей моделью, подобно кристаллической решетке металлов. Это сильно затрудняет процесс выявления механизмов влияния на неё импульсного магнитного поля.

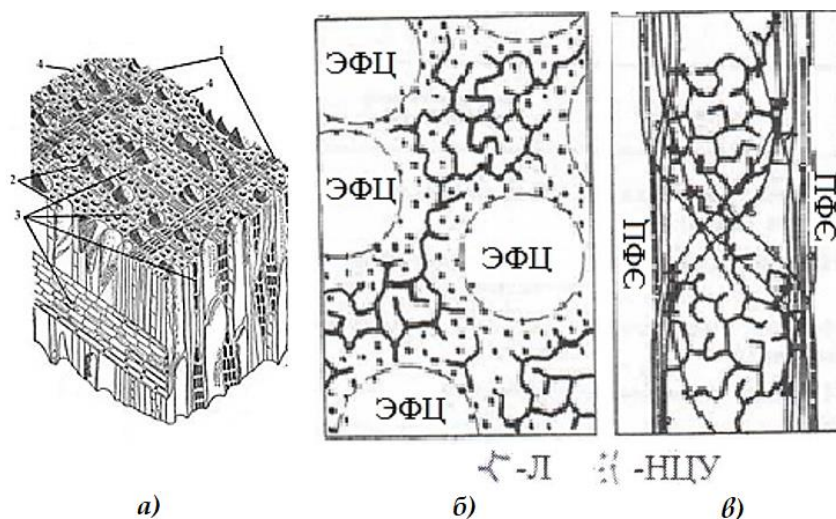


Рисунок 1 – Особенности микроструктуры древесины.

а) Фрагмент поперечного среза древесины берёзы:

1 – годовичные слои; 2 – сосуды; 3 – сердцевинные лучи; 4 – либриформ [4].

Схема строения древесинного вещества вторичной оболочки клеточных стенок древесины берёзы: б) – поперечный срез, в) продольный срез; условные обозначения: ЭФЦ – элементарные фибриллы целлюлозы; Л – лигнин; НЦУ — нецеллюлозные углеводы (гемицеллюлозы) [1]

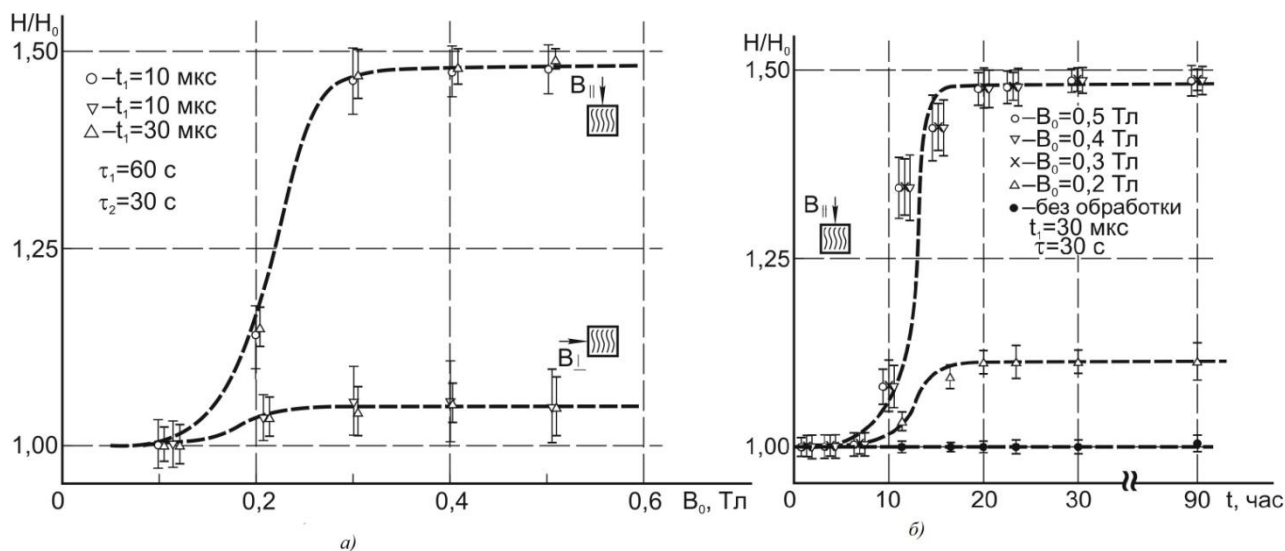


Рисунок 2 – Зависимость относительной твёрдости модифицированной древесины берёзы:

а) от амплитуды импульса B_0 ; б) от времени выдержки после обработки импульсным магнитным полем [5]

В экспериментах исследовалось влияние характеристик импульсного магнитного поля (ИМП) на относительную торцевую твёрдость образцов модифицированной древесины берёзы. Определение статической твёрдости осуществлялось по Роквеллу согласно стандарту (ГОСТ 13338-86) для модифицированной древесины [1]. Во время экспозиции образцы обрабатывались при параллельном расположении силовых линий поля и древесных волокон треугольными импульсами через одинаковые промежутки времени. В процессе исследований выяснялось влияние амплитуды магнитного поля (B_0), длительности обработки (τ) и импульса (Δt_i), а также времени выдержки после воздействия ИМП (t) на отношение их твёрдости после обработки к начальной (H/H_0).

Проведенные исследования показали, что относительная торцевая твердость образцов модифицированной берёзы H/H_0 после обработки импульсным магнитным полем повышается, если амплитуда индукции магнитного импульса B_0 превышает 0,2 Тл, а после достижения 0,3 Тл достигает максимума (увеличивается практически в 1,5 раза). Дальнейшее увеличение амплитуды практически не влияет на результат (см. Рис. 2а). Влияние времени обработки τ при условии, что B_0 больше 0,3 Тл, оказалось взаимосвязанным с длительностью импульса Δt_i . Например, при длительности импульса $\Delta t_i = 10$ мкс максимальное увеличение относительной твердости наблюдалось при $\tau \approx 60$ с, а при $\Delta t_i = 30$ мкс τ уменьшалось почти в 3 раза. После обработки импульсным магнитным полем у всех без исключения образцов модифицированной древесины относительная твердость увеличивалась и достигала максимума примерно через 24 часа (см. Рис. 2б).

Для проверки, происходит ли наблюдаемое увеличение относительной торцевой твёрдости в приповерхностном слое или по всему объёму, импульсным магнитным полем обрабатывался образец увеличенного размера (до 100 мм), а перед измерением твёрдости по Роквеллу из него нарезались стандартные (толщией по 15 мм) образцы. Данные измерения торцевой твёрдости показали, что отношение H/H_0 увеличивается в 1,35÷1,55 раз, что не противоречит результатам, полученным ранее [5].

Вербальный анализ проведённых экспериментов, в первую очередь, поражает повторяемостью полученных результатов, это подтверждает их достоверность. Наличие порогового характера изменения относительной торцевой твёрдости при варьировании параметров обработки импульсным магнитным полем говорит о процессах перестройки надмолекулярной структуры модифицированной древесины берёзы. Особенно интересен тот факт, что максимальное изменение относительной твёрдости практически одинаково для различных по сути экспериментов. Наличие времени выдержки после обработки можно объяснить завершением внутренних изотермических процессов в лингоуглеводной матрице модифицированной древесины.

Таким образом, механизм изменения надмолекулярной структуры лингоуглеводной матрицы необходимо рассматривать в рамках классической термодинамики. При таком подходе устойчивое (стационарное) состояние древесины, как термодинамической системы, соответствует минимуму функции Гиббса (G). С учетом практически неизменной температуры в условиях эксперимента можно записать, что

$$dG = m \left(\frac{dP}{\rho} - P \frac{d\rho}{\rho^2} \right) - T_k dS = 0 ,$$

где T_k – температура окружающей среды; S – энтропия; m – масса образца; P – давление текущего состояния; вместо объема используется его определение через массу и плотность ρ).

Таким образом, изменение торцевой твёрдости модифицированной древесины после обработки импульсным магнитным полем во многом вызвано внутренними процессами самоорганизации в лингоуглеводной матрице, стимулированными воздействием на её надмолекулярную структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалова, Н.С. Физические основы модифицирования древесины : монография / Н.С. Камалова, В.В. Постников. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2019. – 164 с.
2. Матвеев, Н.Н. Поляризационные явления в кристаллизующихся полимерах и биокмпозиционных материалах в неоднородном температурном поле : монография / Н.Н. Матвеев, Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова. – Воронеж: М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – 2022. – 311 с.
3. Скуратов, Н. Модифицирование древесины / Н. Скуратов // Лесная индустрия. – 2016. – № 5 (97). – С. 34-39.
4. Шамаев, В.А. Химико-механическое модифицирование древесины : монография / В.А. Шамаев. – Воронеж: ВГЛТА, 2003. – 260 с.
5. Кальченко, С.В. Упрочнение модифицированной древесины после воздействия ультразвука и импульсного магнитного поля : автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Кальченко Сергей Владимирович; ВГУ. – Воронеж, 2011. – 18 с.
6. Вихров, В.Е. Строение и физико-механические свойства древесины : моногр. / В.Е. Вихров. – Москва : Изд. АН СССР, 1954. – 264 с.
7. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения : учеб. пособие / Б.Н. Уголев. – Москва : МГУЛ, 2001. – 340 с.
8. Wood as a multicomponent, crosslinked polymer system / P. Erins, V. Cinite, M. Jakobsons, J. Gravitis // Journal of applied polymer science. Applied polymer symposium. – 1976. – № 26. – P. 1117-1138.

REFERENCES

1. Kamalova, N.S. Physical foundations of wood modification: monograph / N.S. Kamalova, V.V. Postnikov. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2019. – 164 p.
2. Matveev, N.N. Polarization phenomena in crystallizing polymers and biocomposite materials in a non-uniform temperature field: monograph / N.N. Matveev, N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova. – Voronezh: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, FSBEI HE "VSTU". – 2022. – 311 p.
3. Skuratov, N. Wood modification / N. Skuratov // Forest industry. – 2016. – No. 5 (97). – P. 34-39.

4. Shamaev, V.A. Chemical-mechanical modification of wood: monograph / V.A. Shamaev. – Voronezh: VGLTA, 2003. – 260 p.
5. Kalchenko, S.V. Strengthening of modified wood after exposure to ultrasound and pulsed magnetic field: author's abstract. diss. candidate of physical and mathematical sciences: 01.04.07 / Kalchenko Sergey Vladimirovich; VSU. – Voronezh, 2011. – 18 p.
6. Vikhrov, V.E. Structure and physical-mechanical properties of wood: monograph. / V.E. Vikhrov. – Moscow: Publ. USSR Academy of Sciences, 1954. – 264 p.
7. Ugolev, B.N. Wood science with the basics of forest commodity science: textbook / B.N. Ugolev. – Moscow: MGUL, 2001. – 340 p.
8. Wood as a multicomponent, crosslinked polymer system / P. Erins, V. Cinite, M. Jakobsons, J. Gravitis // Journal of applied polymer science. Applied polymer symposium. – 1976. – № 26. – P. 1117-1138.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИТОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ДАВЛЕНИЯ

**SENSITIVITY OF HIGH-CONCENTRATION CELLULOSE CONTAINING
FERROELECTRIC NANOCOMPOSITES TO PRESSURE**

Хоай Тхьонг Нгуен, кандидат физико-математических наук, преподаватель, научный сотрудник электротехнического факультета, Промышленный университет Хошимина, г. Хошимин, Вьетнам

Hoai Thuong Nguyen, PhD in Physics and Mathematics, Lecturer, Researcher at the Faculty of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Аннотация. Результаты исследований сегнетоэлектрических нанокomпозитов, содержащих целлюлозу и водородносвязанные сегнетоэлектрики, показали, что для образцов с относительно высоким содержанием целлюлозы электрофизические параметры материала, такие как температура фазового перехода, электропроводность и поляризация, оказываются весьма чувствительными к механическому давлению при низких температурах. Данные результаты свидетельствуют о потенциальных возможностях применения этих материалов в качестве датчиков давления. Однако остаётся ряд проблем, которые необходимо решить, включая долговременную стабильность материала и наличие или отсутствие линейной зависимости электрических параметров от механического напряжения.

Ключевые слова: целлюлоза, сегнетоэлектрики с водородными связями, фазовый переход, чувствительность, механическое давление.

Abstract. The results on cellulose-containing hydrogen-bonded ferroelectric nanocomposites indicated that for samples with a relatively high cellulose content, the electrophysical parameters of the material, such as phase transition temperature, electrical conductivity, and polarization, are highly sensitive to mechanical pressure under low-temperature conditions. These findings suggest potential applications in pressure sensors, although several challenges must be addressed, including the long-term stability of the material and whether there is a linear dependence of electrical parameters on the material's stress.

Keywords: cellulose, hydrogen-bonded ferroelectrics, phase transition, sensitivity, mechanical pressure.

В электронике целлюлозные наноматериалы, такие как наноцеллюлоза, находят применение в качестве диэлектрических подложек, гибких электродов и компонентов биоразлагаемых электронных устройств. Они обладают высокой механической прочностью, легкостью и прозрачностью, а также хорошей термостойкостью. В сочетании с проводящими наночастицами или полимерами целлюлоза может использоваться для создания гибких дисплеев, сенсоров и портативной электроники [1].

В последние годы наблюдается значительный интерес к сегнетоэлектрическим композитам с включением целлюлозы [2, 3]. Одним из наиболее выдающихся исследований является работа [2], в которой авторы разработали высокоэффективные электронные бумаги, применяемые в трибоэлектрических наногенераторах. Другая группа исследователей успешно создала экологически безопасные пьезоэлектрические сенсоры путем внедрения молекулярных сегнетоэлектриков в бактериальную целлюлозу [3]. Остальные публикации представляют собой фундаментальные исследования по использованию целлюлозы для регулирования свойств сегнетоэлектриков, демонстрируя, что в ряде случаев введение целлюлозы способствовало увеличению температуры фазового перехода [4].

Согласно результатам нашего исследования, свойства сегнетоэлектрических нанокомпозитов, содержащих целлюлозу, в значительной степени зависят от ее концентрации. В частности, при высоком содержании целлюлозы (более 20 % от общей массы) и при достаточно низких температурах электрические параметры сегнетоэлектриков с водородными связями оказываются весьма чувствительными к сжимающему давлению.

Рассмотрим следующий частный случай нанокомпозитных материалов, содержащих трис-саркозин-кальция хлорид и наноцеллюлозу. На рисунке 1 представлена зависимость диэлектрической проницаемости (ϵ) от температуры (T) при различных значениях приложенного сжимающего давления (0,1 ГПа, 0,3 ГПа, 0,5 ГПа, 0,7 ГПа). Экспериментальные данные демонстрируют наличие выраженного пика диэлектрической проницаемости, соответствующего фазовому переходу сегнетоэлектрического материала. При увеличении давления наблюдается постепенное смещение температуры фазового перехода (T_c) в область более высоких значений. Данный эффект свидетельствует о влиянии механического напряжения на сегнетоэлектрические свойства материала. Кроме того, при повышении давления максимальное значение диэлектрической проницаемости уменьшается, что может указывать на снижение поляризуемости материала в условиях сжатия. Эти результаты подтверждают, что сегнетоэлектрические характеристики исследуемых нанокомпозитов существенно зависят от механических факторов, что следует учитывать при их использовании в функциональных устройствах.

Представленные на рисунке 2 результаты для поляризации демонстрируют сужение петель гистерезиса при увеличении механического давления (от 0,1 ГПа до 0,7 ГПа), это указывает на уменьшение остаточной поляризации и коэрцитивного поля. Данный эффект может быть связан с подавлением доменной перестройки под действием механического сжатия, что приводит к снижению сегнетоэлектрических свойств материала.

Наши эксперименты также показали, что чувствительность к механическому воздействию наблюдается и в материалах, содержащих многостенные углеродные нанотрубки (MWCNT), целлюлозу и сегнетоэлектрики. В этом случае деформация материала под действием механического давления приводит к изменению структуры распределения проводящих компонентов MWCNT в целлюлозной матрице, что, в свою очередь, изменяет проводимость материала и увеличивает его диэлектрическую проницаемость за счёт эффекта Максвелла-Вагнера.

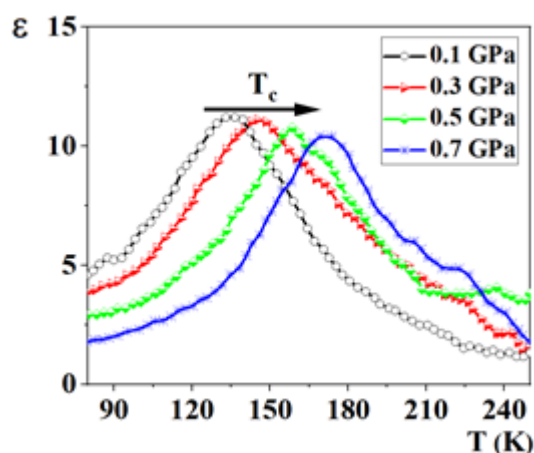


Рисунок 1 – Смещение температуры фазового перехода нанокompозитных материалов, содержащих трис-саркозин-кальция хлорид и наноцеллюлозу под воздействием механического давления

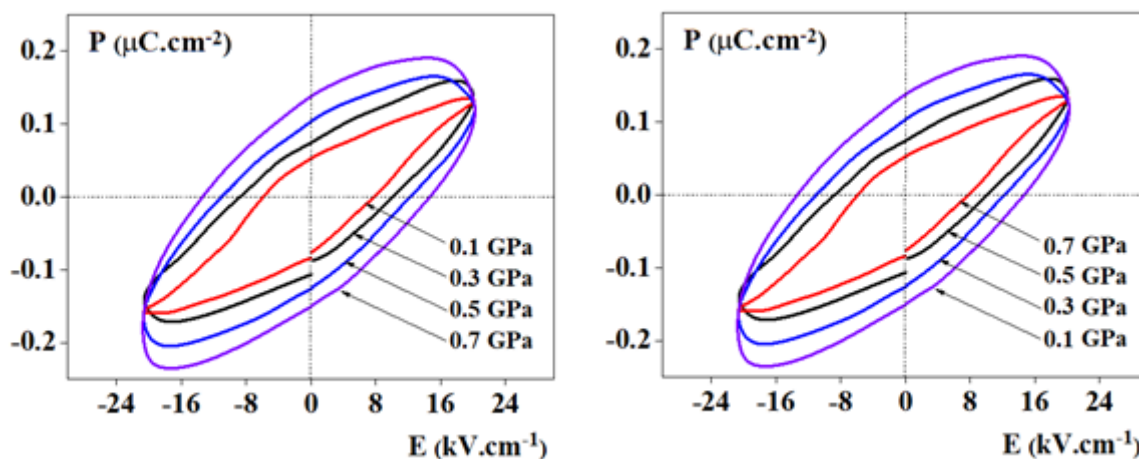


Рисунок 2 – Изменение P-E петель для нанокompозитных материалов, содержащих трис-саркозин-кальция хлорид и наноцеллюлозу под воздействием механического давления

Для объяснения того, почему механическое воздействие проявляется более явно именно в материалах, содержащих целлюлозу и сегнетоэлектрики с водородными связями, и при относительно низких температурах, можно рассмотреть следующий механизм.

Прежде всего, только сегнетоэлектрики с водородными связями способны образовывать водородные связи с целлюлозой, поскольку последняя содержит гидроксильные группы (-ОН). Поскольку водородные связи являются относительно слабыми и чувствительными к температуре, их влияние на электрические параметры (например, температуру фазового перехода в сегнетоэлектрическое состояние) можно отчетливо наблюдать лишь при относительно низких температурах. Следует отметить, что исследования методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR) также указывают на аномалии в функциональных группах при взаимодействии между компонентами материала.

Водородные связи, формирующиеся между сегнетоэлектрической фазой и целлюлозой, легко разрушаются под воздействием механических сил, что приводит к смещению пика фазового перехода.

Последний вопрос заключается в том, почему такие аномалии проявляются при относительно высоком содержании целлюлозы? Ответ, вероятно, заключается в том, что более высокая концентрация целлюлозы способствует усиленному взаимодействию с сегнетоэлектрическими компонентами, что делает эти эффекты более заметными.

Пока ещё преждевременно говорить о практическом применении сегнетоэлектрических нанокомпозитов, содержащих целлюлозу, в качестве датчиков деформации, однако полученные предварительные результаты указывают на их большой потенциал благодаря высокой чувствительности к механическим воздействиям.

Тем не менее, остаётся ряд препятствий, которые необходимо преодолеть. В частности, требуется поддержание низкой температуры, необходимо изучение долгосрочной стабильности материала при длительном механическом воздействии в реальных эксплуатационных условиях, а также выяснение, существует ли линейная зависимость между механическим напряжением (stress) и деформацией (strain). Все эти аспекты требуют дальнейших исследований.

REFERENCES

1. Atharv, S.K. A systematic review of cellulosic material for green electronics devices / S.K. Atharv, K. Balasubramanian // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. – 2022. – No. 4. – P. 1-21. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100234>.
2. Oh, H. Highly Conductive Ferroelectric Cellulose Composite Papers for Efficient Triboelectric Nanogenerators / H. Oh, S. S. Kwak, B. Kim, E. Han, G.-H. Lim, S.-W. Kim, B. Lim // Advanced Functional Materials. – 2019. – No. 29. – P. 1904066 (1-6). – DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201904066>.
3. Lu, J. Biodegradable and Recyclable Piezoelectric Sensor Based on a Molecular Ferroelectric Embedded in a Bacterial Cellulose Hydrogel / J. Lu, S. Hu, W. Li, X. Wang, X. Mo, X. Gong, H. Liu, W. Luo, W. Dong, C. Sima, Y. Wang, G. Yang, J.-T. Luo, S. Jiang, Z. Shi, G.A. Zhang // ACS Nano. – 2022. – No. 16. – P. 3744–3755. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c07614>.
4. Nguyen, H.T. Anomalous dielectric properties of ammonium sulfate under nanoconfinement in a natural matrix of cellulose / H.T. Nguyen, M.T. Chau, N. Van Anh // Phase Transition. – 2020. – No. 93. – P. 1048-1054. – DOI: <https://doi.org/10.1080/01411594.2020.1832223>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атарв, С.К. Систематический обзор целлюлозных материалов для устройств зеленой электроники / С.К. Атарв, К. Баласубраманиян // Технологии и применение углеводно-полимерных материалов. – 2022. – № 4. – С. 1-21. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100234>.
2. О, Х. Высокопроводящие сегнетоэлектрические целлюлозные композитные бумаги для эффективных трибоэлектрических наногенераторов / Х. О, С. С. Квак, Б. Ким, Э. Хан, Г.-Х. Лим, С.-В. Ким, Б. Лим // Современные функциональные материалы. – 2019. – № 29. – С. 1904066 (1-6). – DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201904066>.

3. Лу, Дж. Биоразлагаемый и пригодный для вторичной переработки пьезоэлектрический датчик на основе молекулярного сегнетоэлектрика, встроенного в бактериальный целлюлозный гидрогель / Дж. Лу, С. Ху, В. Ли, Х. Ван, Х. Мо, Х. Гун, Х. Лю, В. Луо, В. Донг, Ч. Сима, И. Ван, Г. Ян, Д.-Т. Луо, С. Цзян, З. Ши, Г. А. Чжан // ACS Nano. – 2022. – № 16. – С. 3744–3755. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c07614>.

4. Нгуен, Х.Т. Аномальные диэлектрические свойства сульфата аммония при наноконфайнменте в природной матрице целлюлозы / Х.Т. Нгуен, М.Т. Чау, Н. Ван Ань // Фазовый переход. – 2020. – № 93. – С. 1048-1054. – DOI: <https://doi.org/10.1080/01411594.2020.1832223>.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА СТРУКТУРУ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА SrTiO_3

THE EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION ON THE STRUCTURE AND DIELECTRIC
PROPERTIES OF SrTiO_3

Иевлева Е.В., соискатель, руководитель студенческого научного общества, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

Ievleva E.V., Candidate, Head of the Student Scientific Society, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Коротков Л.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

Korotkov L.N., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State Technical University Voronezh, Russia

Аннотация. В статье подробно анализируются диэлектрические параметры образцов нанокристаллического титаната стронция. Синтез материала осуществлялся с использованием метода жидкофазного химического осаждения, а также путем твердофазного синтеза с последующей интенсивной механической обработкой шихты, в диапазоне температур от 10 до 300 К и частот от 25 Гц до 10^6 Гц. Установлено, что диэлектрическая проницаемость образца, подвергнувшегося механической обработке, заметно ниже, чем у образца, полученного с использованием метода химического осаждения. В данном образце обнаружена диэлектрическая релаксация при температурах ниже 110 К, что является следствием взаимодействия подвижных носителей заряда и границ сегнетоэластических доменов.

Ключевые слова: интенсивная механическая обработка, виртуальный сегнетоэлектрик, сегнетоэластик, диэлектрическая релаксация.

Abstract. The article provides a detailed analysis of the dielectric parameters of nanocrystalline strontium titanate samples. The material was synthesized using the liquid-phase chemical deposition method, as well as by solid-phase synthesis followed by intensive mechanical processing of the mixture, in the temperature range from 10 to 300 K and frequency range from 25 Hz to 10^6 Hz. It was found that the dielectric constant of the mechanically processed sample is significantly lower than that of the sample obtained using the chemical deposition method. Dielectric relaxation was detected in this sample at temperatures below 110 K, which is a result of the interaction between mobile charge carriers and the boundaries of ferroelastic domains.

Keywords: intensive mechanical treatment, virtual ferroelectric, ferroelastic, dielectric relaxation.

В современном электронном приборостроении широко применяются сегнетоэлектрические монокристаллы, тонкие пленки и керамики [1, 2]. Керамики и твердые

растворы на основе титаната стронция (SrTiO_3), который является виртуальным сегнетоэлектриком – один из востребованных материалов.

Титанат стронция, имеющий перовскитную структуру, является объектом активных исследований. При охлаждении до 110 К в нем происходит структурное изменение: кубическая фаза переходит в тетрагональную сегнетоэластическую фазу [3].

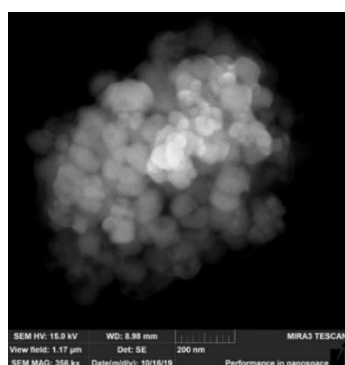
Несмотря на ожидания, сегнетоэлектрический фазовый переход в SrTiO_3 при дальнейшем понижении температуры не наблюдается из-за значительных квантовых флуктуаций. Тем не менее, введение небольшого количества примесей или дефектов кристаллической решетки способно индуцировать полярную фазу в этом материале [3].

Физические свойства керамических материалов в значительной мере зависят от технологии их изготовления, в частности, от режима предварительного помола материала перед спеканием. Важную роль играет процесс помола шихты перед спеканием образцов [4]. Поэтому целью данной работы стало изучение влияния интенсивной механической обработки на диэлектрические свойства керамики из субмикронного титаната стронция.

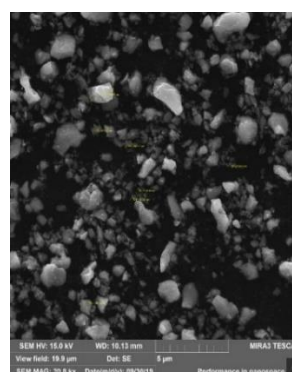
Для исследования были выбраны 3 вида образцов. Технология изготовления образцов описана в таблице 1. На рисунке 1 представлено полученное с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 650 FEG изображение частиц исходных порошков.

Таблица 1 – Технология получения образцов

Образец	№ 1	№ 2	№ 3
Исходный материал для компактирования	Коммерческий порошок SrTiO_3 , полученный методом химического осаждения из раствора		Мелкодисперсный SrTiO_3 , полученный по керамической технологии с последующим механическим измельчением
Средний размер первичных частиц порошкообразного материала	100 нм	100 нм	120-400 нм
Продолжительность термической обработки при температуре 1000 °С	120 мин	240 мин	120 мин



а)



б)

Рисунок 1 – Фотографии микроструктуры: а) коммерческого порошка SrTiO_3 со средним размером первичных частиц 100 нм; б) мелкодисперсного порошка SrTiO_3 после проведения процедуры механического измельчения в течение 6 часов

Анализ рентгенограммы исходных порошков титаната стронция показал, что они обладают кубической кристаллической решеткой перовскита $Pm\bar{3}m$ с параметром элементарной ячейки $a = 3,905(1) \text{ \AA}$, что соответствует данным [3].

Спрессованные из порошкообразных материалов образцы представляли собой плоскопараллельные диски радиусом 5 мм и толщиной 1 мм. С целью создания надежных электрических контактов на их поверхности наносили серебряную пасту. После предварительной просушки паста фиксировалась путем высокотемпературного отжига при 600°C .

Иммитансметр модели Е 7-20 использовался для определения температурных зависимостей диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). Измерения проводились в температурном интервале от 80 до 370 К, охватывая частотный диапазон от 25 Гц до 10^6 Гц.

Диэлектрическая проницаемость образца №1 изменяется в зависимости от температуры, что наглядно продемонстрировано на рисунке 2 а. Она имеет минимум в окрестности 300 К. Виден небольшой рост ϵ при дальнейшем повышении температуры, который можно связать с увеличением электропроводности образца. При понижении температуры от 300 К наблюдается возрастание диэлектрической проницаемости образца №1 также, как и для образцов №2 и №3 (Рис. 2 б). Для SrTiO_3 типично возрастание ϵ с понижением температуры.

Диэлектрическая проницаемость образцов №1 и №2, полученных методом химического осаждения из раствора, в диапазоне температур от 90 до 250 К демонстрирует поведение, соответствующее закону Кюри-Вейса [3]:

$$\epsilon - \epsilon_\infty = C_{CW} / (T - \theta), \quad (1)$$

где θ – температура Кюри-Вейса; C_{CW} – константа Кюри-Вейса; ϵ_∞ – составляющая диэлектрической проницаемости, не зависящая от температуры.

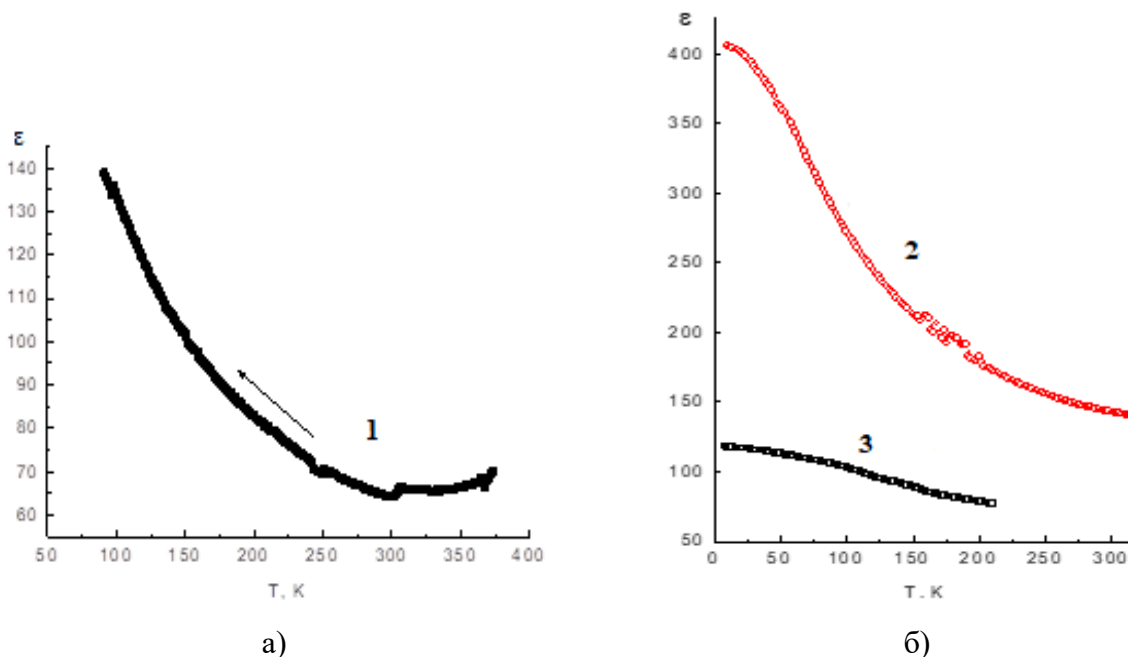


Рисунок 2 – Графики зависимостей диэлектрической проницаемости исследуемых образцов от температуры: а) образец №1; б) образцы №2 и №3

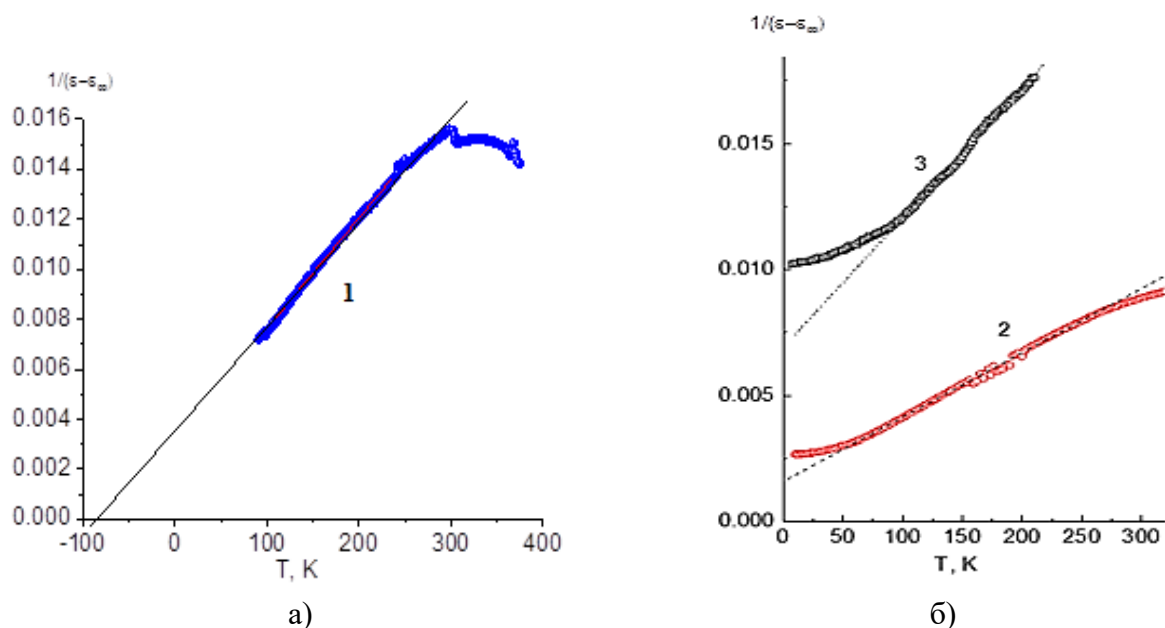


Рисунок 3 – Графики зависимостей $1/[\varepsilon(T) - \varepsilon_\infty]$ для: а) образца №1; б) образцов №2 и №3

Линейные зависимости в диапазоне температур 100-300 К, представленные на рисунках 3 а и 3 б, свидетельствуют о применимости уравнения (1) для моделирования результатов эксперимента. Оптимальное соответствие с экспериментальными данными для образцов из коммерческого порошка №1 и №2, полученных методом жидкофазного химического осаждения, достигается при константах Кюри-Вейса около 22470 и 40420 К, и температурах Кюри-Вейса примерно 85 и 65 К, соответственно.

В диапазоне температур от 100 до 300 К значения диэлектрической проницаемости второго образца примерно вдвое превышают соответствующие значения для первого образца (см. Рис. 2). Следовательно, увеличение продолжительности термической обработки в два раза приводит к двукратному повышению его диэлектрической проницаемости, что, вероятно, связано с увеличением плотности материала и сокращением пористости. Важно отметить, что температура Кюри-Вейса остается практически неизменной при увеличении времени спекания образца.

При аналогичных условиях диэлектрическая проницаемость образца №3, полученного методом механоактивации, значительно уступает диэлектрической проницаемости первых двух образцов (см. Рис. 2 б). Это различие обусловлено различиями в микроструктуре, размерах зерен, дефектности кристаллической решетки и, как следствие, различной концентрацией дефектов и внутренних напряжений.

Для образца под №3 из мелкодисперсного порошка, полученного по керамической технологии с последующим механическим измельчением, диапазон температур, в котором действует правило Кюри-Вейса, значительно сужен. Начиная с температур ниже 110 К, наблюдается отступление диэлектрической проницаемости от предписанного законом (1) поведения. Стоит отметить, что для образца №2 аналогичное отклонение, связанное с квантовыми флуктуациями, проявляется только при температурах около 50 К (см. рисунок 3 б), что соответствует поведению монокристалла SrTiO_3 [3].

В то же время, при температурах ниже 110 К для образца №3 зависимость $\varepsilon(T)$ с достаточной точностью описывается «квадратичным» законом Кюри-Вейса. Этот закон, как правило, используют при построении моделей, описывающих диэлектрическое поведение сегнетоэлектриков релаксорного типа:

$$\varepsilon - \varepsilon_{\infty} = A/(T - T_m)^2, \quad (2)$$

где T_m – температура максимума диэлектрической проницаемости; A – некоторая постоянная.

Убедительность аппроксимации температурной вариации $\varepsilon(T)$ для образца №3, выраженная уравнением (2), демонстрируется линейным графиком на рисунке 4. Этот график построен, исходя из допущения, что предполагаемый пик диэлектрической проницаемости исследуемого образца, полученного методом механоактивации, достигается при температуре – 10 К.

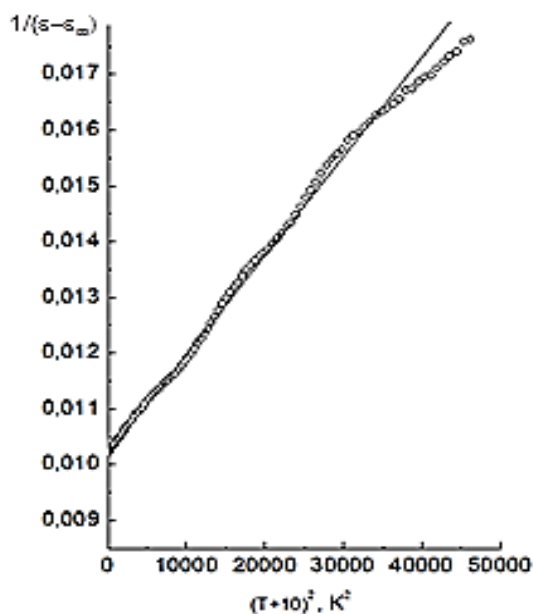


Рисунок 4 – График зависимости $1/[\varepsilon - \varepsilon_{\infty}]$ от $(T - T_m)^2$ для образца №3

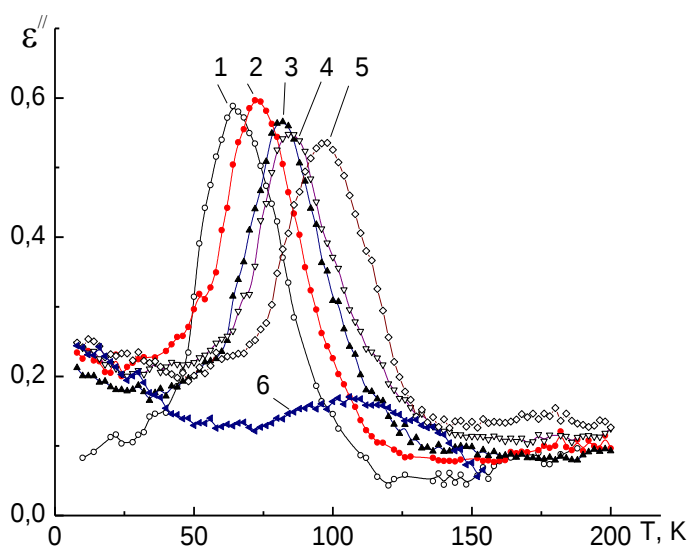


Рисунок 5 – Семейство зависимостей $\varepsilon''(T)$ для образца №3 при различных частотах f (Гц): 500 (1), 2000 (2), 10000 (3), 20000 (4), 10^5 (5) и 10^6 (6)

Рассмотрим диэлектрическое рассеяние энергии в исследуемых материалах. Для образцов №1 и №2 при температурах ниже 300 К отмечается устойчивое уменьшение тангенса угла диэлектрических потерь по мере снижения температуры. В отличие от них, образец №3 демонстрирует слабую зависимость $\varepsilon(T)$ в интервале от 20 до 120 К. На температурных графиках, представляющих мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'' = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$, наблюдается пик, положение которого зависит от частоты приложенного измерительного поля f (см. Рис. 5).

Согласно полученным данным наибольшее возможное значение модуля ε'' не выходит за рамки 0,6. Данное значение, в соответствии с уравнением Дебая для дисперсии [5], указывает на глубину дисперсии диэлектрической проницаемости порядка 1,2. Эта величина сопоставима с погрешностью, возникающей при измерении ε . Этим можно объяснить слабую дисперсию диэлектрической проницаемости для образца №3, наблюдаемую при температурах ниже 110 К.

В диапазоне частот 500-10⁵ Гц положение максимума мнимой компоненты диэлектрической проницаемости демонстрирует зависимость, которая адекватно соответствует уравнению Аррениуса [5]:

$$\frac{1}{2\pi f} = \tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U}{kT}\right), \quad (3)$$

где τ – время релаксации; τ_0 – множитель, имеющий размерность времени; U – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – температура, соответствующая максимуму ε'' .

На рисунке 6 показан график зависимости натурального логарифма времени релаксации $\ln \tau$ от обратной температуры T^{-1} . Данная зависимость носит линейный характер. Анализ наклона и формы кривой позволяет получить информацию об энергии активации процесса и других кинетических параметрах (например, $U \approx 0,09$ эВ и $\tau_0 \approx 2,86 \cdot 10^{-11}$ с). Полученные в ходе эксперимента данные согласуются с уравнением Аррениуса (3), что указывает на возможность его использования для моделирования наблюдаемых явлений.

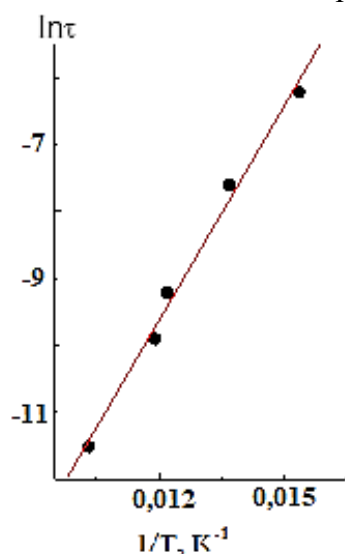


Рисунок 6 – График зависимости натурального логарифма времени релаксации от обратной температуры

Из семейства зависимостей, представленных на рисунке 5, выпадает полученная на частоте 10^6 Гц кривая 6, максимум которой зарегистрирован при температуре около 108 К. Его амплитуда заметно ниже и значительно шире пиков, наблюдаемых на более низких частотах. Согласно уравнению (3), положение этого пика должно соответствовать температуре приблизительно 125 К, что превышает экспериментально зафиксированное значение. Этот факт указывает на то, что диэлектрическая релаксация, обнаруженная в эксперименте, связана с доменной структурой сегнетоэлектрического материала, которая пропадает при температурах, превышающих температуру сегнетоэластического фазового перехода 110 К. Учитывая, что сами сегнетоэластические домены не влияют на поляризацию, можно предположить, что обнаруженная в эксперименте диэлектрическая релаксация обусловлена движением взаимодействующих с этими доменами точечных зарядов. Полученные для энергии активации U и времени τ_0 значения ($U \approx 0,09$ эВ и $\tau_0 \approx 2,86 \cdot 10^{-11}$ с) имеют тот же порядок, что и данные на основе результатов акустических измерений [6, 7].

Таким образом, анализ представленных данных указывает на существование электромеханического взаимодействия в исследуемом материале. Это означает, что электрическое поле способно влиять на смещение упругих доменов, а деформации, в свою очередь, индуцируют поляризованное состояние. Перемалывание шихты при изготовлении третьего образца привело к образованию дефектов кристаллической решетки, концентрация которых в нём существенно выше концентрации дефектов в образцах №1 и №2. Вероятнее всего, наблюдаемая в сегнетоэластической фазе дисперсия диэлектрической проницаемости является следствием взаимодействия электрических зарядов с границами доменов.

На основе анализа полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы.

1) Рост диэлектрической проницаемости SrTiO_3 при понижении температуры является сложным явлением, обусловленным квантовыми эффектами, подавлением сегнетоэлектрического фазового перехода, флуктуациями поляризации и наличием дефектов в кристаллической решетке. Это делает SrTiO_3 интересным объектом для исследований и перспективным материалом для различных электронных приложений, особенно при низких температурах. Более длительный отжиг при 1000 °С спрессованных наночастиц титаната стронция вызывает увеличение диэлектрической проницаемости и константы Кюри-Вейса. Тем не менее, температура Кюри-Вейса остается почти неизменной.

2) Изменение диэлектрической проницаемости механоактивированного титаната стронция в зависимости от температуры демонстрирует хорошее соответствие «квадратичному» закону Кюри-Вейса в широком температурном интервале. В сегнетоэластичном состоянии этого материала обнаружена диэлектрическая релаксация при температурах, не превышающих 110 К, имеющая термоактивированный характер, связанная с динамикой сегнетоэластических доменов. Продолжительный отжиг при температуре 1000 °С не устраняет дефектов кристаллической решетки титаната стронция, которые образовались вследствие интенсивной механической обработки шихты.

Таким образом, результаты проведенных исследований диэлектрических свойств нанокристаллического титаната стронция, полученного различными методами, могут быть полезны для понимания влияния микроструктуры на диэлектрические свойства перовскитов

и для разработки новых материалов на их основе, а также для оптимизации свойств материала и его применения в различных электронных устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воротилов, К.А. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / К.А. Воротилов, В.М. Мухортов, А.С. Сигов. – Москва: Энергоатомиздат, 2011. – 175 с.
2. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Н.Н. Антонов, И.М. Бужин, О.Г.Вендик [и др.] ; под. ред. О.Г. Вендика. – Москва: Советское радио, 1979. – 272 с.
3. Лайнс, М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / М. Лайнс, А. Гласс. – Москва: Мир, 1981. – 736 с.
4. Влияние интенсивной механической обработки на диэлектрические и магнитные свойства титанита бария / Н.А. Толстых, Е.В. Иевлева, Л.Н. Коротков, Ч. Ли, А.А. Александров, К.Г. Абдулвахидов // Письма в ЖТФ. – 2025. – Том 51, Вып. 9. – С. 50-52.
5. Поплавко, Ю.М. Физика диэлектриков / Ю.М. Поплавко. – Киев: Вища школа, 1980. – 400 с.
6. Lemanov, V.V. Improper ferroelastic SrTiO_3 and what we know today about its properties / V.V. Lemanov // *Ferroelectrics*. – 2002. – Vol. 265 (1). – P. 1-21.
7. Леманов, В.В. Низкочастотные упругие свойства, динамика доменов и спонтанное кручение SrTiO_3 в области ферроэластического фазового перехода / В.В. Леманов, С.А. Гриднев, Е.В. Ухин. // ФТТ. – 2002. – Т. 44, Вып. 6. – С. 1106-1115.

REFERENCES

1. Vorotilov, K.A. Integrated ferroelectric devices / K.A. Vorotilov, V.M. Mukhortov, A.S. Sigov. – Moscow: Energoatomizdat, 2011. – 175 p.
2. Ferroelectrics in microwave technology / N.N. Antonov, I.M. Buzin, O.G. Vendik [et al.]; ed. O.G. Vendik. – Moscow: Sovetskoye Radio, 1979. – 272 p.
3. Lines, M. Ferroelectrics and related materials / M. Lines, A. Glass. – Moscow: Mir, 1981. – 736 p.
4. Effect of intense mechanical treatment on the dielectric and magnetic properties of barium titanite / N.A. Tolstykh, E.V. Ievleva, L.N. Korotkov, C. Li, A.A. Aleksandrov, K.G. Abdolvakhidov // *Letters to the Journal of Technical Physics*. – 2025. – Vol. 51, Iss. 9. – P. 50-52.
5. Poplavko, Yu.M. Physics of Dielectrics / Yu.M. Poplavko. – Kyiv: Vishcha shkola, 1980. – 400 p.
6. Lemanov, V.V. Improper ferroelastic SrTiO_3 and what we know today about its properties / V.V. Lemanov // *Ferroelectrics*. – 2002. – Vol. 265 (1). – P. 1-21.
7. Lemanov, V.V. Low-frequency elastic properties, domain dynamics and spontaneous torsion of SrTiO_3 in the region of ferroelastic phase transition / V.V. Lemanov, S.A. Gridnev, E.V. Ukhin. // *FTT*. – 2002. – Vol. 44, Iss. 6. – P. 1106-1115.

ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАДИУСА ШЕЙКИ ЯДРА В ТОЧКЕ ЕГО РАЗРЫВА

METHODS OF DEFINING THE NUCLEUS NECK RADIUS AT THE POINT OF RUPTURE

Титова Л.В., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой ядерной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Titova L.V., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the Nuclear Physics Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Любашевский Д.Е., доктор физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Lyubashevsky D.E., DrSc in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Ключников С.В., студент 2 курса физического факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Kluychnikov S.V., 2nd year student of the Physics Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Кострюков П.В., PhD in the field of exact and natural sciences in the field of physical sciences, преподаватель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Kostryukov P.V., PhD in the field of exact and natural sciences in the field of physical sciences, teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov / Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. Представлен сравнительный анализ методов определения радиуса шейки ядра $r_{\text{ш}}$ в точке его разрыва при делении актинидов. Рассмотрены классические подходы на основе модели жидкой капли, современные методы теории функционала плотности с временной зависимостью и приближение Борна-Оппенгеймера. Предложен альтернативный метод на основе концепции «холодного» деления с анализом спиновых распределений фрагментов. Установлена количественная связь между радиусом шейки и спинами фрагментов через поперечные bending и wriggling колебания. Показано, что для ^{235}U , ^{238}U и ^{252}Cf радиус шейки составляет 1.5 – 2.2 фм, что согласуется с различными теоретическими подходами.

Ключевые слова: деление ядер, радиус шейки ядра, спиновое распределение, холодное деление, деформация фрагментов.

Abstract. Comparative analysis of methods for determining the nuclear neck radius (r_{neck}) at the point of rupture during actinide fission is presented. Classical approaches based on the liquid drop model, modern time-dependent density functional theory methods, and the Born-Oppenheimer approximation (BOA) are considered. An alternative method based on the "cold" fission concept with analysis of fragment spin distributions is proposed. A quantitative relationship between the neck

radius and fragment spins through transverse bending and wriggling vibrations is established. It is shown that for ^{235}U , ^{238}U and ^{252}Cf the neck radius is 1.5 – 2.2 fm, which is consistent with various theoretical approaches.

Keywords: nuclear fission, nucleus neck radius, spin distribution, cold fission, fragment deformation.

Введение

Процесс ядерного деления начинается с образования составного ядра при захвате нейтрона ядром-мишенью AX , что за время $\tau_{nuc} \sim 10^{-21}$ приводит к формированию возбуждённого состояния $^{A+1}X^*$. Энергия возбуждения, составляющая обычно 5 – 7 МэВ для актинидов, инициирует деформацию ядра, которая переходит от близкой к сферической формы к вытянутой конфигурации, преодолевая потенциальный барьер деления [1].

Этот барьер формируется в результате конкуренции между поверхностной энергией и ядерными силами, стремящимися сохранить компактную форму ядра, с одной стороны, и дестабилизирующим кулоновским отталкиванием между формирующимися фрагментами – с другой. Высота барьера определяет вероятность деления [1], а его структура влияет на характеристики продуктов деления [2], включая их массовые и энергетические распределения.

В процессе деформации форма ядра описывается через квадрупольные β_2 и октупольные β_3 параметры деформации. Симметричные квадрупольные моды приводят к делению на фрагменты примерно равной массы ($A_{\phi_1} \approx A_{\phi_2}$), тогда как асимметричные октупольные моды способствуют образованию фрагментов различной массы. Эти деформационные характеристики непосредственно влияют на массовые выходы продуктов деления и их полных кинетических энергий (ПКЕ), которая для актинидов составляет 170 – 185 МэВ и измеряется с очень высокой точностью $\sim 2\%$ [3].

Одним из ключевых параметров, определяющих динамику процесса деления, является радиус шейки $r_{ш}$ – минимальный поперечный размер области, соединяющей формирующиеся фрагменты в момент разрыва. Этот параметр критически влияет на энергетические характеристики продуктов деления: малые значения $r_{ш} \approx 1$ фм соответствуют компактным конфигурациям и высоким значениям полной кинетической энергии фрагментов, тогда как большие значения $r_{ш} \approx 2.2$ фм указывают на растянутую шейку и меньшую ПКЕ продуктов.

Поскольку массовые выходы $Y(A_{\phi})$ существенно зависят от асимметрии деления, которая, в свою очередь, определяется параметрами шейки, точное определение $r_{ш}$ позволяет предсказать массовые распределения с погрешностью в пределах 5%. Это делает разработку надёжных методов оценки радиуса шейки одной из приоритетных задач современной теории ядерного деления.

Некоторые методы оценки радиуса шейки

Классический подход

Классический подход к определению радиуса шейки основан на модели жидкой капли, сделанной в работе [4], которая рассматривает ядро как заряженную каплю с поверхностным натяжением $\sigma \approx 9$ МэВ/фм². В рамках этой модели радиус шейки определяется через баланс

ядерных сил притяжения, описываемых двухнуклонным потенциалом Юкавы, и кулоновского отталкивания между предфрагментами.

Основная идея подхода заключается в том, что для конфигураций с большими радиусами шейки ядерные силы притяжения превышают кулоновскую силу отталкивания, делая ядро устойчивым к разрыву. Однако, по мере уменьшения радиуса шейки кулоновская сила отталкивания начинает доминировать, что в конечном итоге приводит к разрыву шейки при некотором критическом значении радиуса. Согласно [4], радиус шейки в точке разрыва выражается формулой:

$$r_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{\sigma \pi R^2}}, \quad (1)$$

где Z_1, Z_2 – заряды предфрагментов; $e^2 = 1.44 \text{ МэВ} \cdot \text{фм}$; $R \approx 11 \text{ фм}$ – расстояние между центрами масс предфрагментов.

Применение этой формулы к конкретным ядерным реакциям даёт следующие результаты. Для спонтанного деления ^{252}Cf с типичными фрагментами $Z_1 = 42, Z_2 = 56$ расчёт по формуле (1) даёт $r_{\text{ш}} \approx 1.2 \text{ фм}$. Для индуцированного деления $^{235}\text{U}(n,f)$ с фрагментами $Z_1 = 38, Z_2 = 54$ и $R \approx 10 \text{ фм}$ получается $r_{\text{ш}} \approx 1.35 \text{ фм}$.

Однако, эти значения оказываются систематически заниженными по сравнению с оценками, основанными на размерах нуклонов ($d_{\text{нукл}} \approx 1.8 \text{ фм}$). Это связано с упрощениями модели, которая представляет предфрагменты как сферические объекты и не учитывает микроскопические эффекты, такие как оболочечные структуры и коллективные возбуждения.

Признавая ограничения простой геометрической модели, Дэвис и его коллеги предложили более реалистичный метод расчёта кулоновских сил и сил разрыва шейки для реальных форм ядер, возникающих при делении. В этом подходе система мысленно делится на две части по минимальному радиусу шейки, после чего силы рассчитываются путём дифференцирования энергии кулоновского и ядерного взаимодействия по расстоянию между центрами масс при неизменной форме предфрагментов.

Энергии взаимодействия определяются путём интегрирования кулоновского взаимодействия и эффективного двухнуклонного взаимодействия Юкавы для каждого из предфрагментов деления. Этот метод позволяет учесть реальную геометрию деформированных фрагментов и получить более точные оценки радиуса шейки.

Расчёты, проведённые в [4] для двух типов ядерной диссипации (обычной вязкости двух тел и диссипации одного тела, возникающей в результате столкновения нуклонов с движущейся потенциальной стенкой) показали, что при любом типе диссипации радиус шейки при разрыве ядер актинидов составляет около 2 фм. Это значение несколько превышает простую геометрическую оценку, но лучше согласуется с экспериментальными данными, в первую очередь по ПКЕ.

Современные подходы

Современное развитие квантово-механических методов привело к созданию более точных подходов, основанных на теории функционала плотности с временной зависимостью (TDDFT). Эти методы обеспечивают [5-7] высокоточное моделирование ядерного деления за

счёт применения самосогласованных квантово-механических расчётов, учитывающих корреляции между нуклонами и оболочечные эффекты.

TDDFT описывает эволюцию ядерной плотности через решение уравнений Шрёдингера методом Хартри-Фока-Боголюбова с временной зависимостью. Этот подход позволяет проследить весь процесс деления от начальной деформации до окончательного разделения на фрагменты, учитывая при этом квантовые флуктуации и коллективные эффекты.

Результаты TDDFT-расчётов показывают, что для ^{236}U радиус шейки в момент разрыва составляет $r_{\text{ш}} \approx 1.8$ фм, а для ^{252}Cf — $r_{\text{ш}} \approx 2$ фм. Эти значения хорошо согласуются с экспериментальными массовыми выходами: $A_{\text{ф}} \approx (96,140)$ для ^{235}U ; $(108,144)$ для ^{252}Cf и ПКЕ фрагментов: 170 МэВ для ^{236}U , 185 МэВ для ^{252}Cf .

Важным аспектом TDDFT-моделирования является учёт энергетической диссипации в процессе деления. Диссипация моделируется через фрикционные силы, включающие вязкость двух тел и диссипацию одного тела, обусловленную взаимодействием нуклонов с деформирующейся границей шейки [6]. Для ^{236}U расчёты демонстрируют явную зависимость $r_{\text{ш}}$ от асимметричных деформаций, что отражает пики в массовых выходах.

Однако, несмотря на большие успехи TDDFT-моделирования имеется целый спектр недостатков, вызываемые в первую очередь из численных методов. Обеспечивая высокую точность, метод требуют огромных вычислительных ресурсов. Также имеется серьезная проблема расширения круга исследуемых ядер. Обычно они исчисляются единицами.

Приближение Борна-Оппенгеймера (BOA) предлагает [8, 9] альтернативный вероятностный подход к описанию процесса деления, основанный на разделении медленных и быстрых степеней свободы. В этом подходе медленные переменные (например, расстояние между предфрагментами) рассматриваются как адиабатические параметры, а быстрые переменные (колебания асимметрии и параметров шейки) – как квантовые флуктуации [9].

Вероятностное распределение формы ядра в BOA задаётся выражением:

$$W(q_3, q_4; q_2) \propto \exp\left(\frac{V(q_3, q_4; q_2) - V_{\min}(q_2)}{T^*}\right), \quad (2)$$

где V – потенциальная энергия деформации; $T^* \approx 1$ МэВ – эффективная температура, характеризующая квантовые флуктуации $T^* = E_0 \tanh(E_0/T)$; E_0 – нулевая энергия коллективных колебаний, которая в указанной модели является параметром.

Чтобы правильно учесть поведение главной моды – удлинения q_2 от координат масс-асимметрии q_3 и параметра шейки q_4 в работе [9] была введена зависимость, представляемая вероятностью $P(q_2, q_3, q_4)$, которая напрямую связана с вероятностью разрыва шейки ядра $P_{\text{neck}}(q_2, q_3, q_4)$, имеющей вид:

$$P_{\text{neck}}(q_2, q_3, q_4) \equiv P_{\text{neck}}(r_{\text{ш}}) = \exp^{-\log^2\left(\frac{r_{\text{ш}}}{d}\right)^2}, \quad (3)$$

Исходя из введенной (3), расчёты в рамках BOA метода (2) предсказывают для большей части актинидов радиус шейки $r_{\text{ш}} \approx 1.6\text{--}2$ фм, что было хорошо фиттировано по десяткам массовым выходам вынужденного и спонтанного деления, полученных эмпирическим путем.

Преимущество BOA заключается в том, что он естественным образом включает успехи обобщенной модели и упрощает численные расчеты, давая при этом весьма близкие к

экспериментальным данным. В частности, массовым распределениям, что хорошо показано в работе [10]. Однако, статистичность метода является серьезным препятствием для получения большей точности в описания деления.

Альтернативный подход

Недавние прорывные экспериментальные исследования [10] впервые предоставили надёжные данные по спиновым распределениям фрагментов деления для актинидов, открывающие принципиально новые возможности для верификации теоретических моделей и определения радиуса шейки.

Фундаментальной основой развиваемого подхода является концепция «холодного» деления, экспериментально подтверждённая наблюдаемыми анизотропиями в угловых распределениях продуктов деления при низкоэнергетических процессах. Эти анизотропии, характеризуемые коэффициентом $\alpha \approx 0.1$ для ядер актинидов, указывают на сохранение аксиальной симметрии делящейся системы и проекции спина на ось симметрии в течение всего процесса деления. Наблюдение устойчивых анизотропий свидетельствует о том, что делящаяся система остаётся «холодной» ($T < 0.5$ МэВ) на всех стадиях процесса. Если бы система нагревалась до температур $T \sim 1 - 2$ МэВ, как предполагают традиционные «горячие» модели, например [7, 11], это привело бы к статистическому смешиванию проекций спина на ось симметрии и полному исчезновению наблюдаемых анизотропий.

Для описания волновой функции «холодного» делящегося состояния применяется подход [2, 12], основанный на теории случайных матриц Вигнера:

$$\Psi_{JMK} = b_0 \psi_{JMK}(\beta_\lambda) + \sum_{i \neq 0} b_i \psi_{JMiK},$$

где функция ψ_{JMiK} описывает i -квазичастичное возбуждённое состояние ядра; $\psi_{JMK}(\beta_\lambda)$ описывает коллективное деформационное движение ядра с энергией возбуждения $|B_n|$, соответствующее переходному делительному состоянию. Коэффициенты b_i подчиняются распределению Вигнера, а их квадраты имеют средние значения $\langle b_i^2 \rangle = 1/N$, где $N \approx 10^6$ – общее число квазичастичных состояний.

Поскольку делящаяся система сохраняет «холодность» до точки разрыва, решающую роль в формировании спиновых характеристик фрагментов играют нулевые поперечные колебания – bending и wriggling моды. Bending-колебания характеризуются антипараллельной ориентацией спинов предфрагментов ($\vec{J}_1 \uparrow \downarrow \vec{J}_2$), что обеспечивает сохранение полного углового момента системы. При этих колебаниях один предфрагмент вращается по часовой стрелке, а другой – против часовой стрелки вокруг оси, перпендикулярной оси симметрии делящегося ядра. Wriggling-колебания характеризуются параллельной ориентацией спинов предфрагментов ($\vec{J}_1 \uparrow \uparrow \vec{J}_2$). Для сохранения полного углового момента система должна приобрести относительный орбитальный момент $\vec{L} = -(\vec{J}_1 + \vec{J}_2)$.

Потенциальная энергия bending-колебаний при малых углах поворота θ_1 и θ_2 описывается [13, 14] выражением:

$$V(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} C_{11} \theta_1^2 + C_{12} \theta_1 \theta_2 + \frac{1}{2} C_{22} \theta_2^2. \quad (4)$$

Моменты инерции для различных типов колебаний определяются соотношениями. Для bending-колебаний:

$$I_b = \frac{\mu R^2 I_H}{\mu R^2 + I_H};$$

для wriggling-колебаний:

$$I_w = \frac{I_0 I}{I_1 + I_2},$$

где $\mu = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}$ – приведённая масса; I_H – момент инерции тяжёлого фрагмента;

$I_0 = \frac{M_1 M_2 (R_1 + R_2 + r_{\text{ш}})^2}{M_1 + M_2}$ – момент инерции относительного движения; $r_{\text{ш}}$ – радиус шейки.

В рамках квантовой теории деления [12] средний спин фрагмента связан с параметрами колебаний через:

$$\langle J_i \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{d_i}}, \quad (5)$$

где $d_i = I_i^2 C_w (I_1 + I_2)^{-2} + C_b$; параметры $C_k = I_k \hbar \omega_k$ определяются моментами инерции и частотами соответствующих колебаний. Это соотношение устанавливает прямую связь между экспериментально наблюдаемыми спинами фрагментов и радиусом шейки в момент разрыва, поскольку I_0 явно зависит от $r_{\text{ш}}$. Определение радиуса шейки осуществляется через подгонку теоретических значений спинов к экспериментальным данным [10], результаты которой представлены на рисунке 1.

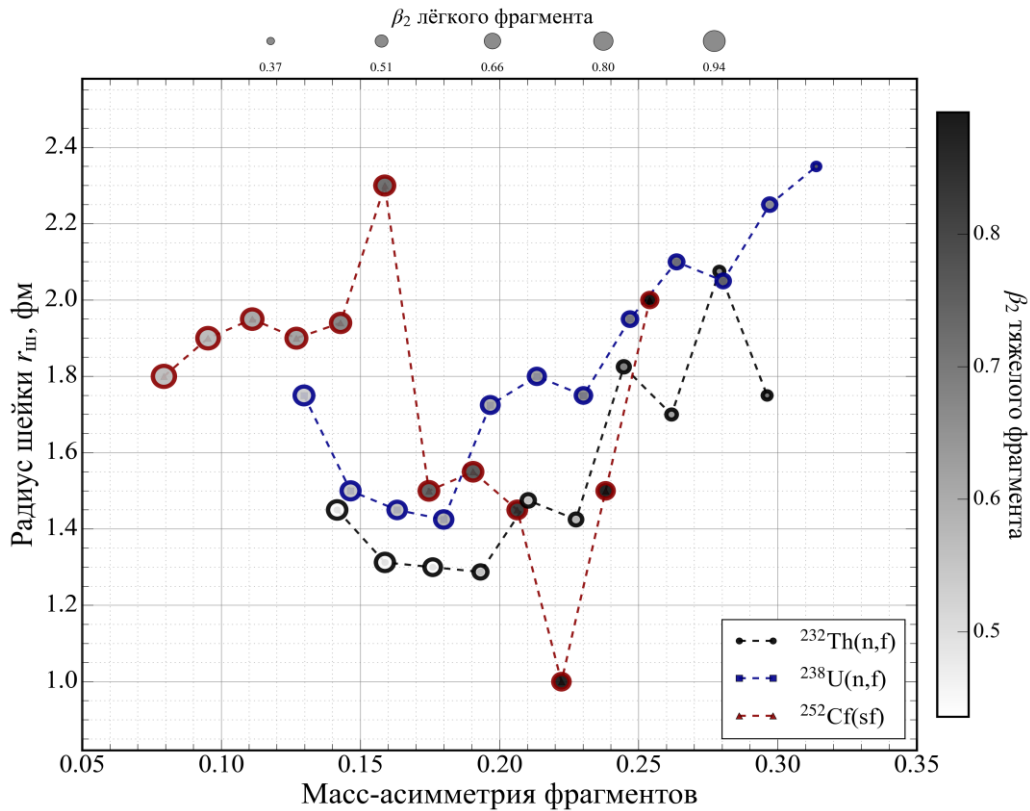


Рисунок 1 – Зависимость радиуса шейки от массовой асимметрии фрагментов для различных реакций деления. Размер маркеров соответствует квадрупольной деформации лёгкого фрагмента (β_2), цветовая шкала отражает деформацию тяжёлого фрагмента

Они выявляют сложные и неожиданные закономерности в поведении радиуса шейки ядра в момент разрыва при делении различных актинидов. Радиус шейки демонстрирует существенные различия между рассматриваемыми изотопами и показывает нетривиальные корреляции с деформационными характеристиками образующихся фрагментов.

Вынужденное деление $^{232}\text{Th}(n,f)$ характеризуется относительно узким диапазоном радиуса шейки от 1.3 до 2.1 фм со средним значением около 1.7 фм. Поведение параметра первоначально обладает плавными изменениями без резких скачков и напоминает U-образный характер, что указывает на стабильную динамику процесса деления для данного изотопа. Однако пилообразный характер может позволить усомниться в этом. Однако есть разумное объяснение такому поведению. Подразумевается, что в области 0.14 – 0.22 фм это связано с приобретением оптимальной конфигурации деления с образованием «магических» фрагментов.

Это также подтверждает вынужденное деление $^{238}\text{U}(n,f)$, которое демонстрирует более широкий диапазон изменения радиуса шейки от 1.4 до 2.4 фм. Среднее значение составляет около 1.8 фм, однако характерной особенностью является высокая вариабельность со скачками значений при изменении массовой асимметрии. Особенно заметны максимумы радиуса шейки при больших асимметриях (0.27 – 0.30 фм), что указывает на формирование растянутых конфигураций шейки при образовании сильно асимметричных пар фрагментов.

Спонтанное деление $^{252}\text{Cf}(sf)$ показывает самый широкий диапазон от 1.0 до 2.3 фм при среднем значении около 1.6 фм. Наиболее примечательной особенностью является наличие экстремально малых значений радиуса шейки (менее 1.3 фм) при асимметрии около 0.20, что также говорит о компактной конфигурации шейки размером, сопоставимым с размером нуклона. Вместе с тем наблюдается острый пик радиуса шейки при асимметрии 0.15, что указывает на сложную энергетическую поверхность процесса спонтанного деления.

Анализ корреляций между радиусом шейки и деформационными характеристиками фрагментов выявляет фундаментальные закономерности. Сильная деформация тяжёлого фрагмента, отображаемая тёмными оттенками на цветовой шкале, преимущественно наблюдается при средних значениях радиуса шейки в диапазоне 1.4 – 2.0 фм. Это указывает на то, что высокие деформации тяжёлого фрагмента ограничивают возможные значения радиуса шейки и препятствуют формированию как чрезмерно компактных, так и сильно растянутых конфигураций. Деформация лёгкого фрагмента, отображаемая размером маркеров, демонстрирует принципиально иное поведение. Высокие деформации лёгкого фрагмента (крупные маркеры) встречаются практически во всём диапазоне радиусов шейки, включая экстремальные значения. Это свидетельствует о том, что сильная деформация лёгкого фрагмента не накладывает жёстких ограничений на радиус шейки.

Минимальные радиусы шейки (менее 1.3 фм) наблюдаются исключительно при спонтанном делении ^{252}Cf и соответствуют быстрому разрыву ядра с высвобождением максимальной ПКЕ. Такие компактные конфигурации указывают на оптимальную энергетическую конфигурацию при образовании фрагментов с замкнутыми оболочечными структурами. Максимальные радиусы шейки (более 2.2 фм) характерны для растянутых конфигураций, где разрыв происходит медленно с возможными потерями энергии на

внутреннее трение в ядерной материи. Эти значения преимущественно наблюдаются при индуцированном делении ^{238}U при больших асимметриях.

Важным наблюдением является антикорреляция между деформациями лёгкого и тяжёлого фрагментов, проявляющаяся в редкости одновременного появления крупных тёмных маркеров на графике. Это указывает на то, что доступная деформационная энергия системы распределяется между фрагментами таким образом, что сильная деформация одного фрагмента компенсируется меньшей деформацией другого.

Заключение

В настоящей работе проведён комплексный сравнительный анализ методов определения радиуса шейки ядра в точке его разрыва при делении актинидов, включающий классические полуэмпирические подходы, современные квантово-механические методы и впервые предложенный альтернативный подход, основанный на концепции «холодного» деления.

Классический подход [4] даёт радиус шейки около 2 фм для актинидов, но систематически занижает значения из-за упрощений модели. Современные методы TDDFT[5-7] и BOA [8, 9] предсказывают $r_{\text{ш}} = 1.6 - 2$ фм с высокой точностью, но требуют значительных вычислительных ресурсов.

Разработанный авторами альтернативный метод достигает наивысшей точности в воспроизведении экспериментальных данных по спинам фрагментов [10] и обладает высокой вычислительной эффективностью. Впервые установлена количественная связь между радиусом шейки и спиновыми характеристиками фрагментов через анализ поперечных bending и wriggling колебаний, что позволяет использовать спиновые данные как надёжный инструмент для определения радиуса шейки.

Детальный анализ трёх реакций деления выявил сложные закономерности поведения размеров шейки, связанные с достижением «магических» асимметрий. Обнаружена важная корреляция: сильная деформация тяжёлого фрагмента ограничивает радиус шейки средними значениями, тогда как деформация лёгкого фрагмента допускает экстремальные конфигурации.

Все рассмотренные современные методы демонстрируют согласованность в определении радиуса шейки актинидов в диапазоне 1.5 – 2.2 фм, что подтверждает надёжность результатов. Предложенный подход открывает новые возможности для прогнозирования характеристик продуктов деления и дальнейшего развития теории ядерного деления. Перспективными направлениями являются расширение метода на трансурановые элементы и учёт продольных колебательных мод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bohr, N. The Mechanism of Nuclear Fission / N. Bohr, J.A. Wheeler // Physical Review. – 1939. – Vol. 56, No. 5. – P. 426-450.
2. Bohr, A. Nuclear Structure / A. Bohr, B.R. Mottelson. – New York: Benjamin, 1975. – Vol. 2: Nuclear Deformations. – 740 p.

3. Wagemans, C. The Nuclear Fission Process / C. Wagemans. – Boca Raton: CRC Press, 1991. – 608 p.
4. Rupture of the neck in nuclear fission / K.T.R. Davies, R.A. Managan, J.R. Nix, A.J. Sierk // Physical Review C. – 1977. – Vol. 16, No. 5. – P. 1890-1901.
5. Bulgac, A. Time-dependent density functional theory and the real-time dynamics of Fermi superfluids / A. Bulgac // Annual Review of Nuclear and Particle Science. – 2013. – Vol. 63, No. 1. – P. 97-121. – DOI: 10.1146/annurev-nucl-102212-170631.
6. Fission fragment intrinsic spins and their correlations / A. Bulgac [et al.] // Physical Review Letters. – 2021. – Vol. 126, No. 14. – P. 142502. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.142502.
7. Bulgac, A. Nuclear fission dynamics with time-dependent density functional theory / A. Bulgac, S. Jin, I. Stetcu // Physical Review C. – 2019. – Vol. 100, No. 3. – P. 034612. – DOI: 10.1103/PhysRevC.100.034612.
8. Pomorski, K. Mass distribution of fission fragments within the Born-Oppenheimer approximation / K. Pomorski, F.A. Ivanyuk, B. Nerlo-Pomorska // The European Physical Journal A. – 2017. – Vol. 53, No. 3. – P. 59. – DOI: 10.1140/epja/i2017-12250-5.
9. Fission fragment mass yields of Th to Rf even-even nuclei / Pomorski K. [et al.] // Chinese Physics C. – 2021. – Vol. 45, No. 5. – P. 054109. – DOI: 10.1088/1674-1137/abec69.
10. Spin measurements in fission / J. Wilson, D. Thisse, M. Lebois [et al.] // Nature. — 2021. — Vol. 590, No. 7847. — P. 566–570.
11. Vogt, R. Angular momentum effects in fission / R. Vogt, J. Randrup // Physical Review C. – 2021. – Vol. 103. – P. 014610.
12. Спиновое распределение фрагментов двойного деления атомных ядер с учетом wriggling- и bending-колебаний / С.Г. Кадменский, Д.Е. Любашевский, Д.А. Степанов, А.А. Писклюков // Ядерная физика. – 2024. – Т. 87, № 3. – С. 288-294. – DOI: 10.31857/S0044002724030182.
13. Role of bending mode in generation of angular momentum of fission fragments / Shneidman T.M. [et al.] // Physical Review C. – 2002. – Vol. 65, No. 6. – P. 064302. – DOI: 10.1103/PhysRevC.65.064302.
14. Nuclear structure with the dinuclear model / Adamian G.G. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2004. – Vol. 67. – P. 1701-1708.

REFERENCES

1. Bohr, N. The Mechanism of Nuclear Fission / N. Bohr, J.A. Wheeler // Physical Review. – 1939. – Vol. 56, No. 5. – P. 426-450.
2. Bohr, A. Nuclear Structure / A. Bohr, B.R. Mottelson. – New York: Benjamin, 1975. – Vol. 2: Nuclear Deformations. – 740 p.
3. Wagemans, C. The Nuclear Fission Process / C. Wagemans. – Boca Raton: CRC Press, 1991. – 608 p.
4. Rupture of the neck in nuclear fission / K.T.R. Davies, R.A. Managan, J.R. Nix, A.J. Sierk // Physical Review C. – 1977. – Vol. 16, No. 5. – P. 1890-1901.

5. Bulgac, A. Time-dependent density functional theory and the real-time dynamics of Fermi superfluids / A. Bulgac // *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. – 2013. – Vol. 63, No. 1. – P. 97-121. – DOI: 10.1146/annurev-nucl-102212-170631.
6. Fission fragment intrinsic spins and their correlations / A. Bulgac [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2021. – Vol. 126, No. 14. – P. 142502. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.142502.
7. Bulgac, A. Nuclear fission dynamics with time-dependent density functional theory / A. Bulgac, S. Jin, I. Stetcu // *Physical Review C*. – 2019. – Vol. 100, No. 3. – P. 034612. – DOI: 10.1103/PhysRevC.100.034612.
8. Pomorski, K. Mass distribution of fission fragments within the Born-Oppenheimer approximation / K. Pomorski, F.A. Ivanyuk, B. Nerlo-Pomorska // *The European Physical Journal A*. – 2017. – Vol. 53, No. 3. – P. 59. – DOI: 10.1140/epja/i2017-12250-5.
9. Fission fragment mass yields of Th to Rf even-even nuclei / Pomorski K. [et al.] // *Chinese Physics C*. – 2021. – Vol. 45, No. 5. – P. 054109. – DOI: 10.1088/1674-1137/abec69.
10. Spin measurements in fission / J. Wilson, D. Thisse, M. Lebois [et al.] // *Nature*. — 2021. — Vol. 590, No. 7847. — P. 566–570.
11. Vogt, R. Angular momentum effects in fission / R. Vogt, J. Randrup // *Physical Review C*. – 2021. – Vol. 103. – P. 014610.
12. Spin distribution of binary fission fragments of atomic nuclei taking into account wriggling and bending oscillations / S.G. Kadmsky, D.E. Lyubashevsky, D.A. Stepanov, A.A. Pisklyukov // *Nuclear Physics*. – 2024. – Vol. 87, No. 3. – P. 288-294. – DOI: 10.31857/S0044002724030182.
13. Role of bending mode in generation of angular momentum of fission fragments / Shneidman T.M. [et al.] // *Physical Review C*. – 2002. – Vol. 65, No. 6. – P. 064302. – DOI: 10.1103/PhysRevC.65.064302.
14. Nuclear structure with the dinuclear model / Adamian G.G. [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2004. – Vol. 67. – P. 1701-1708.

О МЕТОДАХ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТОВ НА СИСТЕМАХ SiO_2/Si С ЗАПОЛНЕННЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ Ni и Cu ИОННЫМИ ТРЕКАМИ

ON METHODS OF FORMING CONTACTS ON SiO_2/Si SYSTEMS WITH ION TRACKS FILLED WITH Ni AND Cu NANOCCLUSERS

Белозерцев Ю.В., заместитель директора по науке АО «ВНИИ «Вега», Воронеж, Россия

Belozertsev Yu.V. Deputy Director for Science of VNII Vega JSC, Voronezh, Russia

Омороков Д.Б., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

Omorokov D.B., PhD in Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе рассмотрены плюсы и минусы различных методик формирования контактов на системах SiO_2/Si с ионными треками, заполненными нанокластерами ферромагнитных и немагнитных металлов, представлена схема измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) исследуемых образцов, проведен анализ магнетосопротивления при разных внешних условиях (температура, внешнее магнитное поле) в системах $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с нанопорами и наночастицами Cu и Ni. Установлена температурная зависимость положительного магнетосопротивления, которое практически исчезает при температурах выше 150 К.

Ключевые слова: напыление, наночастицы, нанопоры, ионный трек, методика, магниточувствительные структуры, модификация поверхности, тонкие пленки, вольт-амперная характеристика, барьер Шоттки, электрическая проводимость.

Abstract. The paper considers the advantages and disadvantages of various methods for forming contacts on SiO_2/Si systems with ion tracks filled with nanoclusters of ferromagnetic and non-magnetic metals, presents a scheme for measuring the current-voltage characteristic (CVC) of the samples under study, and analyzes magnetoresistance under different external conditions (temperature, external magnetic field) in $\text{SiO}_2\text{-Si}$ systems with nanopores and Cu and Ni nanoparticles. The temperature dependence of positive magnetoresistance is established, which practically disappears at temperatures above 150 K.

Keywords: sputtering, nanoparticles, nanopores, ion track, technique, magnetically sensitive structures, surface modification, thin films, volt-ampere characteristic, Schottky barrier, electrical conductivity.

Актуальность выбранного направления исследований обусловлена следующими обстоятельствами. Разработка и получение наноматериалов и нанокомпозитов с заданными физико-химическими свойствами является актуальной задачей современного материаловедения [1]. Электрические датчики в большинстве современных систем реагируют на прямое прикосновение, вызывая физическую деформацию контактного уровня. Это приводит к изменениям в электрической емкости. Однородность ответа на различные области ограничивает чувствительность таких систем. При создании датчика, чувствительного к электромагнитным полям, могут быть использованы наноструктуры на поверхности системы SiO_2/Si с латентными треками [2, 3]. Особый интерес для промышленности представляют новые типы спинтронных материалов и структур, которые можно использовать в преобразователях сигналов: магниторезистивных сенсорах, датчиках перемещений, устройствах памяти и др. Для создания спинтронных приборов необходимы структуры из магнитных наночастиц или их чередующихся слоев, которые могут обладать гигантским либо туннельным магнитосопротивлением и функционируют при достаточно высоких частотах [4, 5]. Исследования в этом направлении позволят спрогнозировать отклик магнитосопротивления на изменение внешних условий. Очень важным фактором, влияющим на ВАХ образцов, является качество электрических контактов и, следовательно, их электропроводность.

Отработаны следующие варианты методики формирования контактов:

1. Прижимные контакты – непосредственное подведение электродов к поверхности изучаемых образцов, с последующей фиксацией их при помощи механического воздействия (прижима). Для изготовления электродов выбирались материалы, обладающие большим модулем упругости (высокоуглеродистая сталь, бериллиевая бронза).

2. Нанесение контактола из индий-галлиевой эвтектики – предполагает нанесение на образцы с обеих сторон. На образцах $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Cu}$ и $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}$ контакты формировали с соблюдением следующего принципа: с тыльной стороны Si наносили контактол из индий-галлиевой эвтектики, а на лицевую поверхность (со стороны SiO_2 с металлом в ионных треках) обязательно напыляли пленку алюминия, а на неё наносили контактол.

3. Нанесение контактола из серебряной эвтектики – предусматривает нанесение на образцы с обеих сторон серебряной эвтектики и последующую сушку при комнатной температуре в течение 12 часов.

4. Напыление алюминия в атмосфере инертного газа – на структуру со стороны Si наносился контактол из индий-галлиевой эвтектики, а на поверхность со стороны SiO_2 с ионными треками, заполненными металлами, методом ионно-лучевого напыления при температуре подложки 400°C напылялся алюминий.

5. Нанесение индия при помощи ультразвуковой пайки – индиевые контакты наносились на образцы с обеих сторон при помощи ультразвуковой пайки (с использованием ультразвукового паяльника УЗП2-0,025 с генератором типа УЗГ-3-04).

Результат анализа опробованных методик показал, что контактол из индий-галлиевой эвтектики, нанесенный на поверхность образца, со временем либо стирается, либо растекается по поверхности, в результате чего затрудняется проведение серии измерений на одном образце. При использовании серебряной эвтектики имеет место плохая адгезия с поверхностью образца, в результате чего наблюдается высокое сопротивление контакта и, кроме того, возможно самопроизвольное отслаивание контактов от поверхности. Использование ионно-лучевого напыления алюминия в атмосфере инертного газа позволяет получать хорошую повторяемость результатов и механическую устойчивость контактов при проведении серии экспериментов на одном образце, однако, при применении данного метода возможно повреждение исследуемой структуры при напылении алюминия на сильно разогретую подложку (образец). Как наиболее оптимальный, выбран метод нанесения индиевых контактов с помощью ультразвука в связи с тем, что он позволяет получить хорошую омичность, повторяемость результатов и механическую устойчивость контактов при проведении серии экспериментов.

Методика нанесения индиевых контактов при помощи ультразвука отличается простотой, дешевизной, меньшим временем, затрачиваемым на формирование контактов, а также является не разрушающей в отношении исследуемых структур. Кроме того, при использовании данной методики появляется возможность получения контактов при помощи пайки, что необходимо при проведении дальнейших исследований, предусматривающих изучение температурных и магниторезистивных характеристик.

Таким образом, для измерений ВАХ использовали индиевые контакты, которые наносили на образцы со стороны матрицы SiO_2 , содержащей поры, заполненные нанокластерами меди и никеля. Измерения проводили в режиме постоянного напряжения в интервале от - 7 до 7 В с шагом 0,5 В с последующей регистрацией тока, протекающего через заполненные металлом треки и контактирующего с ними кремния. Схема измерения представлена на рисунке 1.

Измерения ВАХ экспериментальных образцов в интервале температур от 1,8 до 310 К проводили с помощью 2-х зондового потенциометрического метода на измерительной системе, содержащей рефрижератор замкнутого цикла. Исследования ВАХ структуры $\text{n-Si/SiO}_2/\text{Ni}$ проводились как в магнитном поле $B = 8$ Тл, направленном перпендикулярно поверхности образца, так и без поля.

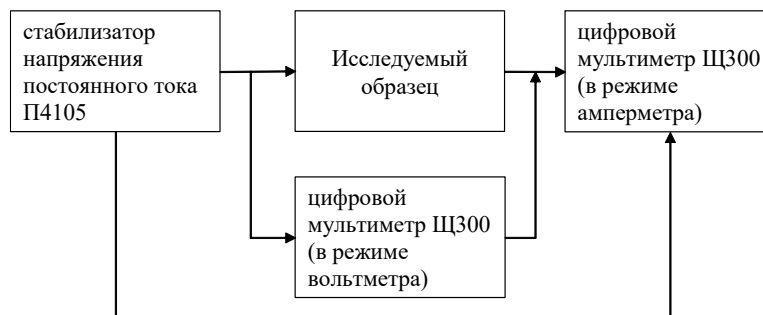


Рисунок 1 – Схема измерения ВАХ исследуемых образцов

Результаты измерений приведены на рисунке 2 для меди и рисунке 3 для никеля. Как видно из рисунков, экспериментальные зависимости качественно подобны друг другу, но имеют более ярко выраженный характер при температуре жидкого азота (Рис. 2а и 3а), чем при комнатной температуре (Рис. 2б и 3б), т.е. при понижении температуры уменьшается и проводимость всей системы.

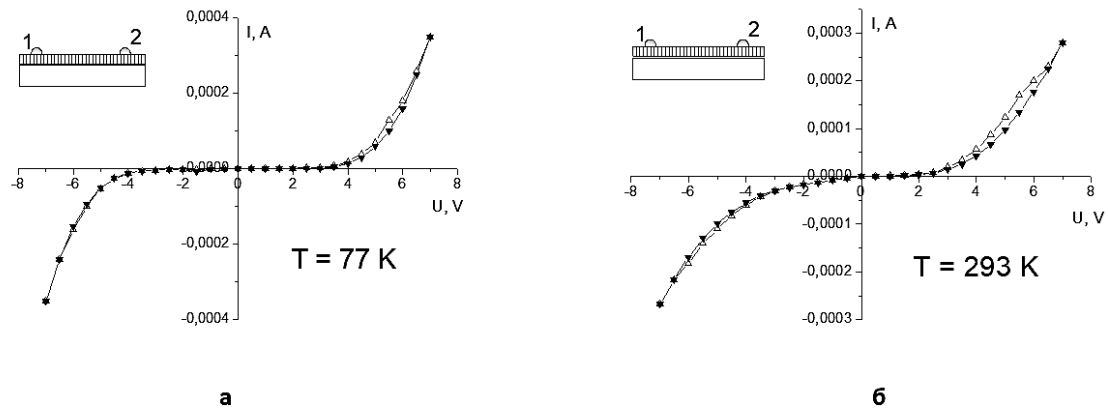


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики образцов с нанокластерами меди в ионных треках при температуре жидкого азота (а) и комнатной температуре (б). На вставках приведены схемы расположения контактов

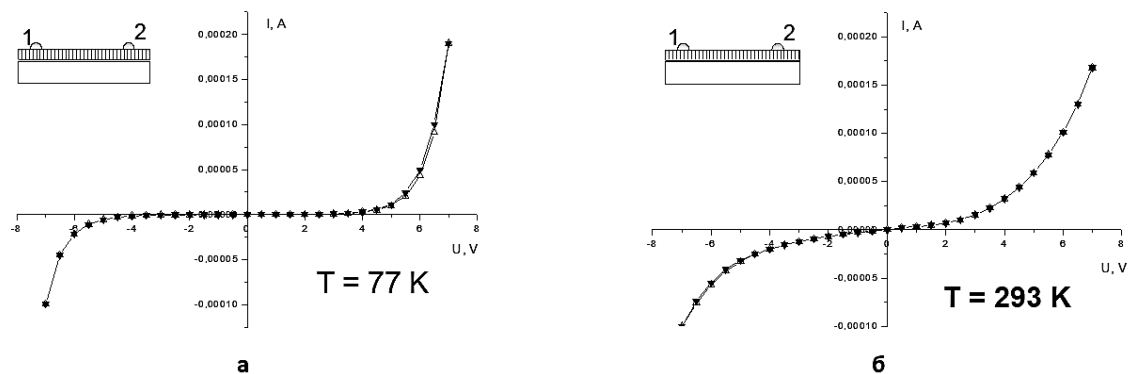


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики образцов с нанокластерами никеля в ионных треках при температуре жидкого азота (а) и комнатной температуре (б). На вставках приведены схемы расположения контактов

Анализ экспериментальных зависимостей в температурных интервалах от 1,8 до 310 К и от 25 до 310 К (Рис. 4) подтверждает данный факт.

При повышении температуры сопротивление барьера Шоттки понижается, и при температурах от 30 до 220 К его величина порядка 10^6 Ом, а в области комнатных температур – порядка 10^5 Ом. Из ВАХ системы n-Si/SiO₂/Ni в широком интервале температур в магнитном поле $B = 8$ Тл видно, что при температурах от 1,8 до 10 К наблюдаются «биения» напряжения (Рис. 4в).

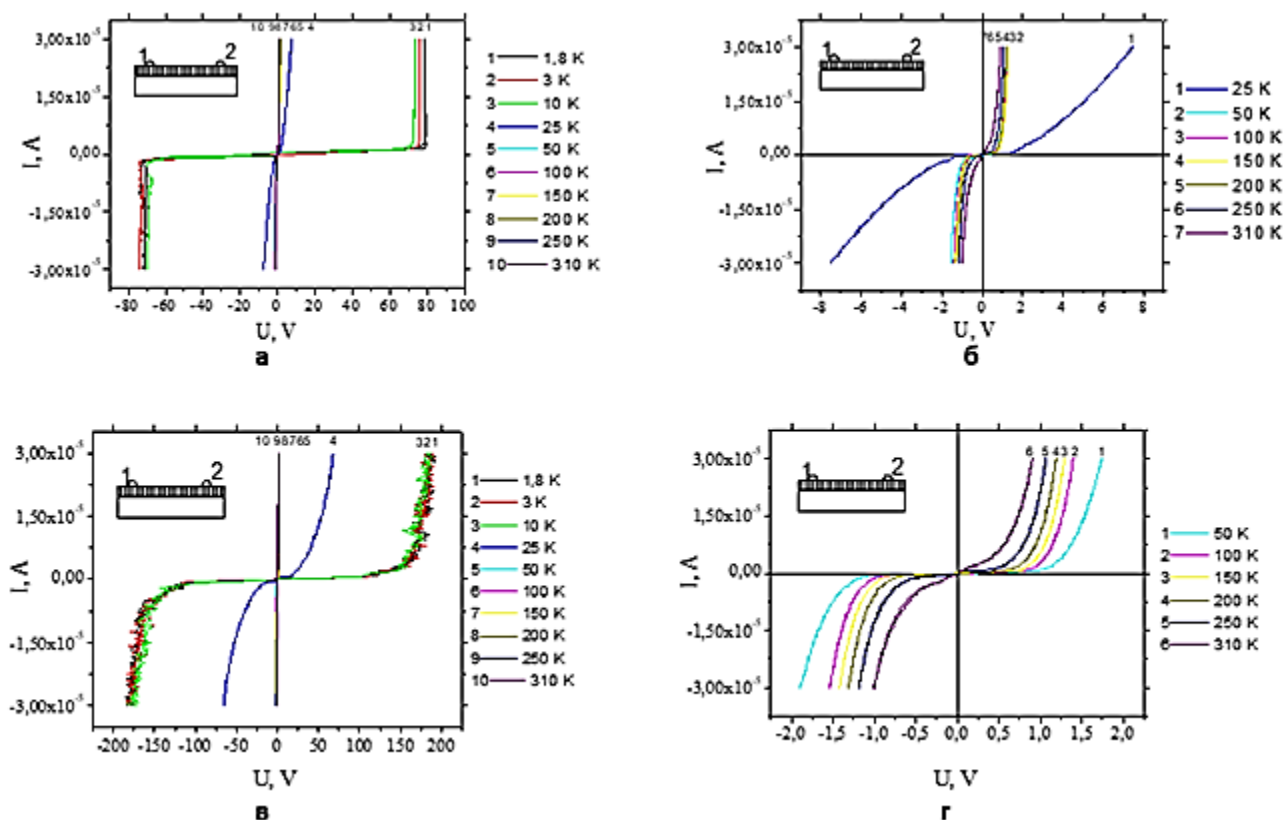


Рисунок 4 – ВАХ структуры n-Si/SiO₂/Ni без поля (а, б) и в магнитном поле $B = 8$ Тл (в, г) в интервале температур 1,8-310 °K (а, в), 25-310 °K (б) и 50-310 °K (г). На вставках приведены схемы расположения контактов

Сравнение поведения исследуемых структур в магнитном поле $B = 8$ Тл и без поля для некоторых температур представлено на рисунке 5.

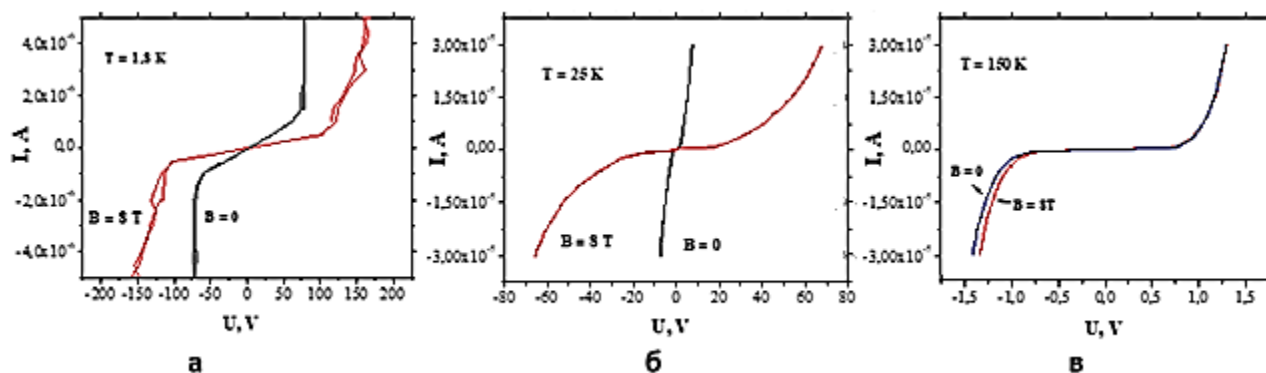


Рисунок 5 – Сравнение ВАХ структуры n-Si/SiO₂/Ni в магнитном поле $B = 8$ Тл и без поля при температурах 1,8 °K (а), 25 °K (б) и 150 °K (в)

Таким образом, анализ экспериментальных данных свидетельствует о температурной зависимости положительного магнетосопротивления, которое практически исчезает при температурах выше 150 К. Качественное изменение магнетосопротивления остается неизменным для наносистем, отличающихся морфологическими и структурными параметрами, но абсолютные значения достигают максимума только для морфологически анизотропных кластеров, имеющих фазовый состав и субструктуру компактных агломератов

нанокристаллов с высокой плотностью дефектов типа двойниковых границ по плоскости (111) ГЦК решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Создание сенсоров магнитного поля на основе композиционных наноструктур с использованием технологии ионных треков / А.А. Столяров, В.Е. Сахаров, Д.Б. Оморок, Н.Ю. Евсикова // Теория и техника радиосвязи. – 2024. – № 4. – С. 76-81.
2. Оморок, Д.Б. Электрофизические свойства металлического осадка в латентном треке систем SiO₂/Si/ металл / Д.Б. Оморок, Н.Ю. Евсикова // Физические основы современных технологий : материалы Международной научно-методической конференции, Воронеж, 25 октября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 47-51.
3. Оморок, Д.Б. Особенности осаждения металла на подложку SiO₂/Si с латентными треками / Д.Б. Оморок, Н.Ю. Евсикова // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : Материалы VIII Международной научной конференции, Донецк, 25-27 октября 2023 года. – Донецк: Донецкий государственный университет, 2023. – С. 142-145.
4. Наноструктуры систем Si/SiO₂/металл с треками быстрых тяжелых ионов / С.Е. Демьянов, Е.Ю. Каниуков, А.В. Петров, Е.К. Белоногов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1262-1264.
5. Сахаров, В.Е. Формирование наноструктур на поверхности системы SiO₂/Si с латентными треками для преобразователей сигналов / В.Е. Сахаров, Д.Б. Оморок, Н.Ю. Евсикова // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 4. – С. 55-59.

REFERENCES

1. Creation of magnetic field sensors based on composite nanostructures using ion track technology / A.A. Stolyarov, V.E. Sakharov, D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Theory and technology of radio communication. – 2024. – No. 4. – P. 76-81.
2. Omorokov, D.B. Electrophysical properties of metal deposits in the latent track of SiO₂ / Si / metal systems / D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Physical foundations of modern technologies: materials of the International scientific and methodological conference, Voronezh, October 25, 2023. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. – P. 47-51.
3. Omorokov, D.B. Features of metal deposition on a SiO₂/Si substrate with latent tracks / D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Donetsk readings 2023: education, science, innovation, culture and challenges of our time: Proceedings of the VIII International Scientific Conference, Donetsk, October 25-27, 2023. – Donetsk: Donetsk State University, 2023. – P. 142-145.
4. Nanostructures of Si/SiO₂/metal systems with tracks of fast heavy ions / S.E. Demyanov, E.Yu. Kaniukov, A.V. Petrov, E.K. Belonogov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2008. – Vol. 72, No. 9. – P. 1193-1195. – DOI 10.3103/S1062873808090050.
5. Sakharov, V.E. Formation of nanostructures on the surface of the SiO₂/Si system with latent tracks for signal converters / V.E. Sakharov, D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Theory and technology of radio communication. – 2023. – No. 4. – P. 55-59.

**ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РОСТА
ДРЕВОСТОЕВ В СВЕТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ
(ЛОКАЛЬНЫХ) ТАБЛИЦ ХОДА РОСТА**

**ECOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL MODEL OF TREE STANDS GROWTH DYNAMICS
IN LIGHT OF THE LOCAL GROWTH COURSE TABLES USE**

Лисицын В.И., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Lisitsyn V.I., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Матвеев Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Matveev N.N., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Хворых А.М., аспирант, преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Khvorykh A.M., Postgraduate student, College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе проведено исследование влияния географического расположения регионов Евразии и типологии леса на эколого-физиологическое моделирование (ЭФМ) динамики роста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Фактический материал нами взят из таблиц хода роста (ТХР), представленный в монографиях В.А. Усольцева. Установлено, что бонитетная шкала обоснованна с точки зрения термодинамического подхода. Получено, что значение параметра ЭФМ, который ответствен за скорость расхода ресурса не зависит ни от географического региона, ни от типологии лес, а является универсальной константой, определяющий бонитет №1 сосновых насаждений. Значение аллометрического параметра,

выражающего связь биомассы насаждения и площади поверхности, имеет тенденцию к независимости от расположения региона для Центра Европейской части России. Показана необходимость проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Ключевые слова: таблицы хода роста (ТХР), бонитетная шкала, эколого-физиологическая модель (ЭФМ), параметры ЭФМ, естественный древостой.

Abstract. In this paper we investigated the influence of geographical location of Eurasian regions and forest typology on the ecological-physiological modeling (EPM) of growth dynamics of pine (*Pinus sylvestris* L.). The actual material was taken from the growth progress tables (GTR) presented in the monographs of V.A. Usoltsev. It has established that the bonitet scale has justified from the point of view of thermodynamic approach. It has obtained that the value of the EFM parameter, which is responsible for the rate of resource consumption does not depend neither on the geographical region, nor on the forest typology, but is a universal constant that determines the bonitet No. 1 of pine plantations. The value of the allometric parameter expressing the relationship between plantation biomass and surface area tends to be independent of the region location for the Center of European part of Russia. The necessity of further research in this direction has shown.

Keywords: growth progress tables (GTR), bonitet scale, ecological-physiological model (EPM), EPM parameters, natural stand.

В настоящее время существуют многочисленные классификации моделей роста древостоев. В целом, они сводятся к двум большим группам. В первую группу можно включить эмпирические модели (ЭМ), во вторую – эколого-физиологические (ЭФМ) или теоретические модели. Используя феноменологический подход, в эмпирическом моделировании усредняется большое количество результатов наблюдений, и оно не требует наличия представления о внутренних механизмах, которые действуют внутри экосистемы. Эколого-физиологическое моделирование базируется на общих представлениях о функционировании лесных экосистем (к примеру, записанных в виде балансовых уравнений энергии и/или энтропии), которые позволяют выявить существенные закономерности их развития. Эти два подхода в настоящее время не следует противопоставлять, так как они во многом дополняют друг друга. Сильной стороной эмпирического моделирования является точность воспроизведения существующих таблиц хода роста (ТХР) древостоев, а также то обстоятельство, что с решением стандартных задач лесной таксации успешно справляются эмпирические модели, особенно в виду их простоты применения [1]. В то же время несомненным преимуществом ЭФМ является общность полученных результатов в том смысле, что параметры ЭФМ отражают физиологические особенности роста насаждения, и это позволяет претендовать на раскрытие новых свойств, в том числе в существующей типологии ТХР.

В практическом лесоводстве при построении ТХР, не умаляя достоинств альтернативных шкал, главенствующая роль принадлежит бонитетной шкале. В основе построения ТХР лежит эргодическая гипотеза, согласно которой для любых физических величин, характеризующих данную физическую систему, средние значения по времени точно совпадают со средними значениями по соответствующему статистическому ансамблю (микростатистическому для изолированной системы, каноническому или большому

каноническому для открытой системы) [2]. Для произвольной физической системы эргодическая гипотеза не доказана. Однако, если не следовать излишней математической строгости при изложении этого вопроса, то можно допустить, что эргодичность лесной экосистемы будет сохраняться на протяжении достаточно большого временного промежутка роста древостоя. Основным положением при разработке ЭФМ динамики роста [3] является доказательство наличия стационарного режима при достижении древостоем максимального значения биомассы. При этом в [3] подчеркивалось, что стационарный режим, при котором достигается равенство потоков энергии, энтропии и других величин, не происходит одномоментно, а занимает довольно большой промежуток времени. Именно это обстоятельство позволяет надеяться на то, что эргодическая гипотеза может применяться при построении ТХР и служить теоретическим обоснованием их построения.

В настоящее время для составления ТХР используется большое количество шкал. Причем так называемый исторический метод построения ТХР [4] определяется средними значениями параметров древостоя по времени, тогда как любой из нижеперечисленных методов является методом усреднения по ансамблю: а) метод указательных насаждений Гартинга (аналитический); б) метод полосок (Баура (статистический); в) метод повторных пересчетов Гейера (комбинированный); г) типологический метод и т.д. [4]. Достоинства и недостатки этих методов составления ТХР специалистам хорошо известны. Выбор того или иного способа зависит от многих факторов, в том числе от целей исследования, от ресурсов, имеющихся у исследователя, от количества пробных площадей и т.д.

В предыдущих работах [3, 5, 6] для апробации метода ЭФМ нами были использованы, в основном, общие ТХР, представленные в таблицах А.З. Швиденко и др. [7]. Задача настоящей работы – применить ЭФМ, используя местные (локальные) ТХР. Такой выбор преследовал следующие цели:

1) показать, что, разработанная нами ЭФМ, может быть применена для описания динамики хода роста, которая представлена местными ТХР, при этом точность воспроизведения этих ТХР вполне соответствует точности эмпирических моделей [1];

2) выявить влияние географического расположения древостоев на характеристики динамики роста;

3) исследовать закономерности в изменениях параметров ЭФМ в зависимости от региона произрастания древостоя, а также от типологии насаждения.

Информация о ТХР и таблицы производительности лесных экосистем взята из монографий В.А. Усольцева [8, 9].

Для большей ясности дальнейшего изложения результатов расчета и их обсуждения приведем основные моменты ЭФМ динамики роста. Как уже указывалось выше, основой модели является установление времени достижения максимального значения биомассы насаждения t_{maxr} . Как правило, в вышеуказанных монографиях данные о значении t_{maxr} в ТХР отсутствуют, а эти значения в методе являются актуальными. Поэтому значения t_{maxr} были получены нами экстраполяцией данных самых больших значений биомассы при соответствующих значениях времени, так как они имели вид функции от времени, которая стремится к максимальному значению. Математически обоснованной экстраполяция считается, если она дает значения функции, выходящее за пределы экстраполирования на

значение порядка временного «шага». К сожалению, не всегда приходится строго следовать «указаниям» математики при определении значения времени t_{max} .

Среднее значения биомассы одного дерева m считаются по формуле $m=M/N$, где M – биомасса древостоя в данный момент времени, N – число деревьев на гектар в тот же момент времени. Для расчета биомассы отдельного дерева используется балансовое уравнение Берталанффи [10]:

$$\frac{dm}{dt} = fgm^q - rm \quad (1)$$

В уравнении (1) f – удельная скорость поглощения ресурса; r – удельная скорость расхода ресурса; g и q – аллотропические параметры модели, которые выражают связь биомассы с поверхностью особи. Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$m(t) = m_{\infty} (1 + b \exp(-at))^p, \quad (2)$$

где $b = \left(\frac{m_0}{m_{\infty}}\right)^{1-q} - 1$; $a = r(1 - q)$; $p = 1/(1 - q)$.

Для определения числа деревьев на гектар нами было получено следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN(t)}{dt} = (f_1 g_1 m_1^{q_1-1} - r_1) N, \quad (3)$$

где f_1 , g_1 , q_1 , r_1 – параметры, имеющие смысл, аналогичный соответствующим параметрам уравнения (1); m_1 – функция, зависящая от времени и удовлетворяющая уравнению (1) с измененными параметрами. Решение уравнения (3) имеет следующий вид:

$$N(t) = N_0 \frac{(1+b_1)^{p_1}}{(1+b_1 \exp(-a_1 t))^{p_1}}, \quad (4)$$

где $b_1 = \frac{N_{\infty}}{N_0} - 1$; $a_1 = r_1(1 - q_1)$; $p_1 = 1/(1 - q_1)$.

Параметры модели b_1 и b определяются из начальных (m_0, N_0) и конечных значений (m_{∞}, N_{∞}). Начальные значения (m_0, N_0), согласно [3], определяются из ТХР, а конечные значения (m_{∞}, N_{∞}) подлежат определению в результате процедуры оптимизации. В этой же процедуре находятся и значения параметров q и r . В результате мы имеем 4 независимых параметра для определения функций $m(t)$ и $N(t)$.

Расчеты проводились для древостоев сосны первого бонитета, ТХР которых даны в монографии [8]. Результаты сведены в таблицы 1, 2 и 3. В таблице 1 представлены сосняки Центра Европейской части России, Белоруссии и некоторых стран Западной Европы, в таблице 2 – регионов Урала и Севера Европейской части России, в таблице 3 – Сибирских регионов РФ и Казахстана. В таблицах указаны данные: а) регион; б) тип древостоя сосны, автор и год получения ТХР (эти сведения полностью соответствуют данным монографии [8]); в) значения параметров m_{∞}, N_{∞} , q , r , t_{max} и критерия Неша-Сатклиффа [11] M_m , M_N , M_M для рассчитанных значений биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар и биомассы древостоя в целом соответственно.

Таблица 1 – Результаты расчетов по ЭФМ для регионов Центральной России и Европы

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	m_{∞} , тонн	N_{∞} , 1/га	q	r	t_{max} , лет	M_m	M_N	M_M
1	Московская обл.	Сомкнутые сосняки, Козловский, 1967	1,26	260	0,7	0,05	162	0,999	0,997	0,980
2	Воронежская обл. и др. обл. ЦЧР	Максимально продуктивные сосняки, Кирюков, 1982	0,99	270	0,7	0,05	140	0,989	0,998	0,962
3	Белоруссия	Модальные сосняки, орликовый и черничные типы, Багинский, 1984	1,7	187	0,7	0,05	135	0,994	0,999	0,983
4	Европейская Россия, Южная тайга	Смешанные леса модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1,28	196	0,7	0,05	305	0,989	0,998	0,991
5	Белоруссия	Нормальные сосняки, орликовый, мшистый и черничный типы, Багинский, 1984	1,5	230	0,75	0,05	240	0,995	0,995	0,987
6	СНГ	Нормальные сосняки, Загреев, 1993	1,43	219	0,7	0,05	236	0,986	0,996	0,951
7	Швеция	Нормальные сосняки, Maas, 1911, цит. по Орлову, 1928	1,05	280	0,7	0,05	188	0,979	0,992	0,965
8	Северо- Германская низменность	Нормальные сосняки, Schwappach, 1896, цит. по Орлову 1928	3,5	164	0,8	0,05	173	0,989	0,996	0,994
9	Германия	Нормальные сосняки при умеренном разреживании, Wiedemann, Schober, 1957	1,76	140	0,7	0,05	143	0,996	0,979	0,995
10	Германия	Нормальные сосняки умеренного прореживания, Gehrhardt, 1921	1,87	165	0,715	0,05	192	0,991	0,999	0,922
11	Европейская Россия, южная тайга	Смешанные леса, модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1,68	280	0,7	0,05	139	0,993	0,999	0,989

Таблица 2 – Результаты расчетов по ЭФМ для регионов Севера Европейской России и Урала

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	m_{∞} , тонн	N_{∞} , 1/га	q	r	t_{max} , лет	M_m	M_N	M_M
1	Средний Урал	Нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1,33	240	0,7	0,05	206	0,993	0,999	0,957
2	Средний Урал	Сосняки припышминских боров, Чудников, Козловский и др., 1955	1,3	315	0,75	0,051	150	0,985	0,999	0,976
3	Северо-Восток Европейской России (Коми)	Сомкнутые сосняки, Огородов, 1967	1,4	190	0,75	0,051	195	0,996	0,998	0,991
4	Архангельская обл.	Сомкнутые сосняки с березой, Неволин, 1967	0,9	290	0,7	0,05	163	0,976	0,997	0,975
5	Карелия и Мурманская обл.	Модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1,37	195	0,7	0,05	308	0,991	0,998	0,922
6	Карелия и Мурманская обл.	Нормальные сосняки, 1996	1,23	303	0,7	0,05	283	0,985	0,991	0,991
7	Средний Урал	Сомкнутые сосняки, Милованович, 1967	1,51	197	0,72	0,05	285	0,991	0,998	0,971

Таблица 3 – Результаты расчетов по ЭФМ регионов Сибири (РФ) и Казахстана

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	m_{∞} , тонн	N_{∞} , 1/га	q	r	t_{max} , лет	M_m	M_N	M_M
1	Казахстан	Казахский мелкосопочник, нормальные сосняки	0,98	347	0,71	0,055	190	0,999	0,992	0,975

2	Западная Сибирь	Средняя и южная тайга, нормальные сосняки, Швиденко, 1996	1,38	193	0,7	0,045	190	0,999	0,994	0,953
3	Курганская обл.	Сомкнутые сосняки, Ходот, 1967	1,67	199	0,74	0,05	206	0,989	0,997	0,989
4	Южное Зауралье	Бассейн реки Тавда, майниково-брусничный тип, Гаврилов, 1975	1,37	270	0,75	0,05	173	0,999	0,984	0,991
5	Приангарье	Модальные сосняки, чернично-зеленомошный тип, Суприянович, Семечкин, 1976	0,97	255	0,8	0,049	220	0,998	0,978	0,945
6	Центральная и Восточная Сибирь	Таежная лесостепная зона, Швиденко, 1996	1,62	205	0,7	0,05	260	0,988	0,999	0,908
7	Казахстанское Прииртышье	Ленточные боры, нормальные сосняки, Швиденко, 1996	0,93	303	0,7	0,051	160	0,967	0,982	0,990

Результаты расчета однозначно свидетельствуют о том, что ЭФМ дает хорошее согласие с ТХР, так как значение критерия качества Нэша-Сатклифа составляет, как правило, не менее 0,99, а для некоторых древостоев достигает трех и даже четырех девяток после запятой. Расчет отклонения теоретических значений всех трех величин (биомассы среднего дерева, числа деревьев на гектар и общей биомассы древостоя) от соответствующих экспериментальных значений не превышает 5% – 7%, что вполне согласуется с расчетами по эмпирическим моделям (см., например, [1]).

Параметр модели r остается постоянным для всех регионов Евразии, он равен 0,05 для 80% регионов, а для остальных регионов отличие от 0,05 равно 0,001. Исключение представляют два региона – Архангельская область и Западная Сибирь. Известно, что ЭФМ имеет термодинамическое обоснование [1], поэтому предполагаем, что выводы, сделанные по результатам расчета модели термодинамически обоснованны, т.е. бонитетная шкала, с точки зрения термодинамического подхода, как вывод из результатов расчета по ЭФМ, также обоснованна термодинамически, а скорость расхода ресурса является экологической постоянной для всех древостоев регионов Евразии. Аллометрический параметр модели q также имеет тенденцию к независимости от географического положения региона, хотя она

менее ярко выражена. Для более 50% регионов значение $q = 0,7$, для остальных – отличие не превышает 0,05. Необходимо отметить, что постоянство этого параметра более очевидно для регионов Центральной России и Европы (Таблица 1), тогда как для регионов Севера Европейской России, Урала, Сибири (РФ) и Казахстана значение параметра q может как превысить 0,75, так и быть ниже этого уровня. Следует сказать, что аллометрический параметр q неоднократно измерялся и связан с листовым индексом [12], поэтому его определение имеет актуальный характер. Для подтверждения постоянства параметра q и независимости параметра r от географического положения необходимо проводить дальнейшие исследования как для сосняков других бонитетов, так и для других пород древостоев.

Значения следующей пары варьлируемых параметров m_∞ и N_∞ не постоянны, и для многих регионов они достаточно сильно различаются. Этот факт не является неожиданностью, так как ТХР показывают достаточно сильное различие и в биомассах древостоя, и в числе деревьев на гектар, если брать эти значения в одно и то же время. Однако для ЭФМ знание этих параметров имеет важное значение, так как они определяют предельное (в модели) значение биомассы насаждения $M_\infty = m_\infty N_\infty$. Если в процессе оптимизации было получено, что предельное значение биомассы насаждения меньше максимального значения, то модель может описывать «немонотонную» зависимость при больших временах древостоя.

Таким образом, проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. ЭФМ, может быть применена для описания динамики хода роста, которая представлена местными ТХР.
2. Географическое положение регионов и типология леса практически не оказывает влияния на значения параметров r и q .
3. Бонитетная шкала имеет термодинамическое обоснование, о чем говорит независимость параметра r от типологии леса и от географического расположения региона.
4. Отсутствие закономерности в поведении параметров m_∞ и N_∞ в зависимости от региона вполне объяснимо, так как экспериментальные данные о биомассе насаждения и числе деревьев на гектар сильно различаются в зависимости от региона.
5. Необходимо продолжить исследование в этом направлении для подтверждения полученных закономерностей.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ВГЛТУ, выделенного в 2025 г. на проект «Влияние условий произрастания древесной растительности на термодинамические характеристики древостоев»; руководитель – профессор Матвеев Н.Н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев, А.В. Динамическая модель роста и производительности сосновых древостоев (*Pinus sylvestris* L.) Унженской низменности / А.В. Лебедев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3(55). – С. 127-151. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
2. Математическая энциклопедия: Гл. ред. И.М. Виноградов, т. 5. Слу – Я. – Москва: Советская энциклопедия, 1984. – С. 1011.

3. Лисицын, В.И. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода / В.И. Лисицын, М.В. Драпалюк, Н.Н. Матвеев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 3(387). – С. 213-225. – DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-213-225.
4. Таксация леса. Ход роста насаждений : учебное пособие / И.С. Сальникова, Т.С. Воробьева, З.Я. Нагимов, С.С. Зубова, О.Н. Орехова, А.В. Суслов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – 130 с
5. Lisitsyn, V.I. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics / V.I. Lisitsyn, N.N. Matveev, V.V. Saushkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 09-10 сентября 2021 года. – Voronezh, 2021. – P. 12042. – DOI 10.1088/1755-1315/875/1/012042.
6. Лисицын, В.И. Динамика роста хвойных древостоев *Pinus sylvestris* L., *Picea Abies* (L.) Н. Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour: модифицированная модель / В.И. Лисицын, Т.П. Новикова, А.И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 2(54). – С. 54-69. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4.
7. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных есообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильсон, Ю.И. Булуй. – 2-е издание, дополненное. – Москва : Федеральное агентство лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, 2008. – 886 с.
8. Усольцев, В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 762 с.
9. Усольцев, В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии : [монография : электронная база данных] / В.А. Усольцев ; Российская академия наук, Уральское отделение, Ботанический сад. – 4-е дополненное электронное издание. – Екатеринбург, 2023. – <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
10. Bertalanffy, L. v. Biophysik des Fließgleichgewichts / L. von Bertalanffy. – Vieweg, Braunschweig, 1953. – 60 p.
11. Nash, J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles / J.E. Nash, J.V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, Iss. 3. – P. 282-290.
12. Корзухин, М.Д. Построение кривых хода роста древостоев на основе обобщенной модели Берталанфи по данным государственного лесного реестра / М.Д. Корзухин // Лесоведение. – 2019. – № 2. – С. 105–114.

REFERENCES

1. Lebedev, A.V. Dynamic model of growth and productivity of pine stands (*Pinus sylvestris* L.) of the Unzha Lowland / A.V. Lebedev // Forestry journal. – 2024. – Vol. 14, No. 3 (55). – P. 127-151. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
2. Mathematical encyclopedia: Ed. I.M. Vinogradov, v. 5. Slu – Ya. – Moscow: Sovetskaya Encyclopedia, 1984. – P. 1011.

3. Lisitsyn, V.I. Modeling the dynamics of tree stand growth based on the thermodynamic approach / V.I. Lisitsyn, M.V. Drapalyuk, N.N. Matveyev // News of higher educational institutions. Forestry journal. – 2022. – No. 3(387). – P. 213-225. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-3-213-225.
4. Forest taxation. Growth course of stands: a tutorial / I.S. Salnikova, T.S. Vorobyova, Z.Ya. Nagimov, S.S. Zubova, O.N. Orekhova, A.V. Suslov; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forest Engineering University. – Ekaterinburg: USFTU, 2020. – 130 p.
5. Lisitsyn, V.I. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics / V.I. Lisitsyn, N.N. Matveev, V.V. Saushkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, September 09–10, 2021. – Voronezh, 2021. – P. 12042. – DOI 10.1088/1755-1315/875/1/012042.
6. Lisitsyn, V.I. Growth dynamics of coniferous stands *Pinus sylvestris* L., *Picea Abies* (L.) H. Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour: a modified model / V.I. Lisitsyn, T.P. Novikova, A.I. Novikov // Forestry Engineering Journal. – 2024. – Vol. 14, No. 2(54). – P. 54-69. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4.
7. Tables and models of the growth and productivity of plantings of the main forest-forming species of Northern Eurasia: normative and reference materials / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepashchenko, S. Nilson, Yu.I. Buluy. – 2nd edition, supplemented. – Moscow: Federal Forestry Agency of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 2008. – 886 p.
8. Usoltsev, V.A. Forest phytomass in Northern Eurasia: standards and geographic elements / V.A. Usoltsev. – Ekaterinburg: Publishing house of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. – 762 p.
9. Usoltsev, V.A. Biomass and primary production of Eurasian forests: [monograph: electronic database] / V.A. Usoltsev; Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Botanical Garden. – 4th supplemented electronic edition. – Ekaterinburg, 2023. – <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
10. Bertalanffy, L. v. Biophysik des Fließgleichgewichts / L. von Bertalanffy. – Vieweg, Braunschweig, 1953. – 60 p.
11. Nash, J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles / J.E. Nash, J.V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, Iss. 3. – P. 282-290.
12. Korzukhin, M.D. Construction of growth curves of forest stands based on the generalized Bertalanffy model using data from the state forest register / M.D. Korzukhin // Forest Science. – 2019. – No. 2. – P. 105-114.

**ВЛИЯНИЕ ГЕОГРАФИИ РЕГИОНА НА КАЧЕСТВО СОСНОВОГО
ДРЕВОСТОЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭКСЭРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**
INFLUENCE OF REGIONAL GEOGRAPHY ON THE QUALITY OF PINE STAND FROM
THE POINT OF THE EXERGETIC APPROACH VIEW

Лисицын В.И., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Lisitsyn V.I., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Матвеев Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Matveev N.N., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Полумиско А.А., аспирант, преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Polumisko A.A., Postgraduate student, College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе проведено исследование влияния географического расположения регионов Евразии и типологии леса на расчет эксергии и энтропии сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Фактический материал был взят из таблиц хода роста (ТХР), представленных в монографиях В.А. Усольцева. Установлено, что рейтинг регионов по значению эксергии древостоев возглавляют регионы Центра Европейской части России и Белоруссия. Получено, что значение энтропии, в среднем приходящееся на одно дерево, имеет такую же тенденцию в следовании регионов, что и рейтинг по эксергии, но с небольшими отклонениями. Указано, что необходимо проведение дальнейших исследований, а также уточнение существующих ТХР и разработка новых ТХР для других пород насаждений, находящихся в разных условиях произрастания.

Ключевые слова: регионы Евразии, энтропия, эксергия, бонитет, таблица хода роста, эколого-физиологическая модель.

Abstract. In this paper we investigated the influence of geographical location of Eurasian regions and forest typology on the calculation of entropy and exergy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). The actual material was taken from the growth progress tables (GTR) presented in the monographs of V.A. Usoltsev. It has found that the rating of regions by the value of stand exergy is headed by the regions of the Centre of the European part of Russia and Belarus. It has obtained that the entropy value per tree has the same tendency in the regions as the exergy ranking, but with small deviations. It is indicated that it is necessary to carry out further research, as well as to refine the existing GTRs and develop new GTRs for other species of plantations under different growing conditions.

Keywords: Eurasian regions, entropy, exergy, bonitet, growth progress table, ecological-physiological model.

В недавней работе [1] нами разработан метод расчета эксергии лесных экосистем, базирующийся на эколого-физиологической модели (ЭФМ) динамики роста древостоев. В настоящее время нет необходимости доказывать важность эксергетического подхода как показателя качества древостоя, который характеризует способность древостоя к адаптации в условиях изменчивости климата на Земле, в том числе на территории Евразии [2]. В работе [1] был произведен расчет эксергии древостоев разных бонитетов в разных условиях произрастания. Для расчета эксергии в качестве эмпирических данных были взяты общие таблицы хода роста (ТХР), представленные в работах А.З. Швиденко и др. [3].

В представляемой работе поставлена задача выявить, как географическое положение древостоя влияет на его эксергию и энтропию, т.е. на экологическую устойчивость древостоя в условиях изменяющегося климата. Для этого в отличие от работы [1] мы использовали данные местных (локальных) ТХР для сосновых насаждений первого бонитета. Многочисленные экспериментальные данные по ним представлены в монографиях В.А. Усольцева [4, 5]. Кроме указанной выше цели работы, мы попытались установить, как распределяется эксергия по следующим крупным регионам Евразии: а) Центральная часть Европы и Европейской части России; б) Урал и Северная часть Европейской России; в) Сибирь и Казахстан.

Для исследования было взяты экспериментальные данные насаждений сосны 1-го бонитета из 25 регионов Евразии. Ранее нами показано, что показатель скорости расхода ресурса в балансовом уравнении Берталанффи ЭФМ [1] определяет бонитет насаждения, и он одинаков для всех насаждений сосны 1-го бонитета. В данной работе рассматривается зависимость значений эксергии насаждения Ex , энтропии насаждения, энтропия, приходящейся на одно дерево σ_0 , от региона произрастания.

Результаты проведенного исследования систематизированы в таблице 1. В столбцах таблицы 1, начиная со 2-го, в порядке возрастания приведены следующие данные:

2 – регион произрастания;

3 – особенности произрастания насаждения, вид ТХР древостоя, автор ТХР, год публикации;

4 – энтропия, приходящаяся на одно дерево, σ_0 (Дж/К/г/Н);

5 – энтропии насаждения σ (Дж/К/г);

6 – эксергия насаждения E_x (кДж/г);

7 – относительное значение энтропии $E_x/E_{x_{max}}$ (%);

8 – число деревьев на гектар $N(t_{max})$ (1/га), полученное в результате расчета по ЭФМ для значения времени, когда биомасса насаждения достигает максимального значения t_{max} .

В 1-м столбце таблицы 1 приведено рейтинговое место, определяемое по значению эксергии насаждения, там же в скобках дано рейтинговое место по значению эксергии, приходящейся в среднем на одно дерево.

Таблица 1 – Эксергия древостоя E_x , энтропия древостоя σ , энтропия, приходящаяся на одно дерево σ_0 , относительное значение энтропии $E_x/E_{x_{max}}$, число деревьев на гектар $N(t_{max})$, полученное в результате расчета по ЭФМ для значения времени, когда биомасса насаждения достигает максимального значения t_{max}

№ п/п	Регион	Особенности древостоя, автор, год публикации	σ_0 , Дж/К/г/Н	σ , Дж/К/г	E_x , кДж/г	$E_x/E_{x_{max}}$, %	$N(t_{max})$, 1/га
1	2	3	4	5	6	7	8
1(2)	Северо- Германская низменность	Нормальные сосняки, Schwarach, 1896, цит. по Орлову, 1928	0,1303	27,41	561	100	210
2(1)	Приангарье	Модальные сосняки, чернично- зеленомошный тип, Супринович, 1976	0,1017	38,91	557,8	99,4	383
3(7)	Курганская обл.	Сомкнутые сосняки, Г.А. Ходот, 1967	0,1907	48,05	555,2	98,9	226
4(3)	Средний Урал	Сосняки Припышминских боров, Чудников, Козловский, 1955	0,1516	57,01	552,7	98,5	769
5(5)	Московская обл.	Сомкнутые сосняки, Козловский, 1967г	0,1656	57,29	552,6	98,5	346
6(14)	Германия	Нормальные сосняки (при умеренном разреживании), Wiedemann, Schober, 1957	0,2799	58,37	552,3	98,5	209
7(4)	Воронежская обл. и др. обл. ЦЧР	Максимально продуктивные сосняки, Кирюков и др., 1982	0,1597	64,59	550,6	98,1	404

8(9)	Карелия и Мурманская обл.	Нормальные сосняки	0,2065	64,98	550,5	98,1	315
9(19)	Европейская Россия	Южная тайга, смешанные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,4569	68,72	549,4	97,9	150
10(21)	Белоруссия	Модальные сосняки, орликовый и черничный тип, Багинский, 1984	0,4946	70,02	549,1	97,9	135
11(13)	Белоруссия	Нормальные сосняки, орликовый, мшистый и черничный типы, Багинский, 1984	0,2643	71,74	548,6	97,8	271
12(15)	Северо-Восток Европейской России (Коми)	Сомкнутые сосняки, Огородов, 1967	0,2975	72,03	548,5	97,8	242
13(10)	Швеция	Южная тайга, Нормальные сосняки, Maas, 1911, цит. по Орлову, 1928	0,2165	72,24	548,4	97,8	334
14(12)	Южное Зауралье, бассейн реки Тавда	Майниково-брусничный тип	0,2510	77,46	547,0	99,0	252
15(8)	Казахский мелкосопочник	Нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,1955	79,05	545,5	97,4	405
16(11)	Архангельская обл.	Сомкнутые сосняки с березой, Неволин, 1967	0,2203	84,88	544,9	97,1	385
17(18)	СНГ	Нормальные сосняки, Загреев, 1993	0,4075	96,98	541,5	96,5	236
18(20)	Средний Урал	Сомкнутые сосняки, Милованович, 1967	0,4675	97,35	541,4	96,5	208
19(21)	Германия	Нормальные сосняки умеренного прореживания, E. Gehrhardt, 1921	0,4903	98,82	541,0	96,4	202

20(17)	Средний Урал	Нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,3989	109,8	537,9	95,9	276
21(24)	Центральный район Европейской России	Смешанные сосняки, Моисеев, 1971	0,7925	115,1	552,4	95,6	157
22(22)	Западная Сибирь	Средняя и южная тайга, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,4979	119,4	535,2	95,4	240
23(16)	Казахстанское Прииртышье	Ленточные боры, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,3681	126,8	533,7	95,0	344
24(23)	Центральная и восточная Сибирь	Таежная лесостепная подзона, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,6101	133,5	531,3	94,7	219
25(25)	Карелия и Мурманская обл.	Модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1,0514	210,6	509,7	90,9	200

Как видно из таблицы 1, лидирующее положение в рейтинге отдельных регионов по значению эксергии занимают древостои Германии и Центральной и Восточной Сибири, далее, чередуясь между собой, расположились регионы Центра Европейской части России, Урала, севера Европейской части России, Сибири и Казахстана. Если рассматривать типы ТХР в рейтинге, то более «успешными» будут нормальные сосняки по сравнению с другими типами ТХР. Картина распределения регионов в рейтинге по значению энтропии, которая приходится в среднем на одно дерево, в целом, подобна первому рейтингу, но есть исключения. Эти исключения объясняются тем фактом, что максимальное значение биомассы насаждения достигается при разном количестве деревьев на гектар, поэтому более плотные сосняки будут иметь меньшее значение эксергии, и, следовательно, они будут менее адаптированы к изменению внешних условий. Как и ожидалось, абсолютные значения эксергии довольно близки к максимальному значению 561 кДж/г. Для растительности (флоры) приводится значение индекса эксергии $\beta = 30$ [1], а в другом источнике дается значительный интервал индекса β (от 30 до 90) [6], что, конечно, затрудняет расчет абсолютных значений эксергии. Для задач, связанных с определением уровня адаптации древостоев к изменяющимся условиям, вполне достаточно относительных значений эксергии, а крупные регионы, в целом, необходимо ранжировать по среднему балльному индексу. Значения баллов даны в таблицах 2а, 2б, 2в соответственно.

Таблица 2а – Рейтинговые очки регионов Центральной России и Европы

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	Рейтинговые очки
1	Московская обл.	Сомкнутые сосняки, Козловский, 1967	21
2	Воронежская обл. и др. обл. ЦЧР	Максимально продуктивные сосняки, Кирюков, 1982	19
3	Белоруссия	Модальные сосняки, орликовый и черничные типы, Багинский, 1984	16
4	Европейская Россия, Южная тайга	Смешанные леса, модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	17
5	Белоруссия	Нормальные сосняки, орликовый, мшистый и черничный типы, Багинский, 1984	15
6	СНГ	Нормальные сосняки, Загребев, 1993	8
7	Швеция	Нормальные сосняки, Maas, 1911, цит. по Орлову, 1928	13
8	Северо- Германская низменность	Нормальные сосняки, Schwappach, 1896, цит. по Орлову 1928	26
9	Германия	Нормальные сосняки при умеренном разреживании, Wiedemann, Schober, 1957	20
10	Германия	Нормальные сосняки умеренного прореживания, Gehrhardt, 1921	7

Таблица 2б – Рейтинговые очки регионов Севера Европейской России и Урала

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	Рейтинговые очки
1	Средний Урал	Нормальные сосняки, Швиденко и др, 1996	6
2	Средний Урал	Сосняки припышминских боров, Чудников, Козловский и др., 1955	22
3	Северо-Восток Европейской России (Коми)	Сомкнутые сосняки, Огородов, 1967	14
4	Архангельская обл.	Сомкнутые сосняки с березой, Неволин, 1967	10
5	Карелия и Мурманская обл.	Модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1
6	Карелия и Мурманская обл.	Нормальные сосняки, 1996	18
7	Средний Урал	Сомкнутые сосняки, Милованович, 1967	9

Таблица 2в – Рейтинговые очки регионов Сибири (РФ) и Казахстана

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	Рейтинговые очки
1	Казахстан	Казахский мелкосопочник, нормальные сосняки	11
2	Западная Сибирь	Средняя и южная тайга, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	4
3	Курганская область	Сомкнутые сосняки, Г.А. Ходот, 1967	23
4	Южное Зауралье	Бассейн реки Тавда, майниково-брусничный тип, Гаврилов, 1975	12
5	Приангарье	Модальные сосняки, чернично-зеленомошный тип, Суприянович, Семечкин, 1976	24
6	Центральная и Восточная Сибирь	Таежная лесостепная зона, Швиденко и др., 1996	2
7	Казахстанское Прииртышье	Ленточные боры, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	3

В заключение приводим выводы, предложения и пожелания по дальнейшему изучению качества древостоев.

1. Лидирующее положение в балльном рейтинге регионов занимают Центр Европейской части России, Белоруссия и Западная Европа, далее расположились Север Европейской части России и Урала, Сибирь и Казахстан.

2. Рейтинг регионов по значению эксергии возглавляют насаждения Северо-Германской низменности с данными ТХР 1896 года.

3. Рейтинг регионов по значению энтропии, приходящейся в среднем на одно дерево, имеет зависимость, подобную рейтингу значений эксергии древостоев, с небольшими изменениями, характеризующими разную плотность насаждений.

4. Абсолютные значения эксергии довольно близки к ее максимальному значению, но поскольку для оценки устойчивости экосистемы важны относительные характеристики, сделанные на такой основе выводы вполне справедливы.

Для более общих заключений необходимо проводить аналогичные исследования для других бонитетов сосновых древостоев, а также для других пород. Вывод об адаптации древостоев к изменяющимся климатическим условиям был бы значительно весомее при наличии эмпирических ТХР, полученных приблизительно в одно время и построенных по одному методу.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ВГЛТУ, выделенного в 2025 г. на проект «Влияние условий произрастания древесной растительности на термодинамические характеристики древостоев»; руководитель – профессор Матвеев Н.Н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын, В. И. Расчет эксергии хвойных (*Pinus sylvestris* L., *Picea Abies* (L.) H. Karst, *Pinus sibirica* Du Tour) и лиственных (*Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth.) древостоев / В.И. Лисицын // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3(55). – С. 23-36. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2.
2. Лебедев, А.В. Динамическая модель роста и производительности сосновых древостоев (*Pinus sylvestris* L.) Унженской низменности / А.В. Лебедев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3(55). – С. 127-151. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
3. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных есообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашченко, С. Нильсон, Ю.И. Булуй. – 2-е издание, дополненное. – Москва : Федеральное агентство лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, 2008. – 886 с.
4. Усольцев, В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 762 с.
5. Усольцев, В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии : [монография : электронная база данных] / В.А. Усольцев ; Российская академия наук, Уральское отделение, Ботанический сад. – 4-е дополненное электронное издание. – Екатеринбург, 2023. – <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
6. Thermodynamics in Ecology – An Introductory Review / S. Nielsen, F. Müller, J. Marques, S. Bastianoni, S. Jørgensen // Entropy. – 2020. – No. 8(22). – P. 820. – DOI : <https://doi.org/10.3390/e22080820>.

REFERENCES

1. Lisitsyn, V.I. Calculation of exergy of coniferous (*Pinus sylvestris* L., *Picea Abies* (L.) H. Karst, *Pinus sibirica* Du Tour) and deciduous (*Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth.) stands / V.I. Lisitsyn // Forestry Engineering Journal. – 2024. – Vol. 14, No. 3 (55). – P. 23-36. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2.
2. Lebedev, A.V. Dynamic model of growth and productivity of pine stands (*Pinus sylvestris* L.) of the Unzha Lowland / A.V. Lebedev // Forestry Engineering Journal. – 2024. – V. 14, No. 3(55). – P. 127-151. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
3. Tables and models of the growth and productivity of plantings of the main forest-forming species of Northern Eurasia: normative and reference materials / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepashchenko, S. Nilson, Yu.I. Buluy. – 2nd edition, supplemented. – Moscow: Federal Forestry Agency of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 2008. – 886 p.

4. Usoltsev, V.A. Forest phytomass of Northern Eurasia: standards and elements of geography / V.A. Usoltsev. – Ekaterinburg: Publishing house of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. – 762 p.
5. Usoltsev, V.A. Biomass and primary production of Eurasian forests: [monograph: electronic database] / V.A. Usoltsev; Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Botanical Garden. – 4th supplemented electronic edition. – Ekaterinburg, 2023. – <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
6. Thermodynamics in Ecology – An Introductory Review / S. Nielsen, F. Müller, J. Marques, S. Bastianoni, S. Jørgensen // Entropy. – 2020. – No. 8(22). – P. 820. – DOI : <https://doi.org/10.3390/e22080820>.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ХАОСА ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР

INVESTIGATION OF NONLINEAR CHAOS IN TEMPERATURE TIME SERIES

Кочетова Ж.Ю., доктор географических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Kochetova Zh.Yu., DrSc in Geography, Docent, Associate Professor, FSOMEI HE Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Внукова С.В., кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Vnukova S.V., PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Тронин А.Л., кандидат технических наук, начальник кафедры, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

A.L. Tronin, PhD in Technical Sciences, Head of the Department, FSOMEI HE Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Дубачева А.В., студент 3 курса географического факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Dubacheva A.V., 3rd year student at the Geography Faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. Для понимания и прогнозирования среднемесячной динамики температур использован подход к реконструкции фазового пространства. Прогнозы сделаны на основе нелинейной локальной полиномиальной процедуры путем пошагового представления динамики, зафиксированной в фазовом пространстве в локальных окрестностях. Временной ряд температурных данных реконструировали в фазовых пространствах с размерностями вложения от 1 до 10 и временем задержки от 1 до 14 месяцев, сделаны прогнозы на период более 1 года. Результаты показали хорошее соответствие между прогнозируемыми и наблюдаемыми температурами.

Ключевые слова: временной ряд, температурный режим, хаотическая динамика, реконструкция фазового пространства, локальная аппроксимация, прогноз погоды.

Abstract. An approach to phase space reconstruction is used to understand and predict the average monthly temperature dynamics. The predictions are made using a nonlinear local polynomial procedure by stepwise representing the dynamics recorded in the phase space in the local neighborhood. The time series of temperature data was reconstructed in phase spaces with embedding dimensions from 1 to 10 and a delay time from 1 to 14 months, and forecasts for a period of more

than 1 year were made. The results showed a good correspondence between the predicted and observed temperatures.

Keywords: time series, temperature regime, chaotic dynamics, phase space reconstruction, local approximation, weather forecast.

Прогнозирование погоды имеет большое значение для планирования военных, промышленных и сельскохозяйственных задач. Глобальное численное прогнозирование погоды впервые применил британский математик Льюис Фрай Ричардс в 1922 г. Он предложил измерять метеопараметры в равноудаленных точках земного шара, а затем по этим характеристикам рассчитывать параметры в следующий момент времени. Ричардс потерпел неудачу, так как размер шага интегрирования приводил к нереалистичным результатам, а длительность производимых вручную расчетов превышала время прогнозирования. В настоящее время при наличии суперкомпьютеров, благодаря накоплению обширных баз данных, измеренных с высокой точностью, и разработке новых подходов к прогнозированию, предсказание погоды на несколько дней стало возможным и уже широко применяется. Основной метод заключается в решении уравнений глобального стока и атмосферной энергии (уравнений Навье-Стокса) [1]. Из-за присущей этим уравнениям сложности используются упрощения (гидростатические, геострофические и квазигеострофические приближения), что приводит к снижению точности прогноза [2]. К факторам, влияющим на точность, также относятся плотность и качество наблюдений, используемых как входные данные. Даже с учетом растущей мощности суперкомпьютеров точность прогноза по численным моделям удовлетворительна максимум на шесть дней.

Методы постобработки (статистика выходных данных) позволяют снизить ошибки численных прогнозов, однако более фундаментальная проблема заключается в хаотической природе дифференциальных уравнений, используемых для моделирования атмосферы. Точно решить эти уравнения невозможно, а небольшие ошибки со временем увеличиваются примерно вдвое каждые пять дней [3]. Кроме того, в такие модели необходимо включать параметры, учитывающие солнечную радиацию, влажность воздуха, облачность и осадки, теплообмен, тип подстилающей поверхности и влияние рельефа местности.

Для количественной оценки доли неопределенности, присущей численному моделированию погоды, с 1990-х годов используют ансамблевые прогнозы – группу различных прогнозных сценариев, каждый из которых основан на немного другой, но реалистичной конфигурации исходного состояния атмосферы [4]. Чтобы получить статистическое распределение ошибок прогнозирования, выполняется моделирование методом Монте-Карло. Такой подход позволяет рассчитать вероятность события. Например, если вероятность осадков составляет 80 %, то из 50 членов ансамбля 40 (абсолютное большинство) прогнозируют дождь, а 10 исключают осадки. Каждый член ансамбля обладает одинаковой вероятностью оказаться правильным (заранее определить какой самый надежный невозможно). Горизонт прогноза при таком подходе составляет 7-10 дней.

Существуют методы прогнозирования погоды, основанные на «масштабировании» глобальных климатических моделей на локализованные регионы с использованием статистических корреляций между предикторами и прогнозами [5]. Прогнозные параметры (температура, осадки, давление на разных высотах и в разных местах) берутся из выходных

данных глобальной модели. Эти методы в основном используются для изучения влияния глобального потепления на поверхностные переменные.

Статистические методы прогнозирования погоды на основе временных рядов описаны в работе [6]. В этих методах ряд разбивается на циклическую, трендовую и ошибочную составляющие. Эти модели не отражают динамику системы и дают сбой при прогнозировании на срок более 11 дней.

В последние десятилетия интерес ученых вызывает энтропийный подход к прогнозированию поведения сложных природных и технических систем [7-10]. Понятие теории детерминированного хаоса (кажущееся нерегулярным поведение систем) может быть результатом простого детерминизма, на который влияют нелинейные взаимозависимые переменные. Поэтому методы нелинейной динамики могут быть полезны и для понимания температурного режима воздуха.

В настоящей работе исследуются ежемесячные температуры, наблюдаемые на метеостанции в г. Воронеж в период с 1920 г. по 2024 г. на высоте 2 м. Ранее воронежскими учеными было установлено, что после 1987 г. следует постоянное скачкообразное повышение температуры. Первое десятилетие этого века стало самым теплым за наблюдаемый период. А средняя годовая температура воздуха в 2020 г. составила $\sim 9,5^\circ\text{C}$, что на $3,1^\circ\text{C}$ выше нормы 1961-1990 гг. [11].

Для исследования хаоса в динамике среднемесячных температур и составления краткосрочных прогнозов применяли метод нелинейного прогнозирования. Он включает реконструкцию временного ряда с одной переменной в многомерном фазовом пространстве. Для скалярного временного ряда температур X_i (где $i = 1, 2, \dots, N$) фазовое пространство может быть восстановлено в виде:

$$Y_j = (X_j, X_{j+\tau}, X_{j+2\tau}, \dots, X_{j+(m-1)\tau}), \quad (1)$$

где $j = 1, 2, \dots, N-(m-1)\tau$; m – размерность вектора Y_j , называемая размерностью вложения (минимальное число динамических переменных, однозначно описывающих наблюдаемый процесс); τ – время задержки [10].

Корректная реконструкция фазового пространства в измерении m позволяет интерпретировать лежащую в его основе динамику в виде m -мерной карты f_T :

$$Y_{j+T} = f_T(Y_j), \quad (2)$$

где Y_j и Y_{j+T} – векторы размерности m , описывающие состояние системы в моменты времени j (текущее состояние) и $j+T$ (будущее состояние).

Задача состоит в том, чтобы найти подходящее выражение для f_T . Существует несколько подходов для определения такого выражения. В данном исследовании используется метод локальной аппроксимации [12]. В этом методе область f_T разделяется на множество локальных областей (подмножеств), каждая из которых определяет некоторые приближения F_T , действительные только в этом подмножестве. Таким образом, динамика системы в фазовом пространстве представляется пошагово локально.

Определение множеств, на которые следует разделить область, выполняется путем вычисления показателя:

$$\sum_{p=1}^k \|Y_{j+1}^p - F_T Y_j^p\|^2. \quad (3)$$

Здесь учитывается начальная точка Y_j , с которой начинается прогноз, определяются соседи Y_j^p ($p = 1, 2, \dots, k$; $j^p < j$), ближайшие к Y_j , которые составляют множество, соответствующее Y_j . С помощью этого алгоритма можно построить локальные функции, которые переводят каждую точку в окрестности в следующую окрестность: от Y_j^p до Y_{j+1}^p . Локальная карта F_T определяется методом наименьших квадратов, минимизирующих выражение (3). Прогнозы делаются на локальной карте из новой точки Z_0 , для которой будет найден ближайший сосед в обучающем наборе Y_q . Затем находится эволюция Z_0 , которая обозначается как Z_1 и задается формулой:

$$Z_1 = F_q(Z_0), \quad (4)$$

Следующим находится ближайший сосед к Z_1 , и процедура повторяется для прогнозирования последующих значений. Описанная выше методика используется в данном исследовании для локальных полиномиальных прогнозов, реализованных в программном обеспечении GeneXproTools 2023.

Оценка точности прогноза может быть произведена с помощью любого из стандартных статистических показателей. В этом исследовании используются коэффициент линейной парной корреляции (r); коэффициент детерминации (R^2).

Результаты метода нелинейного прогнозирования могут быть использованы для оценки хаоса (или его отсутствия) в основной динамике, что называется «обратным подходом к идентификации хаоса». Наличие хаоса можно обнаружить, проверив точность прогноза на соответствие размерности вложения и времени задержки.

Чтобы при реконструировании аттрактора из экспериментальных данных получить полноценный набор переменных состояния, необходимо исходные данные, полученные в результате измерений, вложить в пространство большей размерности. Размерность вложения аттрактора – это минимальная размерность фазового пространства, в которое без самопересечений может быть помещено гладкое многообразие, целиком содержащее этот аттрактор. Если динамика хаотична, то точность прогнозирования будет увеличиваться с увеличением размерности пространства вложения до определенной точки, называемой оптимальным размером вложения (m_{opt}), и останется высокой для размеров вложения, превышающих m_{opt} . Для стохастических временных рядов точность прогнозирования не растет с увеличением размерности пространства вложения, она остается неизменной при любом значении этого параметра.

Что касается времени задержки, то при его росте и фиксированной размерности пространства вложения прогнозы в хаотических системах могут ухудшаться или улучшаться значительно быстрее, чем в стохастических. Это связано с чувствительностью хаотических систем к начальным условиям [8, 9].

На рисунке 1 показана реконструкция ряда ежемесячных температур в двумерном фазовом пространстве, т.е. проекция аттрактора на плоскость $[X_i, X_{i+\tau}]$ при $\tau = 1, 2, 3, 4, 6$ и 12 месяцев. Четко видимый аттрактор присутствует при $\tau < 4$, затем аттрактор становится все менее и менее понятным, наблюдаются пересечения траекторий. При дальнейшем увеличении

τ до 6 и 12 месяцев аттрактор исчезает, т.е. в динамической системе отсутствует траектория, притягивающая к себе соседние.

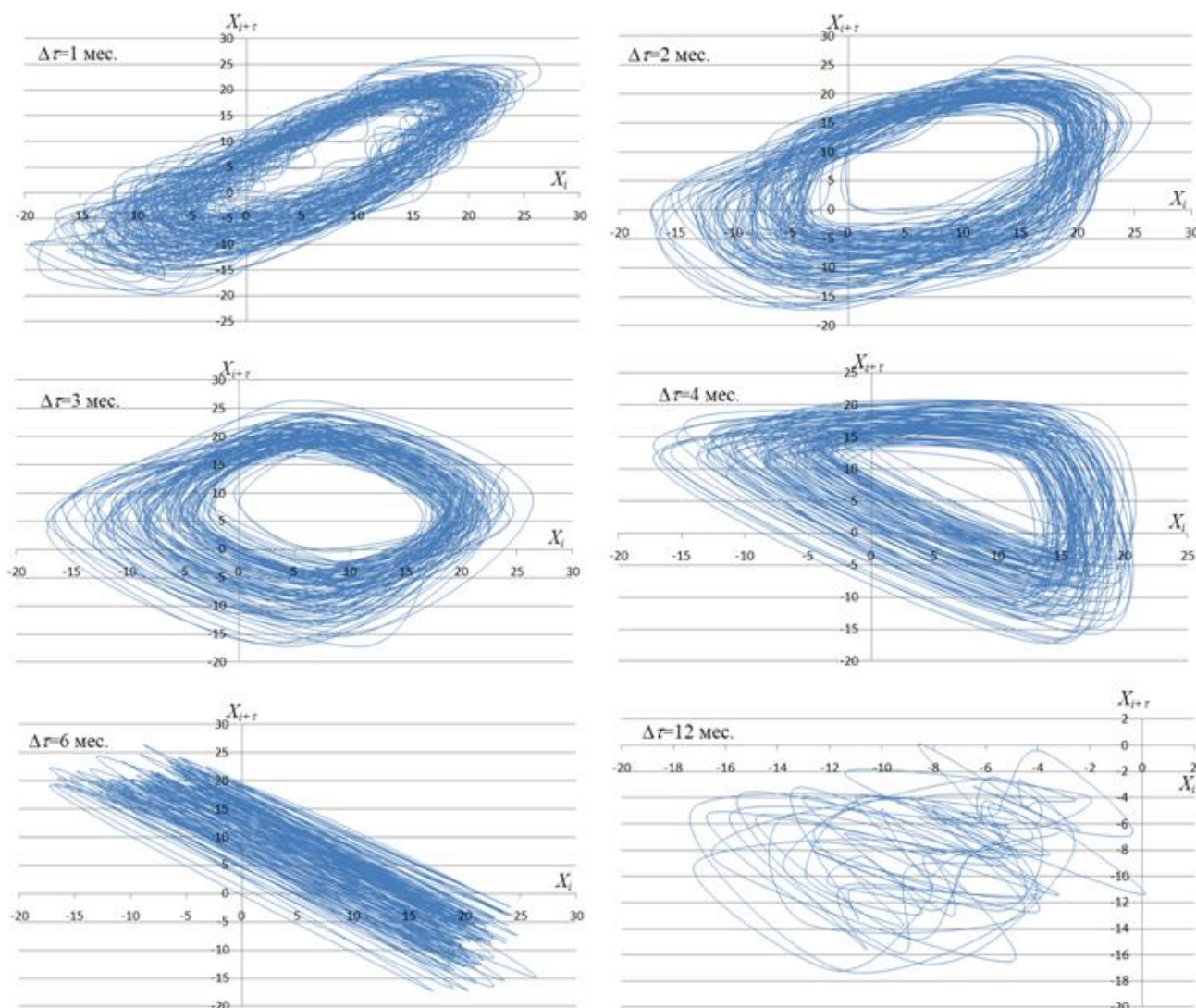


Рисунок 1 – Фазовая пространственная диаграмма среднемесячных температур с $\tau = 1, 2, 3, 4, 6$ и 12 месяцев (1920-2024 гг.)

Для обучающей выборки использовали 432 значения среднемесячных температур, измеренных с 1987 г., когда было отмечено постоянное повышение температуры в связи с изменением климата. Прогнозировали среднемесячные приземные температуры для 2024-2025 гг. Фазовое пространство реконструировали с размерностями пространства вложения от 1 до 10, как принято на практике [10].

На рисунке 2 с использованием графиков временных рядов сравниваются наблюдаемые и прогнозируемые значения температур с временем задержки $T = 1$ месяц и $T = 2$ месяца.

Оптимальные размерности вложения различны для разных времен задержки. Лучшая сходимость реальных и прогнозных значений достигается при $m = 5$ для $T = 1$ месяц и при $m = 6$ для $T = 2$ месяца. Затем коэффициенты корреляции и детерминации практически не изменяются. Надо отметить, что прогнозируемые значения хорошо согласуются с наблюдаемыми для размерностей вложения $m \geq 2$.

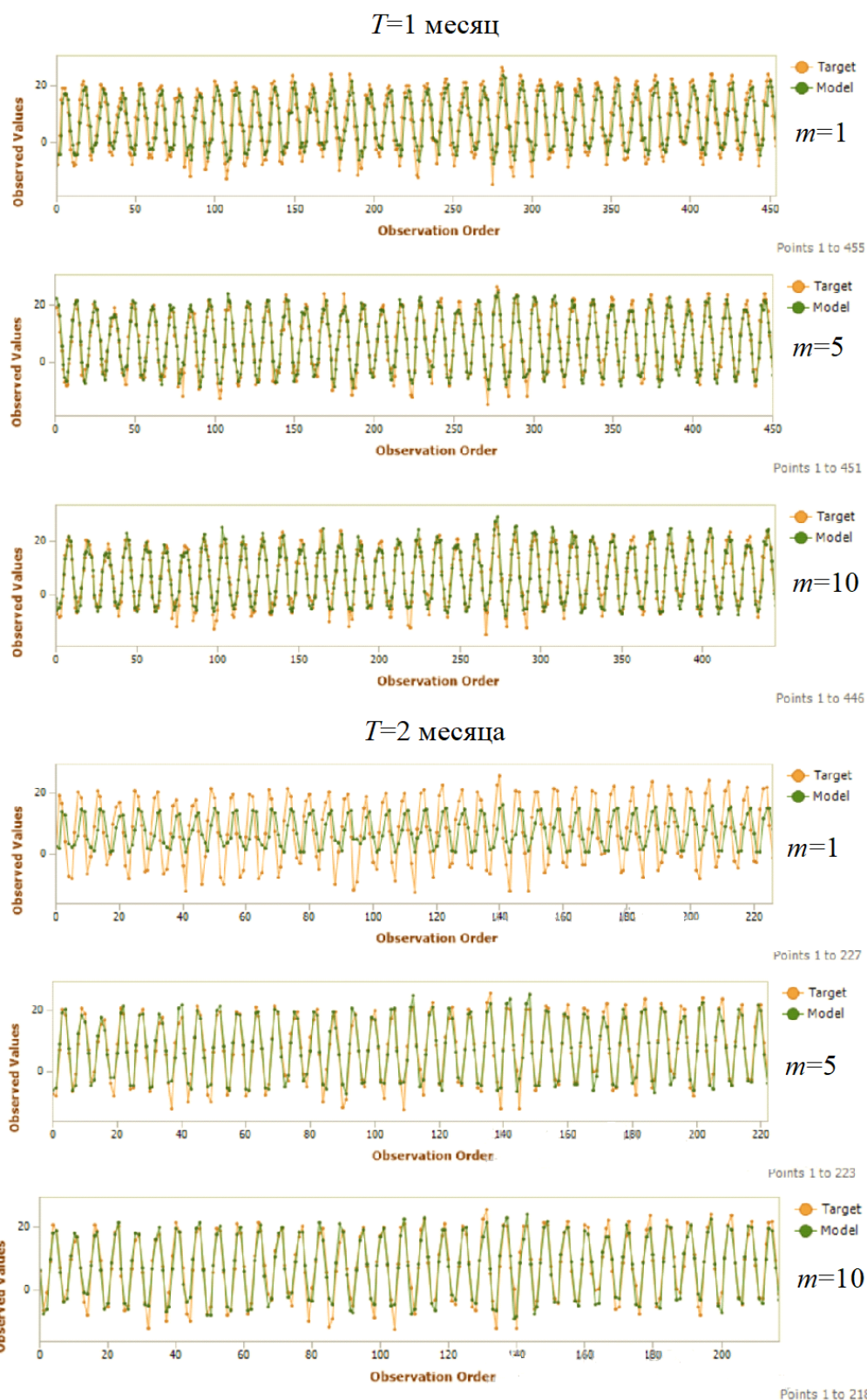


Рисунок 2 – Сравнение наблюдаемой и прогнозируемой температуры с использованием временных рядов с различными размерностями вложения m и временем задержки T (1987-2023 гг.)

На рисунке 3 показана сплошная линия 1:1 (по диагонали) для $m = 5$. Из рисунка следует, что при разном времени задержки даже очень высокие и очень низкие значения температур достаточно хорошо прогнозируются.

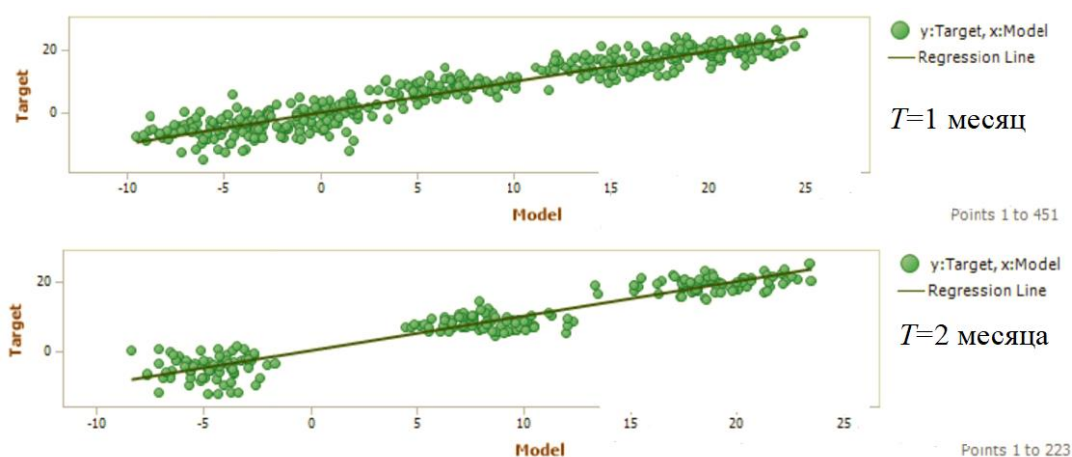


Рисунок 3 – Сравнение наблюдаемой и прогнозируемой температуры с использованием точечной диаграммы при разном времени задержки T ; размер вложения $m = 5$ (1987-2023 гг.)

Хорошая точность прогноза при размерности вложения $m = 5$ возможна при $T = 1$ месяц, и она продолжает увеличиваться до $T = 12$ месяцев (таблица 1). Это объясняется сезонной динамикой временных рядов температур. Обычно для прогнозирования временных рядов с сезонной динамикой время задержки выбирают равным либо четверти, либо половине цикла.

Таблица 1 – Характеристики точности моделирования приземной температуры с различным временем задержки T при $m = 5$ (1987-2023 гг.)

Время задержки T , месяц	R^2	r
1	0,9201	0,9592
2	0,9130	0,9555
3	0,9145	0,9563
4	0,9316	0,9652
5	0,9318	0,9650
6	0,9506	0,9749
7	0,9526	0,9760
8	0,9322	0,9655
9	0,9474	0,9733
10	0,9528	0,9761
11	0,9354	0,9671
12	0,4573	0,6762
13	0,9448	0,9740
14	0,8824	0,9337

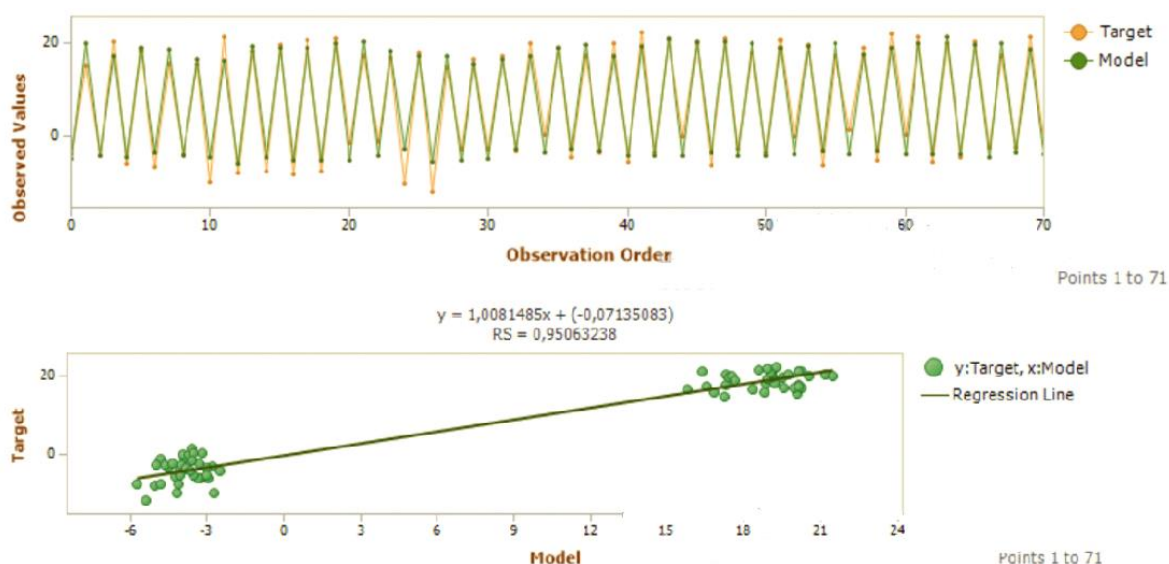


Рисунок 4 – Сравнение наблюдаемой и прогнозируемой температуры при $m = 5$, $T = 6$ месяцев (1987-2023 гг.)

На рисунке 4 показаны графики сравнения экспериментального и прогнозируемого ряда температуры обучаемой выборки для выбранных оптимальных условий.

Реконструкция ряда значений одной переменной (среднемесячной температуры на высоте 2 м) в многомерном фазовом пространстве отражает важные особенности динамики системы. Процедура локальной аппроксимации, заключающаяся в пошаговом представлении траектории движения точки аттрактора в фазовом пространстве, позволяет прогнозировать динамику температуры. Наличие оптимальной размерности вложения $m_{opt} = 5$ предполагает возможное присутствие в наблюдаемой системе многомерного хаоса, для описания которого необходима потоковая динамическая система размерностью более трех. Это подтверждается и тем, что точность прогнозирования возрастает с увеличением размера вложения до определенного значения ($m = 5$), а затем при превышении этого значения изменяется разнонаправлено.

Таким образом, для установления особенностей динамики среднемесячных температур требуется пятимерная реконструкция фазового пространства. Другими словами, динамика температуры зависит, по крайней мере, от пяти доминирующих переменных. Но небольшое снижение точности прогнозирования при использовании для реконструкции временного ряда фазовых пространств с $m > 5$ может быть связано и с наличием шума (погрешности измерения) во временном ряду, так как его влияние при более высоком размере вложения обычно растет.

С учетом приведенных выше результатов составлен прогноз среднемесячных температур в г. Воронеж на 2024-2025 гг. Сравнение прогнозируемых значений с наблюдаемыми представлено на рисунке 5. Получены достаточно хорошие результаты прогнозирования среднемесячных температур на 13 месяцев ($R^2 \sim 0,90$).

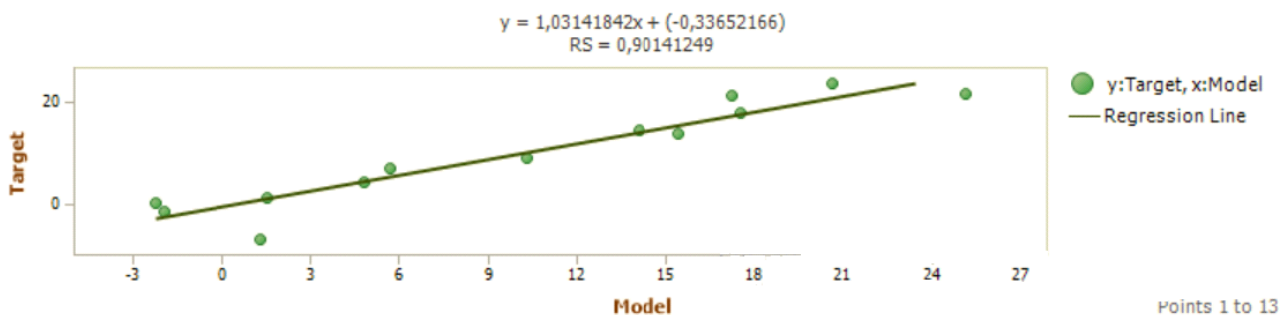


Рисунок 5 – Результат тестирования обученной модели: прогнозирование среднемесячных приземных температур в г. Воронеж (2024 г., январь 2025 г.); $m_{\text{opt}} = 5$, $T = 1$ месяц

Для понимания и прогнозирования динамики среднемесячной температуры, наблюдаемой в г. Воронеж, был использован подход к реконструкции фазового пространства, при котором один ряд переменных восстанавливается в многомерном фазовом пространстве, чтобы отразить важные динамические характеристики базовой системы. Прогнозы были сделаны с использованием нелинейной локальной полиномиальной процедуры путем пошагового представления динамики, зафиксированной в фазовом пространстве в локальных окрестностях. Ряд данных о температурах был реконструирован в фазовых пространствах от 1 до 10 измерений, были сделаны прогнозы на период до 13 месяцев. Результаты показали хорошее соответствие между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями температур. Достигнутые хорошие результаты прогнозирования указывают на полезность реконструкции фазового пространства и пригодность нелинейного локального полиномиального подхода для понимания и прогнозирования динамики температур. Существование оптимальной размерности вложения свидетельствует о том, что динамика исследуемой системы характеризуется хаотическим поведением. Результаты также показали, что минимум 5 переменных влияют на динамику среднемесячных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каргин, Н.И. Вычислительный метод оценки поля скорости ветра в пограничном слое атмосферы на основе уравнения Навье-Стокса / Н.И. Каргин, В.И. Наац // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2005. – № S5. – С. 1-13.
2. Елисеев, А.В. Основные понятия устойчивости и прогнозируемости крупномасштабных атмосферных процессов / А.В. Елисеев. – Казань: Издательство Казанского университета, 2017. – 23 с.
3. Магницкий, Н.А. Теория динамического хаоса / Н.А. Магницкий. – Москва: Едиториал УРСС, 2011. – 320 с.
4. Цепелев, В.Ю. Ансамблевый прогноз: составление, использование, интерпретация / В.Ю. Цепелев, О.Г. Анискина. – Санкт-Петербург.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. – 110 с.
5. Юничева, Н.Р. Автоматизация предпроцессинговой обработки данных глобальных климатических моделей для проведения расчетов региональных климатических моделей для

первого приоритетного периода программы CORDEX / Н.Р. Юничева, Д.Б. Нурсеитов, И.Б. Есеркепова [и др.] // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 2 (97). – С. 94-102.

6. Мирсаева, Н.А. Статистические методы долгосрочного прогноза погоды / Н.А. Мирсаева. – Казань: Издательство Казанского университета, 2018. – 21 с.

7. Серых, И.В. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 1. Хаотические вариации погоды / И.В. Серых, Д.М. Сонечкин // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2017. – Т. 25, № 4. – С. 4-22.

8. Базарский, О.В. Энтропия абиотических геосфер и модель для оценки и прогноза их состояния / О.В. Базарский, Ж.Ю. Кочетова // Биосфера. – 2021. – Т. 13, № 1-2. – С. 9-14.

9. Базарский, О.В. Теория детерминированного хаоса для описания эколого-медицинской системы / О.В. Базарский, Ж.Ю. Кочетова // Географическая среда и живые системы. – 2021. – № 3. – С. 96-109.

10. Мальцев, Г.Н. Алгоритм реконструкции фазового пространства динамической системы и его применение для разработки прогнозных моделей / Г.Н. Мальцев, А.В. Назаров, В.Л. Якимов // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2 (69). – С. 33-39.

11. Дмитриева, В.А. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата / В.А. Дмитриева, А.И. Сушков // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2023. – № 2. – С. 56-63.

12. Лоскутов, А.Ю. Применение метода локальной аппроксимации для прогноза экономических показателей / А.Ю. Лоскутов, Д.И. Журавлев, О.Л. Котляров // Вопросы анализа и управления риском. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 21-31.

REFERENCES

1. Kargin, N.I. Computational method for estimating the wind velocity field in the atmospheric boundary layer based on the Navier-Stokes equation / N.I. Kargin, V.I. Naats // Bulletin of higher education institutes. North Caucasus region. Natural sciences. – 2005. – No. S5. – P. 1-13.

2. Eliseev, A.V. Basic concepts of stability and predictability of large-scale atmospheric processes / A.V. Eliseev. – Kazan: Kazan University Press, 2017. – 23 p.

3. Magnitsky, N.A. Theory of dynamic chaos / N.A. Magnitsky. – Moscow: Unified URSS, 2011. – 320 p.

4. Tsepelev, V.Y. Ensemble forecast: compilation, use, interpretation / V.Y. Tsepelev, O.G. Aniskina. – Saint Petersburg: Publishing and Polygraphic Association of Higher Educational Institutions, 2022. – 110 p.

5. Yunicheva, N.R. Automation of preprocessing data of global climate models for the calculation of regional climate models for the first priority period of the CORDEX program / N.R. Yunicheva, D.B. Nurseitov, I.B. Eserkepova [et al.] // Hydrometeorology and Ecology. – 2020. – No. 2 (97). – P. 94-102.

6. Mirsaeva, N.A. Statistical methods of long-term weather forecasting / N.A. Mirsaeva. – Kazan: Kazan University Press, 2018. – 21 p.

7. Serykh, I.V. Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 1. Chaotic weather variations / I.V. Serykh, D.M. Sonechkin // Izvestiya vuzov. Applied Nonlinear Dynamics. – 2017. – Vol. 25, No. 4. – P. 4-22.

8. Bazarsky O.V. Entropy of abiotic geospheres and a model for assessing and forecasting their states / O.V. Bazarsky, Zh.Yu. Kochetova // Biosphere. – 2021. – Vol. 13, No. 1-2. – P. 9-14.
9. Bazarsky O.V. The theory of deterministic chaos for the description of the ecological and medical system / O.V. Bazarsky, Zh.Yu. Kochetova // Geographical environment and living systems. – 2021. – No. 3. – P. 96-109.
10. Maltsev, G.N. A reconstruction algorithm for a dynamic system phase space and its application for development of predictive models / G.N. Maltsev, A.V. Nazarov, V.L. Yakimov // Information and control systems. – 2014. – No. 2 (69). – P. 33-39.
11. Dmitrieva, V.A. Thermal regime in the Voronezh region in a changing climate / V.A. Dmitrieva, A.I. Sushkov // Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. – 2023. – No. 2. – P. 56-63.
12. Loskutov, A.Yu. Applications of a local approximation technique for forecasting of economic indicators / A.Yu. Loskutov, D.I. Zhuravlev, O.L. Kotlyarov // Issues of risk analysis and management. – 2003. – Vol. 1, No. 1. – P. 21-31.

ПРОЦЕССОРЫ ЭЛЬБРУС ДЛЯ НАУЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**ELBRUS PROCESSORS FOR SCIENTIFIC COMPUTING**

Зубанков А.А., разработчик, ООО «Научно-исследовательский центр цифровых технологий», Москва, Россия

Zubankov A.A., Developer, LTD «Scientific research center of digital technologies», Moscow, Russia

Аннотация. Современная наука невозможна без компьютерных вычислений – от обработки результатов измерений до моделирования процессов. Во всех передовых исследовательских центрах для этих задач служат вычислительные кластеры, в основном, построенные на базе процессоров архитектуры x86. Программное обеспечение изначально разрабатывалось для популярных архитектур и для работы на отечественных процессорах Эльбрус требует портирования. В работе будут представлены портированные на архитектуру Эльбрус программы, позволяющие проводить анализ и обработку физических данных и моделирование.

Ключевые слова: программное обеспечение, обработка физических данных, процессоры Эльбрус.

Abstract. Modern science is impossible without computer calculations - from processing measurement results to modeling processes. All advanced research centers use computing clusters for these tasks, mostly based on x86 processors. The software was originally developed for popular architectures and requires porting to work on domestic Elbrus processors. In the paper the programs ported to the Elbrus architecture, which allow to perform physical data analysis, processing and modeling were presented.

Keywords: software, physical data processing, Elbrus processors.

Отечественные процессоры Эльбрус разрабатываются компанией МЦСТ [1]. Их отличительной особенностью является собственная архитектура e2k с очень длинной машинной командой VLIW. Это не позволяет процессорам Эльбрус без портирования нативно запускать большую часть программного обеспечения, в том числе и для анализа физических данных. Современная физика не может обойтись без сложных и многомерных вычислений, что особенно заметно в физике высоких энергий. Ведущие международные исследовательские центры – Европейский центр ядерных исследований CERN, Центр по исследованию ионов и антипротонов FAIR, Объединенный институт ядерных исследований ОИЯИ, Брукхейвенская национальная лаборатория BNL и другие, для анализа физических данных используют вычислительные кластеры, построенные в основном на базе x86 процессоров. Портирование ПО на российские процессоры Эльбрус сделает возможным импортозамещение даже в таких узких и требовательных областях, связанных с фундаментальными исследованиями.

Своя собственная архитектура e2k дает широкие возможности для оптимизации кода, в отличие от x86 [2]. Оптимизирующий компилятор lcc позволяет использовать особенности

процессора для ускорения работы кода на C/C++. Кроме того, процессоры Эльбрус обладают Режимом Безопасных Вычислений, обеспечивающим дополнительный контроль поведения программ на C/C++.

Портирование ПО для научных расчетов выполнялось в рамках операционной системы Collaboration OS (CollabOS) на базе Linux. Ключевой особенностью CollabOS является поддержка пакетной базы на основе CentOS 9 и Epeel, что обеспечивает легкий переход на процессоры Эльбрус с других дистрибутивов Linux, основанных на RedHat: CentOS, Fedora и Scientific Linux. Поддержка языков C, C++, Fortran, Python 3.9, Perl, Java 8 и 11, PHP, Lua, Ruby, R, Rust позволяет осуществлять привычную работу с кодом. На данный момент операционная система поддерживает процессоры 5 и 6 поколений Эльбрус 8CB, 2C3, 16C.

Одним из наиболее широкоиспользуемых фреймворков для обработки данных в физике высоких энергий, ядерной физике, физике элементарных частиц и космологии является CERN ROOT [3]. Он обладает широким инструментарием статистического анализа, линейной алгебры, средств фитирования, средств четырехвекторных вычислений, а также инструментами многовариантного анализа данных, то есть использования нейронных сетей. ROOT позволяет проводить статистически обоснованный научный анализ и визуализацию больших объемов данных.

Объектно-ориентированная среда для анализа данных ROOT имеет собственный встроенный интерактивный интерпретатор C/C++ – cling, построенный на основе инфраструктуры LLVM и Clang. Для портирования cling использовался LLVM-13, модифицированный МЦСТ [4]. Портированный LLVM использует проприетарный оптимизирующий e2k-бэкенд из компилятора lcc.

Дополнительным преимуществом актуальной версии ROOT является интеграция языков Python и R, а также поддержка БД MySQL, PostgreSQL и SQLite. Портированный ROOT позволяет производить сложные вычисления и построения, что было протестировано на основе данных с эксперимента BM@N на NICA [5] на рисунке 1.

Также было выполнено портирование генератора событий физики высоких энергий Pythia8. Он позволяет получать из теории и моделей детальное описание жестких и мягких взаимодействий, распределения партонов, ливни партонов в начальном и конечном состояниях, множественные взаимодействия, фрагментацию и распад. Выходные файлы могут быть использованы в ROOT для сравнения экспериментальных данных с моделированием, что необходимо в современных реалиях физики высоких энергий.

Другим мощным инструментом, доступным на e2k и обладающим широким спектром статистических и графических методов, является язык R. Он позволяет проводить статистические тесты, линейное и нелинейное моделирование, анализ временных рядов, классификацию и кластеризацию. Также, как и ROOT, он обладает режимом интерпретатора, что существенно упрощает работу с данными. Для решения ресурсоемких задач реализована возможность подключать и вызывать код на языках C, C++ и Fortran во время выполнения.

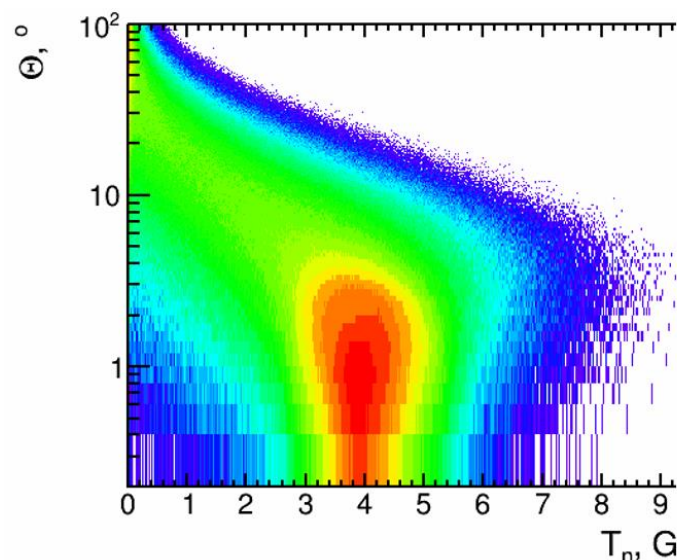


Рисунок 1 – Двумерное распределение выходов нейтронов по кинетическим энергиям и углу вылета в результате столкновения пучка Хе с энергией 3,8 ГэВ/нуклон с мишенью CsI в эксперименте BM@N из модели UrQMD-AMC, построенное в портированном на e2k ROOT

Один из наиболее популярных языков программирования Python также позволяет проводить анализ данных благодаря библиотекам. NumPy дает возможность проводить быстрые числовые и матричные вычисления, а инструментарий SciPy и Matplotlib – выполнять построения графиков, гистограмм и проводить статистический анализ и аппроксимацию. Как отмечалось ранее, Python также может взаимодействовать с ROOT через модуль PyRoot.

Другим популярным мультиплатформенным инструментом для визуализации данных и математических функций является Gnuplot. Его можно использовать как в интерактивном режиме в графическом режиме или в командной строке, так и в неинтерактивных приложениях, таких как веб-скриптинг. Высокоуровневый язык для численных вычислений GNU Octave использует для построения графиков Gnuplot. Octave обладает большим математическим инструментарием, совместим со многими скриптами Matlab и легко расширяется пользовательскими функциями, написанными на Octave, C, C++, Fortran и других языках.

Несмотря на существенное отличие архитектуры e2k, в рамках операционной системы CollabOS был портирован ряд ПО, востребованного в научно-исследовательских организациях, в частности в ядерной физике, физике высоких энергий, физике элементарных частиц и космологии. Портированы: программы для обработки данных, статистики и моделирования – ROOT, R, SciPy, NumPy, Pythia8, LHAPDF, Octave; для построения графиков, гистограмм и диаграмм – ROOT, R, Matplotlib, Gnuplot; для верстки текста статей – TeXLive, AbiWord; языки программирования – C, C++, Fortran, Python 3.9, Perl, Java 8 и 11, PHP, Lua, Ruby, R, Rust, Octave. Благодаря этому достигается широкая совместимость проводимых научных расчетов на отечественных процессорах Эльбрус 8СВ и 2С3 с другими архитектурами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архитектура Эльбрус // АО «МЦСТ». – URL: http://www.mcst.ru/elbrus_arch (дата обращения: 26.03.2025).
2. Нейман-заде, М. И. Руководство по эффективному программированию на платформе «Эльбрус» / М. И. Нейман-заде, С. Д. Королёв // АО «МЦСТ». – 2024. – Выпуск 1.2. – URL: http://mcst.ru/doc/elbrus_prog/elbrus-prog-1.2_2024-02-28.pdf (дата обращения: 26.03.2025).
3. Brun, R. ROOT – An Object Oriented Data Analysis Framework / R. Brun, F. Rademakers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – Vol. 389, Iss. 1-2. – P. 81-86. – DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X.
4. Проект по портированию LLVM на e2k-платформу // GitFlic. – URL: <https://gitflic.ru/project/e2khome/llvm-project-e-2-k> (дата обращения: 26.03.2025).
5. Zubankov, A. Performance study of the Highly Granular Neutron Detector prototype in the BM@N experiment / A. Zubankov [et al.] // arXiv:2503.12624 [physics.ins-det]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2503.12624> (дата обращения: 26.03.2025).

REFERENCES

1. Architecture Elbrus // JSC «MCST». – URL: http://www.mcst.ru/elbrus_arch (date of reference: 26.03.2025).
2. Neyman-zade, M. I. Guide to efficient programming on the Elbrus platform / M. I. Neyman-zade, S. D. Korolev // JSC «MCST». – 2024. – Iss. 1.2. – URL: http://mcst.ru/doc/elbrus_prog/elbrus-prog-1.2_2024-02-28.pdf (date of reference: 26.03.2025).
3. Brun, R. ROOT – An Object Oriented Data Analysis Framework / R. Brun, F. Rademakers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – Vol. 389, Iss. 1-2. – P. 81-86. – DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X.
4. Project on porting LLVM to e2k platform // GitFlic. – URL: <https://gitflic.ru/project/e2khome/llvm-project-e-2-k> (date of reference: 26.03.2025).
5. Zubankov, A. Performance study of the Highly Granular Neutron Detector prototype in the BM@N experiment / A. Zubankov [et al.] // arXiv:2503.12624 [physics.ins-det]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2503.12624> (date of reference: 26.03.2025).

МЕТОД ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГО КОДИРОВАНИЯ

METHOD OF THE REGENERATION CODING

Стародубцев Д.Е., старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», Череповец, Россия

Starodubtsev D.E., Senior Lecturer, Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

Горбунов В.А., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Gorbunov V.A., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Плашенков В.В., доктор военных наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», Череповец, Россия

Plashenkov V.V., DrSc in Military, Professor, Professor, Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

Аннотация. В статье предлагается метод регенерационного интерпретационного блочного кодирования информации, позволяющий осуществлять не только восстановление потерь блоков данных при передаче информации по зашумлённому акустическому каналу связи, но и передавать вместе с исходным сообщением метаданные без внесения в его состав и структуру какой бы то ни было избыточности. Вследствие того, что на сегодняшний день задача оперативной регенерации блоков потерянных данных при передаче по каналам связи с шумом представляет особую значимость практически во всех современных инфокоммуникационных системах, актуальность темы представленного в статье материала имеет первостепенное значение.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, регенерация блоков данных, акустический канал связи, акустический корпус, канал связи с шумом, кодирование, избыточность.

Abstract. The article proposes a method of regenerative interpretative block coding of information, which allows not only to restore the loss of data blocks during transmission of information over a noisy acoustic communication channel, but also to transmit metadata together with the original message without introducing any redundancy into its composition and structure. Due to the fact that today the task of operational regeneration of blocks of lost data during transmission over communication channels with noise is of particular importance in almost all modern infocommunication systems, the relevance of the topic of the material presented in the article is of paramount importance.

Keywords: error-correcting coding, data block regeneration, acoustic communication channel, acoustic body, communication channel with noise, coding, redundancy.

В наши дни существует огромное количество различных каналов передачи информации. Наиболее популярными из них являются проводные сети и всевозможные

технологии беспроводной телекоммуникации. Среди всего этого разнообразия до сих пор остаётся весьма актуальным акустический канал связи. В ряде ситуаций он даже обладает неоспоримыми преимуществами по сравнению с имеющимися альтернативами. Так, например, акустический канал передачи информации обладает следующими достоинствами при распространении сигнала [1, 2]:

- передача данных как по воздуху, так и по проводам;
- отсутствие юридических ограничений, регламентирующих использование определённых интерфейсов.

Передача информации по любому каналу всегда сопряжена с наличием в этом канале большого количества шумов. Данная проблема касается и акустического канала. Для её решения на практике существует два идеологически различных подхода [3-5]. Первый из них предполагает внесение в передаваемую информацию избыточности, посредством которой далее происходит детектирование и корректировка возникающих ошибок. Второй подход к решению проблемы подразумевает интерпретацию информации как некоторого контейнера определённого формата: неподвижного изображения, видео или аудио. Авторами данной статьи предлагается метод преобразования данных в акустический мелодический контейнер. Контейнер представляет собой как бы надстройку над передаваемой информацией. При этом каждая определённая порция данных неразрывно связана с некоторой частью надстройки. Таким образом, при потерях блоков данных требуется восстановить фрагмент контейнера, что в свою очередь позволяет регенерировать определённую часть исходной информации.

Предлагаемый нами метод преобразования сообщения в акустический мелодический контейнер для потенциальной регенерации в случае потерь данных по причине наличия шумов в канале передачи имеет следующие преимущества по сравнению с существующими альтернативами:

- регулирование объёма передаваемых данных;
- внесение дополнительной информации в передаваемое сообщение;
- внедрение в сообщение цифрового водяного знака;
- восстановление сообщения на основании любого блока контейнера произвольной размерности.

Преобразование исходной информации в несущий контейнер выполняется путём применения следующего алгоритма (см. Рис. 1).

1. Составление алфавита преобразования.
2. Формирование на алфавите интерпретационных звуко сочетаний.
3. Инициализация параметров преобразования.
4. Построение сети преобразования. Для организации процесса формирования корпуса наряду с матрицей переходных вероятностей требуются также вектор начальных вероятностей и матрица эмиссии (см. Табл. 1). Вектор начальных вероятностей необходим для идентификации вероятности нахождения в каждом из трёх возможных состояний цепи в момент времени начала генерации корпуса. Матрица эмиссии позволяет определить продуцирование определённого звуко сочетания при нахождении в некотором состоянии цепи после выполнения очередного итерационного перехода.

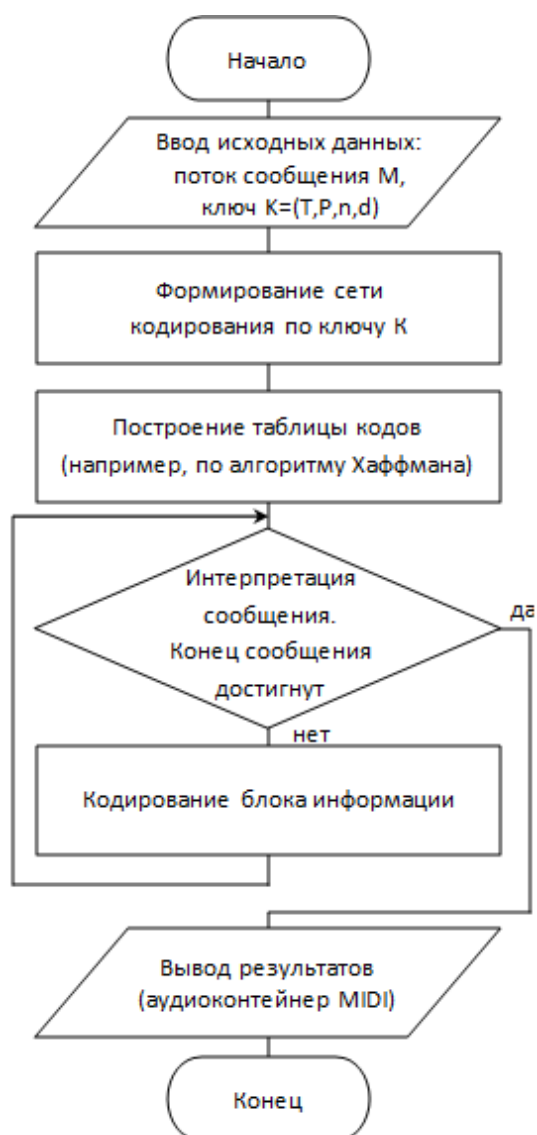


Рисунок 1 – Алгоритм преобразования исходного потока сообщения в акустический корпус

Таблица 1 – Матрица эмиссии

Состояния	Сочетания частот		
	C ₁	C ₂	C ₃
T	0,1	0,7	0,2
S	0,3	0,2	0,5
D	0,6	0,3	0,1

5. Формирование таблицы соответствия кодов.
6. Построение несущего мелодического контейнера.
7. Воспроизведение результирующего контейнера.

Оперативное импульсное восстановление исходных данных осуществляется с помощью окна связности. Например, по описанному в таблице 2 окну связности возможно провести прямой обход сформированного в таблице 3 корпуса для восстановления потери звена (C₂; R₂) в его структуре {(C₁; R₁), (C₂; R₂), (C₃; R₃)}.

Таблица 2 – Окно связности

Звукосочетание	C_1	C_2	C_3
C_1	0	R_1	0
C_2	0	0	R_2
C_3	R_3	0	0

Таблица 3 – Пример акустического корпуса

Параметр корпуса	Значения параметров			
Номер такта	1	2	3	mmm
Звукосочетание	C_1	-	C_3	C_1
Ритмическая связка	R_1	-	R_3	R_i

Описанный в данной статье метод имеет следующий спектр преимуществ по сравнению с существующими аналогами:

- восстановление данных без использования избыточности;
- восстановление блоков информации любой размерности;
- передача в составе контейнера дополнительной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удалов, А.П. Избыточное кодирование при передаче информации двоичными кодами / А.П. Удалов, Б.А. Супругин. – Москва: Связь, 1964. – 270 с.
2. Элиас, П. Безошибочное кодирование / П. Элиас // Коды с обнаружением и исправлением ошибок. – Москва, 2001. – С. 59-71.
3. Агеев, В.М. Теория информации и кодирования: дискретизация и кодирование измерительной информации / В.М. Агеев. – Москва: МАИ, 1977. – 59 с.
4. Заренин, Ю.Г. Корректирующие коды для передачи и обработки информации / Ю.Г. Заренин. – Киев: Техника, 1965. – 170 с.
5. Шастова, Г.А. Кодирование и помехоустойчивость передачи телемеханической информации / Г.А. Шастова. – Москва: Энергия, 1966. – 454 с.

REFERENCES

1. Udalov, A.P. Redundant coding in the transmission of information by binary codes / A.P. Udalov, B.A. Suprugin. – Moscow: Svyaz, 1964. – 270 p.
2. Elias, P. Error-free coding / P. Elias // Codes with error detection and correction. – Moscow, 2001. – P. 59-71.
3. Ageyev, V.M. Information and coding theory: discretization and coding of measurement information / V.M. Ageyev. – Moscow: MAI, 1977. – 59 p.
4. Zarenin, Yu.G. Correction codes for the transmission and processing of information / Yu.G. Zarenin. – Kyiv: Tekhnika, 1965. – 170 p.
5. Shastova, G.A. Coding and noise immunity of telemechanical information transmission / G.A. Shastova. – Moscow: Energiya, 1966. – 454 p.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЧАСТОТЫ СБОЕВ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗА СПЛОШНОЙ ЗАЩИТОЙ В ФОРМЕ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

**A MODEL FOR CALCULATING THE FAILURE RATE OF RADIO ELECTRONIC
EQUIPMENT ELEMENTS BEHIND A CONTINUOUS PROTECTION IN THE FORM OF A
PARALLELEPIPED**

Панюшкин А.Н., инженер II-й категории,
Научное конструкторско-технологическое
бюро «ФЕРРИТ», Воронеж, Россия

Panyushkin A.N., Engineer of the II-th
graduate-category, Scientific constructional-
technological burro "FERRIT", Voronezh,
Russia

Панюшкин Н.Н., доктор технических наук,
доцент, профессор, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Panyushkin N.N., DrSc in Technical Sciences,
Docent, Professor, Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Бирюкова И.П., кандидат педагогических
наук, доцент, доцент, ФГКВУ ВО Военный
учебно-научный центр Военно-воздушных
сил «Военно-воздушная академия им.
профессора Н.Е. Жуковского и
Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Biryukova I.P., PhD in pedagogical sciences,
Docent, Associate professor, Military
Educational and Scientific Center of the Air
Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air
Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. Разработана математическая модель для расчета частоты одиночных сбоев в радиоэлектронной аппаратуре в условиях действия ионизирующих излучений космического пространства для орбиты с высотой около 400 километров от поверхности Земли. Модель позволяет проводить анализ зависимости частоты сбоев от габаритных и массовых характеристик сплошных радиационных защит в форме прямоугольного параллелепипеда.

Ключевые слова: радиационная защита, ионизирующее излучение, тяжелые заряженные частицы, высокоэнергетические протоны, частота сбоев, математическая модель.

Abstract. A mathematical model has been developed for calculating the frequency of single failures in electronic equipment under conditions of ionizing radiation in outer space for an orbit with an altitude of about 400 kilometers from the Earth's surface. The model allows for an analysis of the dependence of the frequency of failures on the overall and mass characteristics of solid radiation shields in the form of a rectangular parallelepiped.

Key words: radiation protection, ionizing radiation, heavy charged particles, high-energy protons, failure rate, mathematical model.

Проектирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космического применения требует от разработчиков выполнения требований по радиационной стойкости (РС), в

частности требований по сбое- отказоустойчивости. Методика определения показателей РС основана на теоретико-экспериментальном методе с применением аппроксимаций Вейбуллы для частоты сбоев в условиях воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) солнечного и галактического излучения и аппроксимации Бендела для высокоэнергетичных протонов (ВЭП) [1]:

$$\nu_{PЭА} = \sum_{i=1}^n n_{ЭРИi} \left(\int_{L_0}^{L_{MAX}} \sigma_i(L) \varphi_{ТЗЧ}(L) dL + \int_{E_0}^{E_{MAX}} \sigma_i(E) \varphi_p(E) dE \right), \quad (1)$$

где $\nu_{PЭА}$ – частота сбоев в РЭА, в целом, 1/с;

$\varphi_{ТЗЧ}(L)$ – дифференциальный спектр линейных потерь энергии (ЛПЭ) плотности потока ТЗЧ, част·см⁻²·с⁻¹·МэВ⁻¹·см⁻²·мг;

$\varphi_p(E)$ – дифференциальный энергетический спектр плотности потока ВЭП, част·см⁻²·с⁻¹·МэВ⁻¹;

L_0 – пороговая величина ЛПЭ, МэВ·см²·мг⁻¹;

E_0 – пороговая величина энергии ВЭП, МэВ;

L_{MAX} – предельное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ, МэВ·см²·мг⁻¹;

E_{MAX} – предельное значение энергии в спектре ВЭП, МэВ;

$\sigma_i(L)$, $\sigma_i(E)$ – сечения сбоев или одиночных отказов для i-ой группы типономиналов ЭРИ с одинаковыми значениями $\sigma_i(L)$ и $\sigma_i(E)$ в зависимости от ЛПЭ или энергии ВЭП, соответственно, см²;

$n_{ЭРИi}$ – количество ЭРИ в i-ой группе типономиналов с одинаковыми значениями сечений $\sigma_i(L)$ или $\sigma_i(E)$ в РЭА;

n – количество групп типономиналов, отличающихся значениями сечений $\sigma_i(L)$ или $\sigma_i(E)$ в данной РЭА.

Частота сбоев $\nu_{PЭА}$ вычисляется отдельно для каждого вида ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП) солнечного космического излучения (СКЛ), галактического космического излучения (ГКЛ) и естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ). Полная частота отказов ν равна сумме частот от каждого вида ИИ. Вероятность отказов P за определённый промежуток времени t рассчитывают по формуле:

$$P = 1 - e^{-\nu t}.$$

В выражении (1) дифференциальные спектры ЛПЭ и ВЭП зависят от массовой толщины защиты, которая определяется произведением плотности материала ρ на толщину барьера защиты Δ :

$$\delta = \rho \cdot \Delta. \quad (2)$$

Реальная толщина барьера плоской защиты зависит от угла падения частиц ИИ на его кромку [2], поэтому $\varphi_{ТЗЧ}(L)$ и $\varphi_p(E)$ будут зависеть от её геометрических размеров.

Эффективная массовая толщина барьера защиты превышает её реальную толщину [2]:

$$\delta_{EFF} = k_{EFF} \cdot \delta, \quad (3)$$

где k_{EFF} – безразмерный коэффициент, определяемый выражениями [2]:

$$k_{EFF} = \frac{l_0^2}{x_{MAX} y_{MAX}} \int_0^{\alpha_{MAX}} \int_0^{\beta_{MAX}} \frac{\sqrt{1 + tg^2 \alpha + tg^2 \beta}}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta} d\alpha d\beta; \quad (4)$$

$$\alpha_{MAX} = \arctg\left(\frac{x_{MAX}}{l_0}\right); \quad \beta_{MAX} = \arctg\left(\frac{y_{MAX}}{l_0}\right), \quad (5)$$

где l_0 – наименьшее расстояние (перпендикуляр) от стягивающей поверхности до расчетной точки; x_{MAX} , y_{MAX} – половинные размеры поверхности плоского барьера по осям ox и oy , соответственно.

Известные экспериментальные зависимости $\varphi_{TЗЧ}(L)$ и $\varphi_p(E)$ от массовой толщины сплошной сферической защиты (~ 400 км от поверхности Земли) [3] позволяют использовать для их аппроксимации экспоненциальную функцию в виде:

$$\varphi_j(\delta) = a_j \cdot e^{b_j \cdot \delta} + c_j, \quad (6)$$

где a_j , b_j , $\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$; c_j – размерные константы аппроксимации для j -го вида ИИ, размерность a_j и c_j совпадают с размерностями $\varphi_{TЗЧ}(L)$ или $\varphi_p(E)$.

Заметим, что для плоской защиты плотность потока дополнительно определяется размером телесного угла Ω , который меньше, чем для сплошной сферы ($\Omega_{SPF} = 4\pi$). Поэтому $\varphi_{TЗЧ}(L)$ и $\varphi_p(E)$ должны быть умножены на отношение $\omega = \Omega/\Omega_{SPF}$. Выражение для ω получено в виде:

$$\omega = \frac{(\cos \alpha_{MIN} - \cos \alpha_{MAX})(\beta_{MAX} - \beta_{MIN})}{\pi}. \quad (7)$$

Для случая плоской ограниченной защиты $\cos \alpha_{MIN} = 1$, $\beta_{MIN} = 0$.

Принимая во внимание формулы (2) – (7), получим выражение для частоты сбоев в РЭА при использовании сплошных защит в форме прямоугольных параллелепипедов в зависимости от их габаритно-массовых характеристик:

$$\nu_{PЭА} = \sum_{i=1}^n n_{ЭПИi} \left(6\omega \left(\varphi_{TЗЧ}(\delta_{EFF}) \int_{L_0}^{L_{MAX}} \sigma_i(L) \varphi_{TЗЧ}(L) dL + \varphi_p(\delta_{EFF}) \int_{E_0}^{E_{MAX}} \sigma_i(E) \varphi_p(E) dE \right) \right). \quad (8)$$

В формуле (8) учтено, что для сплошной защиты в форме прямоугольного параллелепипеда количество граней (плоских защит) равно 6.

Таким образом, в работе получена математическая модель для расчета частоты одиночных сбоев в РЭА в условиях действия ИИ КП. Полученная модель позволяет проводить анализ зависимости частоты сбоев от габаритных и массовых характеристик сплошных радиационных защит в форме прямоугольного параллелепипеда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 134-0139-2005. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценка стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по перемежающимся и катастрофическим отказам. – Москва: ЦНИИмаш, 2005.

2. Панюшкин, А.Н. Модель локальной дозовой нагрузки сплошной защиты с плоскими ограничивающими поверхностями / А.Н. Панюшкин, Н.Н. Панюшкин, И.П. Бирюкова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. – №3. – С. 11-16.

3. SSP 50094 Revision B June 2016 NASA/RSA Joint Specifications/Standards Document for the ISS Russian Segment, Houston, Texas. – 494 p. – URL: https://imlive.s3.amazonaws.com/Federal%20Government/ID42272755263273611130549092035837226177/SSP_50094-RevB.pdf.

REFERENCES

1. RD 134-0139-2005. Spacecraft hardware, instruments, devices and equipment. Test methods and resistance assessment to space charged particles for intermittent and catastrophic failures. - Moscow: TsNIIMash, 2005.

2. Panyushkin, A.N. Model of local dose load of continuous protection with flat bounding surfaces / A.N. Panyushkin, N.N. Panyushkin, I.P. Biryukova // Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on radioelectronic equipment. - 2021. - No. 3. - P. 11-16.

3. SSP 50094 Revision B June 2016 NASA/RSA Joint Specifications/Standards Document for the ISS Russian Segment, Houston, Texas. – 494 p. – URL: https://imlive.s3.amazonaws.com/Federal%20Government/ID42272755263273611130549092035837226177/SSP_50094-RevB.pdf.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА СЕЧЕНИЯ СБОЯ
МИКРОСХЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**
MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE FAILURE CROSS-SECTION OF
MICROCIRCUITS UNDER PROTON RADIATION EXPOSURE

Котляров В.В., аспирант, ФГБОУ ВО **Kotlyarov V.V.**, Postgraduate student,
«Воронежский государственный Voronezh State University of Forestry and
лесотехнический университет имени Technologies named after G.F. Morozov
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия Voronezh, Russia

Аннотация. Предложена математическая модель для оценки сечения сбоя интегральных микросхем при воздействии высокоэнергетичных протонов космического пространства. Модель учитывает параметры чувствительного объёма, спектр протонного излучения, вероятность ядерных взаимодействий и энерговыделение вторичных частиц. Получены аналитические выражения для расчёта интенсивности единичных эффектов. Представлены графические зависимости, иллюстрирующие влияние параметров микросхемы на радиационную стойкость, а также проведён анализ чувствительности модели к изменениям входных данных.

Ключевые слова: радиационная стойкость, микросхемы, протонное излучение, сечение сбоя, математическое моделирование, вторичные ионы.

Abstract. A mathematical model is proposed to estimate the failure cross-section of integrated circuits exposed to high-energy cosmic protons. The model takes into account the sensitive volume geometry, proton energy spectrum, nuclear interaction probability, and energy deposition from secondary particles. Analytical expressions for the rate of single event effects are derived. Graphical dependencies illustrating the effect of microcircuit parameters on radiation resistance are presented, as well as an analysis of the sensitivity of the model to changes in input data.

Keywords: radiation hardness, microcircuits, proton radiation, failure cross-section, mathematical modeling, secondary ions.

Современные электронные компоненты, используемые в космической технике, подвержены воздействию жесткого радиационного окружения. Один из наиболее опасных видов радиационных эффектов – единичные эффекты (SEE), возникающие при попадании отдельной высокоэнергетичной частицы в чувствительный элемент интегральной схемы. В результате такого попадания в небольшом объеме полупроводника локально высвобождается значительное количество заряда, что может приводить к сбоям (SEU) или необратимым отказам элемента. Математическое моделирование стойкости полупроводниковых изделий к единичным эффектам позволяет на этапе проектирования предсказать надежность аппаратуры в космическом пространстве и обосновать выбор элементной базы. Данная работа посвящена разработке и анализу модели оценки стойкости интегральных микросхем (ИМС) к

воздействию высокоэнергетичных протонов космического пространства. Модель опирается на физические принципы генерации заряда в объеме полупроводника при радиационном облучении и учитывает спектр энергий космических протонов, а также геометрию чувствительных областей микросхемы.

Единичные радиационные эффекты в микросхемах были подробно изучены в ряде предыдущих работ [1, 2]. Показано, что критическим условием возникновения сбоя или отказа является превышение некоторой пороговой величины заряда в чувствительном объеме прибора. Согласно зарядовой модели единичного сбоя [1], поражающая частица вызывает сбой, если сгенерированный ею избыточный заряд Q в чувствительном объеме $V_{эф}$ превышает критический уровень $Q_{кр}$. Этот критерий можно выразить через граничные условия на энерговыделение частицы. Пусть $(dE/dx)_i$ – линейные потери энергии на ионизацию (ЛПЭ) частицы в веществе с кинетической энергией E . Тогда условие генерации критического заряда формулируется как:

$$\int_0^{X_{ак}} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i dx \geq E_p, \quad (1)$$

где $X_{ак}$ – длина пробега частицы внутри чувствительного объема (активная толщина); E_p – пороговая энергия, которую должна передать частица в объеме $V_{эф}$ для генерации заряда $Q_{кр}$. Величина E_p связана с критическим зарядом $Q_{кр}$ следующим образом:

$$E_p = 22.5 Q_{кр}, \quad (2)$$

где $Q_{кр}$ выражен в пикокулонах (пКл), а E_p – в МэВ. Коэффициент 22,5 МэВ/пКл соответствует энергии, необходимой для образования данного заряда в кремнии [1], а E_p – это эквивалентная энергия ионизации, порог сбоя по энергии, соответствующий критическому заряду $Q_{кр}$. Условия (1) – (2) означают, что единичный эффект (сбой памяти, переключение триггера и т.п.) произойдет, если интегральное энерговыделение частицы в пределах эффективного чувствительного объема $V_{эф}$ достигает порогового значения E_p , эквивалентного критическому заряду схемы.

При аналитическом моделировании чувствительный элемент ИМС обычно представляют в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами $a \cdot b \cdot c$ (характерными размерами диффузионной области, зоны коллектора или объема памяти). Эффективный объем чувствительного элемента определяется как:

$$V_{эф} = a \cdot b \cdot c$$

и имеет размерность см^3 . Длина пути частицы внутри такого параллелепипеда при случайном изотропном попадании может принимать значения от 0 до максимальной хорды l_{max} , равной диагонали параллелепипеда: $l_{max} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$. Для упрощения анализа часто рассматривается случай равномерного распределения длины трека l от 0 до l_{max} при изотропном облучении. Задавая параметры a, b, c на основе конструктивно-технологических данных конкретной микросхемы, можно определить $V_{эф}$ и оценить типичные значения $X_{ак} = \rho_{Si} \cdot l$ и, следовательно, оценить необходимое линейное энерговыделение для достижения порога E_p .

В общем случае можно выделить два механизма, приводящих к генерации избыточного заряда в чувствительном элементе [4]:

1. Прямое ионизационное воздействие (ЛПЭ) первичной заряженной частицы, обладающей достаточно высокой удельной ионизационной способностью (большим атомным номером или энергией, соответствующей максимальным потерям на ионизацию). Такой механизм характерен для тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), например, ядер космических лучей или осколков ядерных реакций с большим Z . Именно этот случай обычно рассматривается при традиционных испытаниях на тяжелых ионах и моделируется с помощью критического линейного переноса энергии (LET) [2]. Если LET частицы превышает некоторый порог $LET_{кр}$, соответствующий (1) и (2), то частица способна породить критический заряд и вызвать сбой.

2. Косвенное воздействие через вторичные ядерные фрагменты – высокоэнергетичная первичная частица (например, протон) не обладает достаточным LET, чтобы напрямую вызвать сбой, однако при ядерном неупругом взаимодействии с атомом решетки полупроводника может порождать вторичные тяжелые частицы (дочерние ядра, осколки ядер реакции), которые, двигаясь в веществе, обладают значительно более высоким LET. Эти вторичные ионы, возникшие внутри или около чувствительного объема, выступают как внутренний источник тяжелых частиц, способный вызвать локальное энерговыделение, превышающее порог E_p [3].

На рисунке 1 иллюстрируются оба механизма. Тяжелая заряженная частица (красная стрелка) при прохождении через чувствительный объем $V_{эф}$ непосредственно ионизирует вещество по своему треку, генерируя плотный столб заряда. Напротив, протон (синяя стрелка), проходя через кристалл, сам по себе имеет малые потери на ионизацию и не способен создать критический заряд напрямую. Однако при столкновении протона с ядром кремния (черная точка на рисунке) происходит ядерная реакция, в результате которой выбивается вторичный осколок – тяжелый ион (зеленая пунктирная стрелка). Этот осколок, рожденный внутри кристалла, обладает высоким LET и может локально создать заряд, достаточный для сбоя.

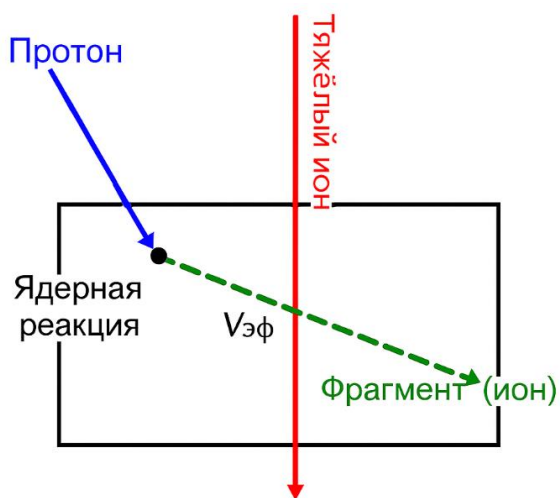


Рисунок 1 – Схема механизмов энерговыделения: тяжелый ион непосредственно ионизует чувствительный объем $V_{эф}$; протон инициирует в кремнии ядерную реакцию с выбросом вторичного тяжелого фрагмента, который ионизует материал вдоль своего трека

Высокоэнергетичные протоны (ВЭП) космического пространства относятся ко второму механизму. Протоны, являясь легкими частицами с единичным зарядом, имеют сравнительно низкую ионизационную способность. Максимальное линейное энерговыделение первичного протона в кремнии составляет порядка $0.2 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ [4], что значительно меньше типичных пороговых значений E_p для большинства интегральных схем (критические заряды обычно требуют эквивалент E_p в несколько МэВ).

Одиночный протон, пролетая через чувствительный объем, как правило, не способен напрямую сгенерировать критический заряд $Q_{\text{кр}}$ и вызвать сбой. Однако при энергиях порядка десятков и сотен МэВ и выше протоны способны вступать в неупругие ядерные реакции (реакции типа $p + \text{Si}$), выбивая из атомов кремния различные вторичные частицы: осколки ядер кремния, лёгкие ядра (литий, бериллий и др.), а также нуклоны и мезоны. Тяжелые ядра-осколки, образующиеся при таких реакциях, обладают высокой плотностью ионизации (высоким LET) и, пройдя небольшой путь вблизи точки взаимодействия, могут отдать в чувствительном объеме энергию, сравнимую с энергией тяжелого космического иона [3, 4]. Иначе говоря, внутри кристалла возникает вторичный тяжелый фрагмент, способный вызвать единичный эффект подобно внешнему тяжелому иону. Этот процесс можно рассматривать как основной источник сбоев от протонов для элементов с достаточно большим $Q_{\text{кр}}$.

Следует отметить, что для новейших субмикронных технологий пороговые заряды $Q_{\text{кр}}$ значительно снизились (до единиц фемтокулон), и в ряде случаев даже прямое ионизационное действие протонов низких энергий может приводить к сбоям [8]. Так, экспериментально обнаружено появление SEU от протонов с энергией менее $\sim 10 \text{ МэВ}$ в 65-нм SRAM.

Этот эффект обусловлен тем, что при небольшом критическом заряде даже относительно малое линейное энерговыделение протона на своем пути через чувствительную область может оказаться достаточным для переключения ячейки памяти [8]. В данной работе, однако, рассматривается классический сценарий для более «крупных» технологий, когда $Q_{\text{кр}}$ велик и прямое воздействие протонов несущественно, а основную опасность представляют именно вторичные осколки ядер. Тем не менее, учитывая прогресс технологий, при оценке стойкости современной элементной базы важно принимать во внимание и возможность прямых протон-индуцированных сбоев [5, 8] наряду с рассмотренной ниже моделью ядерных реакций.

Для количественной оценки частоты единичных эффектов от космических протонов необходимо учитывать два аспекта: (а) вероятность того, что протон при столкновении с атомом кремния породит тяжелый фрагмент, способный вызвать сбой; (б) поток и спектр протонов, достигающих прибора на данной орбите (с учетом защиты). В рамках предлагаемой модели (а) описывается с помощью параметра $\epsilon(E_p)$ – доли ядерных взаимодействий, приводящих к возникновению фрагмента с энерговыделением в $V_{\text{эф}}$ выше порога E_p [4]. Другими словами, $\epsilon(E_p)$ – это вероятность того, что при реакции протона с кремнием выделится вторичная тяжёлая частица, которая в пределах чувствительного объема отдаст энергию E_p или более (т.е. сгенерирует заряд $Q_{\text{кр}}$ или выше). Этот параметр зависит как от порога E_p (то есть от специфики конкретного прибора), так и от энергии самого протона: при

росте энергии протона растет и вероятность более «жесткого» взаимодействия, дающего тяжелый осколок. На основании анализа доступных экспериментальных данных по протон-индуцированным сбоям [3] и их обобщения в работе [4] авторы модели получили приближенное выражение для функции выхода ϵ в виде экспоненциальной зависимости:

$$\epsilon(E_p, E) \approx 1 - \exp[-0.172(E - E_{p0})], \quad (3)$$

справедливое для $E \geq E_{p0}$ (при меньших энергиях протонов вероятность выхода фрагмента с пороговым энерговыделением практически нулевая). Здесь E – кинетическая энергия протона, а E_{p0} – минимальная энергия протона, начиная с которой возможны ядерные реакции, дающие энерговыделение E_p в чувствительном объеме. Значение E_{p0} по сути является порогом реакций типа (p, Si) с выходом тяжелых осколков: для протонов с энергией ниже E_{p0} ни один вторичный фрагмент не сможет пробежать в $V_{эф}$ с достаточным LET, чтобы обеспечить E_p . Из эмпирических оценок было найдено соотношение [4]:

$$E_{p0} \approx 29(E_p - 0.69), \quad (4)$$

где E_{p0} и E_p подставляются в МэВ. Формула (4) задаёт связь между требуемым порогом энерговыделения E_p и пороговой энергией протонов, способных генерировать такие события. Например, если для данной ИМС $E_p = 10$ МэВ (что соответствует $Q_{кр} \approx 0.44$ пКл по (2)), то только протоны с энергией выше $E_{p0} \approx 29(10 - 0.69) \approx 270$ МэВ могут вызывать сбои. Для меньшего порога $E_p = 5$ МэВ ($Q_{кр} \approx 0.22$ пКл) достаточны протоны с $E > E_{p0} \approx 125$ МэВ, а для более «крепкой» схемы с $E_p = 15$ МэВ ($Q_{кр} \approx 1$ пКл) потребуется $E_{p0} \approx 415$ МэВ.

Вся совокупность взаимодействий протонов с кремнием, ведущих к сбоям, определяется двумя параметрами конкретного прибора: $V_{эф}$ и E_p или эквивалентно $Q_{кр}$. Модель расчёта интенсивности сбоев строится следующим образом. Рассмотрим поток протонов с дифференциальным энергетическим спектром $\varphi_p(E)$, проникающий к микросхеме (например, спектр галактических космических лучей или солнечных протонов за известной защитой). Для каждого протона с энергией E вероятность того, что он взаимодействует с атомом кремния в пределах чувствительного объема $V_{эф}$, равна произведению сечения ядерной реакции на число целей (атомов) в этом объеме. Число атомов кремния в объеме $V_{эф}$ составляет $N_{ядр}V_{эф}$, где $N_{ядр}$ – объемная концентрация атомов Si. При плотности кремния 2.33 г/см³ и атомном весе 28 это значение составляет примерно

$$N_{ядр} \approx 5.0 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

что согласуется с табличной атомной концентрацией кремния [4]. Сечение неупругого взаимодействия протона с ядром кремния $\sigma_{ядер}$ можно оценить геометрически или по экспериментальным данным. Для высокоэнергетичных протонов полное неупругое сечение на ядре кремния порядка $\sim 10^{-25}$ (сотни миллибарн) [4]. В частности, использовалась оценка $\sigma_{ядер} \approx 6.4 \times 10^{-25}$, полученная из модели ядерного радиуса. Значит, вероятность того, что единичный протон, пролетая через чувствительный объем, вступит в ядерную реакцию с атомом кремния, равна $N_{ядр}V_{эф}\sigma_{ядер}$. Если такая реакция произошла, то с вероятностью $\epsilon(E_p, E)$ (3) она приведет к появлению критического энерговыделения в объеме. С учетом этого

полный дифференциальный выход сбоев (число сбоев в единицу времени на единицу энергии протонов) запишется как:

$$\omega(E) = \varphi_p(E) N_{\text{ядр}} V_{\text{эф}} \sigma_{\text{ядер}} \epsilon(E_p, E).$$

Интегрируя $\omega(E)$ по всему спектру протонов, получаем суммарную частоту единичных эффектов ν (число сбоев в приборе в единицу времени):

$$\nu = M \int_{E_{p0}}^{E_{\text{max}}} \varphi_p(E) N_{\text{ядр}} V_{\text{эф}} \sigma_{\text{ядер}} \epsilon(E_p, E) dE, \quad (5)$$

где M – число чувствительных элементов в приборе (например, число ячеек памяти, бит). Если интересует сечение сбоя (вероятность сбоя на частицу), можно нормировать ν на поток. В частности, сечение единичного эффекта на один бит определяется как отношение частоты сбоев в одной ячейке к потоку протонов выше пороговой энергии E_{p0} :

$$\sigma_i(E_p) = \frac{\nu}{M F(>E_{p0})} = N_{\text{ядр}} V_{\text{эф}} \sigma_{\text{ядер}} \epsilon(E_p), \quad (6)$$

где $F(>E_{p0}) = \int_{E_{p0}}^{\infty} \varphi_p(E) dE$ – интегральный поток протонов выше порога реакций. Формула (6) непосредственно следует из предыдущего выражения, если спектр считать постоянным выше E_{p0} , однако в практике расчёта обычно используют более точное интегрирование по спектру. Тем не менее, (6) полезна для понимания: σ_i пропорционально объему $V_{\text{эф}}$ и вероятности ядерного взаимодействия, умноженной на долю реакций, дающих сбой.

Подставляя численные значения $N_{\text{ядр}}$ и $\sigma_{\text{ядер}}$ в (6), получим удобное приближенное выражение. При $N_{\text{ядр}} = 5.0 \times 10^{22-3}$ и $\sigma_{\text{ядер}} = 6.4 \times 10^{-25} \text{ см}^2$ их произведение равно $N_{\text{ядр}} \sigma_{\text{ядер}} \approx 3.2 \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Тогда:

$$\sigma_i(E_p) \approx 3.2 \times 10^{-2} V_{\text{эф}} \epsilon(E_p). \quad (7)$$

Здесь $V_{\text{эф}}$ подставляется в кубических сантиметрах.

Функция $\epsilon(E_p)$ при интегрировании по спектру превращается в эффективную вероятность сбоя для данного прибора. В работе [4] эмпирическую формулу (3) для ϵ дифференцировали и строили семейство кривых $\sigma_i(E)$, зависящих как от энергии протона, так и от параметров прибора ($E_p, V_{\text{эф}}$). На рисунке 2 приведены расчетные зависимости сечения сбоя σ_i на бит от энергии протона для фиксированного порога $E_p = 10 \text{ МэВ}$ и нескольких значений эффективного объема $V_{\text{эф}}$. Видно, что при достижении протонами пороговой энергии $E_{p0} \approx 270 \text{ МэВ}$ сечение резко нарастает от нуля до некоторого плато. Увеличение $V_{\text{эф}}$ (размера чувствительного элемента) приводит к пропорциональному росту предельного значения σ_i на плато, поскольку большая мишень содержит больше ядер и дает выше вероятность реакции. Так, для объема $V_{\text{эф}} = 8 \times 10^{-9} \text{ см}^3$ (например, чувствительная область $20 \times 20 \times 20 \text{ мкм}^3$) максимальное сечение на бит примерно в 8 раз превышает таковое для объема $1 \times 10^{-9} \text{ см}^3$ ($10 \times 10 \times 10 \text{ мкм}^3$). При этом положение крутой части кривой (энергетический порог включения эффекта) определяется E_p и не зависит от объема: во всех случаях скачок происходит около $E \sim 270 \text{ МэВ}$, соответствующих $E_p = 10 \text{ МэВ}$. Размеры чувствительной области влияют на абсолютную вероятность сбоя (путем масштабирования σ_i), но не на минимальную энергию протонов, способных вызвать эффект.

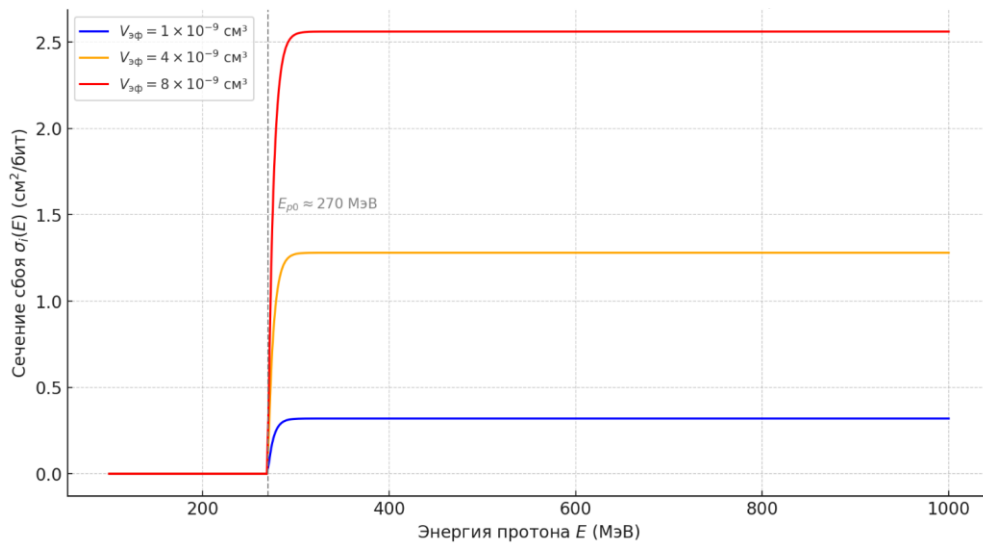


Рисунок 2 – Расчетные кривые сечения сбоя $\sigma_i(E)$ для порога $E_p = 10$ МэВ и разных эффективных объемов: 1) $V_{эф} = 1 \times 10^{-9}$ см³ (синяя кривая); 2) $V_{эф} = 4 \times 10^{-9}$ см³ (желтая); 3) $V_{эф} = 8 \times 10^{-9}$ см³ (красная). Сечения нормированы "на бит". Рост σ_i начинается при $E \approx 270$ МэВ (вертикальная область кривых), что соответствует достижению порогового энерговыделения $E_p = 10$ МэВ вторичными фрагментами

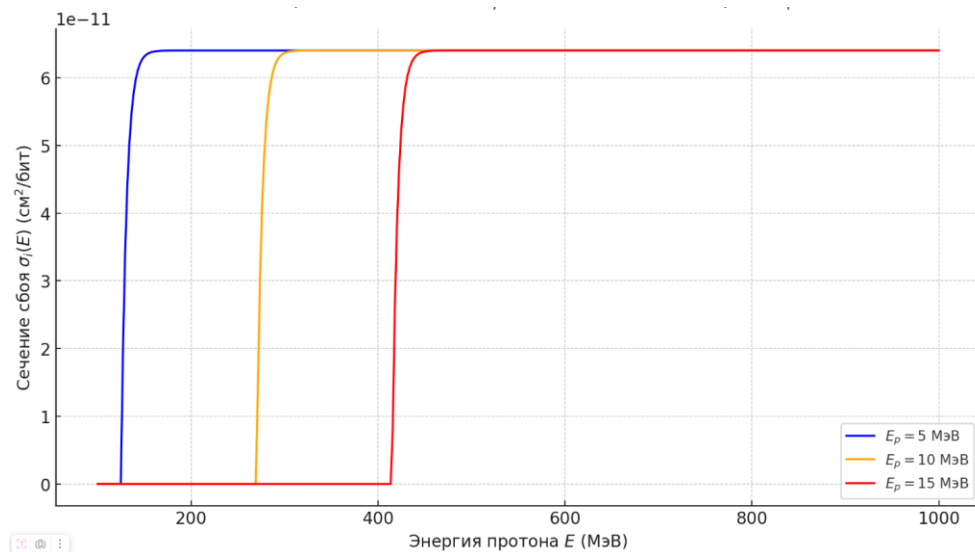


Рисунок 3 – Влияние порога стойкости E_p на сечение сбоя (при $V_{эф} = 2 \times 10^{-9}$ см³). Показаны зависимости $\sigma_i(E)$ для порогового энерговыделения 5 МэВ (синяя кривая), 10 МэВ (желтая) и 15 МэВ (красная). Более "чувствительный" элемент (меньший E_p) начинает испытывать сбои от протонов с существенно более низких энергий. При достаточно высоких энергиях протонов ($E \gg E_{p0}$) все кривые выходят на одинаковое плато σ_i^{max} определяемое геометрией чувствительного объема

На рисунке 3 показано влияние величины порога E_p на зависимость $\sigma_i(E)$ при фиксированном объеме (для примера взят $V_{эф} = 2 \times 10^{-9}$ см³). С уменьшением E_p (т.е. при менее требовательном устройстве с меньшим критическим зарядом) пороговая энергия протонов E_{p0} смещается в область меньших значений, и кривая $\sigma_i(E)$ сдвигается влево. Так,

для $E_p = 5$ МэВ начало роста σ_i лежит около $E_{p0} \approx 125$ МэВ, в то время как для $E_p = 15$ МэВ эффект возникает лишь с $E > 400$ МэВ. Все кривые стремятся к одному и тому же уровню при больших энергиях (в пределе $E \gg E_{p0}$), поскольку максимальное σ_i определяется в основном геометрией и в рассмотренном примере одинаково для всех – около 6.4×10^{-11} см² на бит. Однако площадь под кривой (интеграл по спектру, пропорциональный ожидаемому числу сбоев) будет существенно больше для приборов с низким E_p за счет захвата более широкого диапазона энергий протонов. Это означает, что схемы с более низким критическим зарядом статистически более уязвимы в реальных условиях космического облучения.

Для практического использования полученной модели необходимы данные о спектре протонов $\varphi_p(E)$ в условиях интересующей орбиты или миссии. Космический протонный фон обычно формируется двумя составляющими: галактическими космическими лучами, дающими сравнительно постоянный изотропный спектр высоких энергий (от сотен МэВ до нескольких ГэВ), и протонами радиационных поясов или солнечного происхождения, спектры которых могут быть различны и зависят от активности Солнца, высоты орбиты, экранировки и т.д. [10]. Как правило, для оценки стойкости применяются либо эмпирические модели среды (модель CREME96 [10] для ГКЛ и солнечных всплесков, модели AP-8/AE-8 для радиационных поясов), либо прямые данные по спектрам, полученные со спутников (NOAA/GOES и др.). В любом случае, задача сводится к подстановке спектра в интеграл (5). Если спектр задан в виде таблицы или эмпирической функции, интегрирование, как правило, выполняется численно в составе программного обеспечения расчёта радиационной стойкости. В простейшем приближении можно оценить ν через интегральный поток $F(> E_{p0})$ выше пороговой энергии, как в (6), однако для большей точности следует интегрировать по полному спектру, учитывая вклад протонов всех энергий выше порога.

Модель (5) – (7) была реализована авторами [4] в виде программного комплекса для оперативной оценки стойкости ИМС. Этот комплекс позволяет пользователю задавать параметры прибора ($V_{эф}$, $Q_{кр}$ и др.), выбирать модель радиационной обстановки (типичный спектр ГКЛ для солнечного минимума/максимума, спектры вспышек, орбитальные модели и пр.) и рассчитывать ожидаемую интенсивность сбоев. Полученные результаты были верифицированы на основе экспериментальных данных. В частности, проведено сравнение расчетов с результатами натурных испытаний на орбитальных спутниках для статических ОЗУ за период 2001–2006 гг. Отмечено, что модель дает хороший прогноз: расхождение между рассчитанным числом сбоев и фактически наблюдаемым в полете не превышало 5–20%, что находится в пределах погрешности ввода исходных данных. Для сравнения, использование распространённого зарубежного кода CREME96 дало значительно большие отклонения.

Данный подход позволяет предсказывать сечения протонно-индуцированных сбоев и интенсивность SEU/SEL в электронных компонентах как функцию от условий полёта и свойств самого компонента. Зная рассчитанное по (6) сечение на бит $\sigma_i(E_p)$ и интегральный протонный флюенс за время миссии, можно оценить вероятность накопления хотя бы одного сбоя за заданный период. Модель наглядно показывает зависимость радиационной стойкости

от размеров чувствительных областей и уровней критического заряда, что важно при выборе технологий для космического применения.

Полученные результаты согласуются с общими тенденциями: уменьшение размеров ячеек (снижение $V_{эф}$) и порога сбоя $Q_{кр}$ делает прибор менее стойким к воздействию протонов, хотя и уменьшает влияние тяжелых ионов (поскольку для них $Q_{кр}$ тоже снижается). Этот компромисс следует учитывать при радиационно-стойком проектировании. Дополнительно, модель может быть расширена для учета других эффектов – множественных сбойных бит (MBU) при попадании нескольких осколков или группы протонов, эффектов вторичных нейтронов и т.п.

Для более строгого анализа возможно сопряжение аналитической модели с Монте-Карло симуляциями на уровне траекторий (с помощью GEANT4 или аналогичных инструментов), что позволит учесть геометрию кристалла и распределение энергии от каскада реакций более детально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаханян, Т.М. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Т.М. Агаханян, Е.Р. Аствацатурьян, П.К. Скоробогатов. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
2. Пашковский, М.Е. Модель оценки стойкости полупроводниковых изделий к воздействию тяжёлых заряженных частиц космического пространства / М.Е. Пашковский, И.Е. Пашковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 58–60.
3. Лобанов, О.В. Перемежающиеся отказы, вызванные ядерными реакциями в устройствах электронной техники при облучении первичными ускоренными частицами / О.В. Лобанов, М.В. Мирошкин, М.В. Стабников // Средства радиоэлектроники. – 1988. – Вып. 2. – 32 с.
4. Пашковский, М.Е. Модель энергосвечения от высокоэнергетичных протонов космического пространства / М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 9. – С. 45–48.
5. Методические указания по оценке и обеспечению сбоеустойчивости и отказоустойчивости бортовой аппаратуры. Ч. 2. / Е.В. Горчаков, В.В. Герасимов, А.В. Чумаков, В.В. Ужегов. – 2009. – 74 с.
6. Барабанов, В.Ф. Интерактивные средства моделирования сложных технологических процессов / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. – 124 с.
7. Моделирование и симуляция сечения сбоев, индуцированных протонами и нейтронами: унифицированный аналитический подход / Г.И. Зебрев, Н.Н. Самотаев, Р.Г. Усейнов [и др.] // Radiation. – 2024. – Т. 4, № 1. – Статья 4. – DOI: 10.3390/radiation4010004.
8. Прямая ионизация протонами в субмикронных технологиях: методики испытаний и моделирование / S. Lüdeke, G.D. Cardenás, W. Hajdas [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2023. – Т. 70, № 3. – С. 667–677. – DOI: 10.1109/TNS.2023.3241937.
9. Новая модель предсказания сечений SEE от протонов на основе данных по тяжёлым ионам / J. Han, G. Guo, J. Liu [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2022. – Т. 526. – С. 62–67. – DOI: 10.1016/j.nimb.2022.02.009.

10. CREME96: обновлённая версия кода оценки воздействия космических лучей на микроэлектронику / A.J. Tylka, J.H. Jr. Adams, P.R. Boberg [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – Т. 44, № 6. – С. 2150–2160. – DOI: 10.1109/23.659030.

11. Котляров, В.В. Методы защиты цифровых устройств на базе ПЛИС от ионизирующего излучения в условиях космического пространства / В.В. Котляров, А.В. Шевченко, В.И. Анциферова // Моделирование систем и процессов. – 2024. – №. 4. – С. 59-67. – DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2024-17-4-59-67>.

REFERENCES

1. Agakhanyan, T.M. Radiation effects in integrated circuits / T.M. Agakhanyan, E.R. Astvatsaturyan, P.K. Skorobogatov. – Moscow: Energoatomizdat, 1989. – 256 p.

2. Pashkovsky, M.E. Model for assessing the resistance of semiconductor products to the effects of heavy charged particles of outer space / M.E. Pashkovsky, I.E. Pashkovsky // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2012. – Vol. 8, No. 1. – P. 58-60.

3. Lobanov, O.V. Intermittent failures caused by nuclear reactions in electronic devices under irradiation with primary accelerated particles / O.V. Lobanov, M.V. Miroshkin, M.V. Stabnikov // Means of radio electronics. – 1988. – Issue 2. – 32 p.

4. Pashkovsky, M.E. Model of energy release from high-energy protons of outer space / M.E. Pashkovsky, V.F. Barabanov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2010. – Vol. 6, No. 9. – P. 45–48.

5. Guidelines for assessing and ensuring failure tolerance and fault tolerance of onboard equipment. Part 2. / E.V. Gorchakov, V.V. Gerasimov, A.V. Chumakov, V.V. Uzhegov. – 2009. – 74 p.

6. Barabanov, V.F. Interactive tools for modeling complex technological processes / V.F. Barabanov, S.L. Podvalny. – Voronezh: VSTU Publishing House, 2000. – 124 p.

7. Modeling and Simulation of Proton- and Neutron-Induced Slip Cross Sections: A Unified Analytical Approach / G. I. Zebrev, N. N. Samotaev, R. G. Useynov [et al.] // Radiation. – 2024. – Vol. 4, No. 1. – Article 4. – DOI: 10.3390/radiation4010004.

8. Direct Ionization by Protons in Submicron Technologies: Testing Methodologies and Modeling / S. Lüdeke, G. D. Cardenás, W. Hajdas [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2023. – Vol. 70, No. 3. – P. 667–677. – DOI: 10.1109/TNS.2023.3241937.

9. A New Model for Predicting Proton SEE Cross Sections Based on Heavy Ion Data / J. Han, G. Guo, J. Liu [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2022. – Vol. 526. – Pp. 62–67. – DOI: 10.1016/j.nimb.2022.02.009.

10. CREME96: An Updated Version of the Code for Assessing the Impact of Cosmic Rays on Microelectronics / A.J. Tylka, J.H. Jr. Adams, P.R. Boberg [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – Vol. 44, No. 6. – Pp. 2150–2160. – DOI: 10.1109/23.659030.

11. Kotlyarov, V.V. Methods of protecting digital devices based on FPGA from ionizing radiation in outer space / V.V. Kotlyarov, A.V. Shevchenko, V.I. Antsiferova // Modeling of systems and processes. – 2024. – No. 4. – P. 59-67. – DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2024-17-4-59-67>.

**ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ**
CAPABILITIES OF THE INTERNAL FRICTION METHOD FOR DETECTING
INTERNAL STRESSES IN WOOD

Руссу А.В., кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж

Russu A.V., PhD in Technical Sciences, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Хворых А.М., аспирант, преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Khvorykh A.M., Postgraduate student, College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Шамаев В.А., доктор технических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж

Shamaev V.A., DrSc in Technical Sciences, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе исследованы возможности метода внутреннего трения для обнаружения и определения внутренних напряжений в древесине на основе анализа логарифмического декремента затухания δ изгибных колебаний. Эксперимент проведен на испытательной установке свободных изгибных колебаний с использованием образцов натурального и мореного дуба в радиальном и тангенциальном направлениях. Установлено, что увеличение внутренних напряжений приводит к соответствующему увеличению δ на 6–9%, причем наибольшие значения выявлены для тангенциального направления мореного дуба. Результаты подтверждают чувствительность метода внутреннего трения к микродефектам и анизотропии древесины, что согласуется с механизмами диссипации внутренней энергии на уровне древесных волокон. Данный метод может быть перспективен для неразрушающего контроля напряжений в строительных и нагруженных деревянных конструкциях.

Ключевые слова: внутренние напряжения, древесина, усушка, анизотропия, механические свойства, влажность, температурные градиенты, сушка древесины, деформации.

Abstract. The paper investigates the capabilities of the internal friction method for detecting and determining internal stresses in wood based on the analysis of the logarithmic damping decrement δ of bending vibrations. The experiment was conducted on a free bending vibration test setup using samples of natural and bog oak in the radial and tangential directions. It was found that an increase in internal stresses leads to a corresponding increase in δ by 6–9%, with the highest values found for the tangential direction of bog oak. The results confirm the sensitivity of the internal friction method

to microdefects and anisotropy of wood, which is consistent with the mechanisms of internal energy dissipation at the level of wood fibers. This method may be promising for non-destructive testing of stresses in building and loaded wooden structures.

Keywords: internal stresses, wood, shrinkage, anisotropy, mechanical properties, moisture, temperature gradients, wood drying, deformations.

Древесина – это ценный материал и возобновляемый природный ресурс. Для повышения эффективного и рационального ее использования в процессе обработки необходимо учитывать теоретические и прикладные аспекты древесиноведческой науки.

Внутренние напряжения являются причиной деформаций, растрескиваний, а также других дефектов, которые снижают качество материала и сокращают долговечность изделий из него. По этой причине особой ценностью обладают практические выводы теории, руководствуясь которыми можно улучшать качество изделий из древесины и композитов на ее основе, повышать безопасность конструкций и оптимизировать технологические процессы.

Внутренние напряжения в древесине часто возникают из-за нелинейных процессов, таких как усушка, набухание, релаксация напряжений и взаимодействие с внешними нагрузками. Что-то уже сделано для теоретического описания этих процессов, но теория внутренних напряжений в древесине развивается и окончательно еще не оформлена. На данный момент в этом направлении проделана большая работа, судя по тому значительному количеству публикаций, которые описывают внутренние напряжения в древесине, исходя из различных аспектов. Из отечественных авторов в первую очередь заслуживает внимание работа Уголева Б.Н. [1]. В ней приводятся данные по теоретическому исследованию напряжений в древесине, обобщению методов определения напряжений, разработкам новых методов производственного контроля напряжений в материале. Из зарубежных стоит указать на работу [2], в которой исследуются режимы сушки с применением анализа процессов на нейронных сетях для выявления оптимальных режимов работы, оценки внутренних напряжений и возможных дефектов, а также на работу [3], в которой предложена усовершенствованная модель оценки внутренних напряжений. Тем не менее, в экспериментальной части, учитывая повышенный запрос на различные прикладные задачи, в том числе с целью совершенствования технологий обработки древесины и создания материалов с улучшенными свойствами, ведутся интенсивные исследования.

Целью данной работы являлось исследование возможностей использования метода и установки для измерения внутреннего трения для выявления внутренних напряжений в древесине путем анализа логарифмического декремента затухания изгибных колебаний. Гипотеза исследования – величина логарифмического декремента затухания δ чувствительна к изменениям внутренних напряжений в древесине. Логарифмический декремент затухания δ находится по формуле

$$\delta = \log \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right), \quad (1)$$

где A_n и A_{n+1} – амплитуды соседних периодов колебаний.

Величина внутреннего трения Q^{-1} связана с логарифмическим декрементом затухания δ следующим соотношением [4]:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi}. \quad (2)$$

Для эксперимента были использованы образцы дуба черешчатого (*Quercus robur*) и мореного дуба. Заготовки дуба мореного получены из древесины, заготовленной в реке Медведица (приток реки Ока) в Тверской области (40 км от Твери). Возраст дуба мореного 2500-3000 лет [5]. Образцы готовились в радиальном и тангенциальном направлении, размеры 500x45x2,5 мм с контролируемыми уровнями внутренних напряжений, созданными путем термомеханического нагружения. Для реализации метода свободных изгибных колебаний с консольным закреплением образца была собрана экспериментальная установка (Рис 1.).

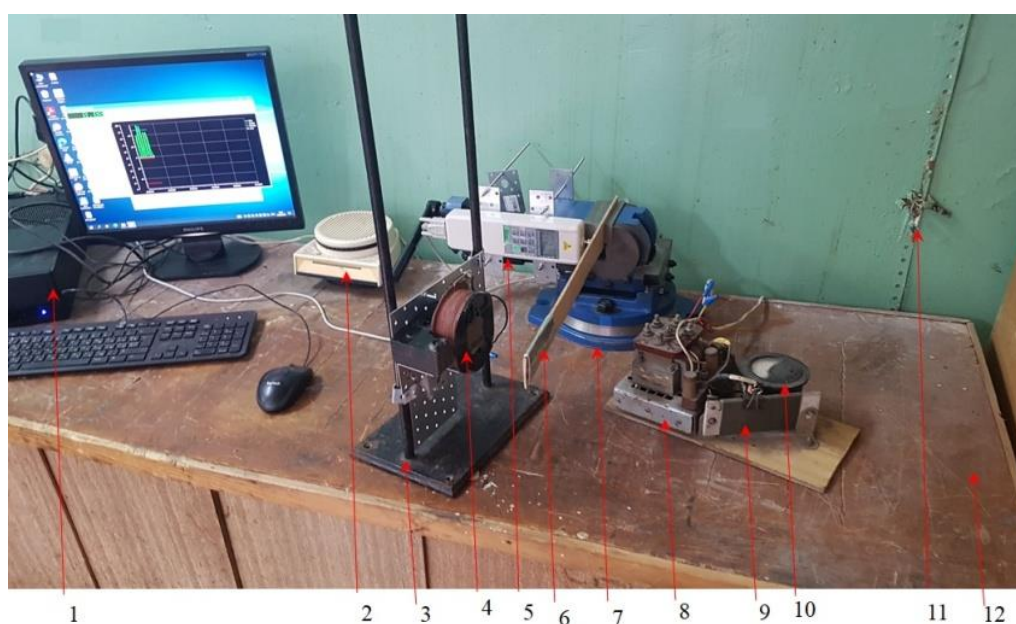


Рисунок 1 – Экспериментальная установка: 1 – персональный компьютер; 2 – стабилизатор напряжения; 3 – штатив; 4 – электромагнит; 5 – цифровой динамометр; 6 – образец древесины; 7 – трехпозиционная оснастка; 8 – трансформатор; 9 – реостат; 10 – амперметр; 11 – защитное заземление; 12 – рабочий стол

Возбуждение колебаний осуществлялось за счет механического импульса, а их регистрация – цифровым динамометром. Исследуемый параметр – логарифмический декремент затухания δ вычисляли по амплитудам последовательных колебаний согласно уравнению (1), которые измерялись при помощи цифрового динамометра Мегеон (Китай).

Эксперименты показали, что для натуральной древесины дуба и дуба мореного изменение δ почти пропорционально для радиального и тангенциального направлений. Для натуральной древесины дуба в радиальном и тангенциальном направлении рост величины δ составил ~ 6-7%. Для образца дуба мореного радиального направления также наблюдался рост величины ~ 6%, а для тангенциального направления – ~ 9 % (Рис. 2). Причем тангенциальное направление дуба мореного дает наибольшую величину δ в сравнении с другими образцами.

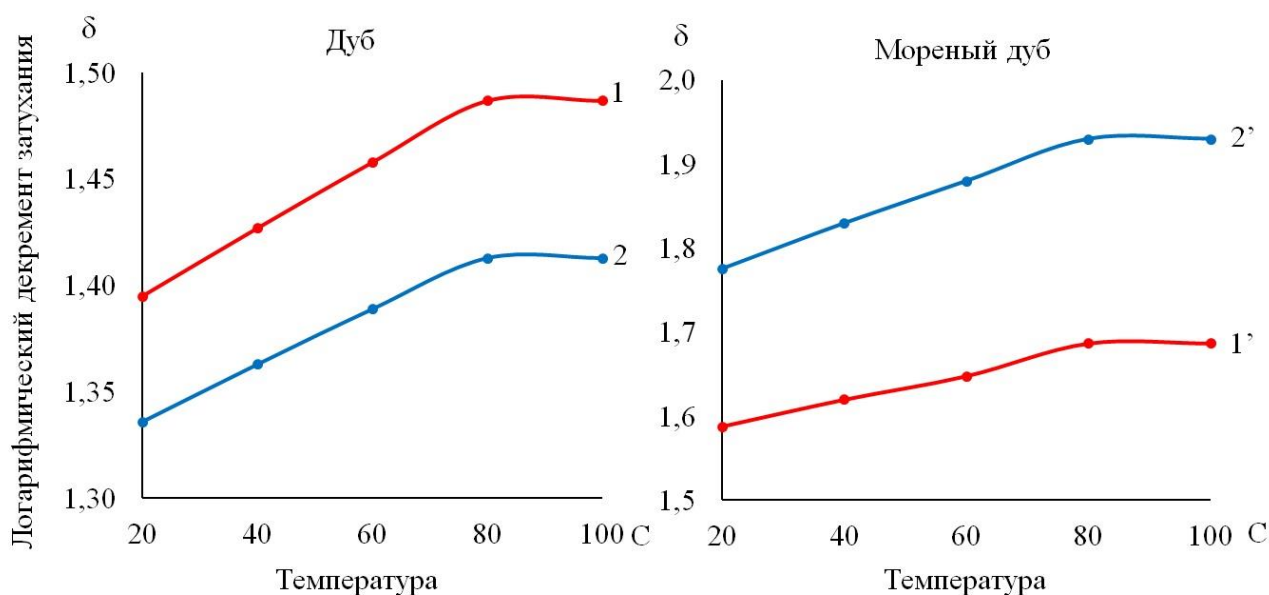


Рисунок 2 – Влияние температуры на величину δ натурального дуба и мореного дуба (1, 1' – радиальное направление; 2, 2' – тангенциальное направление)

Увеличение внутренних напряжений вызывает рост δ на 7-8% для термомеханически напряженных образцов. Эффект морения дуба значительно влияет на механические свойства древесины в тангенциальном направлении, чем в радиальном, то есть возрастает фактор влияния анизотропии древесины. Причем контрольные образцы демонстрируют стабильно низкие значения δ .

Причины роста δ с увеличением напряжений могут быть объяснены диссипацией внутренней энергии за счет микродефектов и перераспределения внутренних напряжений.

Эти результаты отчасти согласуются с известными данными о влиянии дефектов на внутреннее трение в полимерах и композитах. Но в отличие, например, от металлов в древесине доминируют механизмы внутреннего трения на уровне волокон, а не дислокаций.

Таким образом, метод внутреннего трения на основе изгибных колебаний может быть эффективен для обнаружения внутренних напряжений в древесине, а логарифмический декремент затухания является чувствительным параметром, позволяющим оценить уровень напряжений без разрушения образца. Перспективы данного исследования связаны с формированием научно-технической базы для разработки и конструирования портативных приборов оценивания внутренних напряжений в строительных конструкциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уголев, Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. – Москва: Лесная промышленность, 1980. – 205 с.
2. Yin, Q. Drying Stress and Strain of Wood: A Review / Q. Yin, H.-H. Liu // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – P. 5023. – doi: <https://doi.org/10.3390/app11115023>.

3. Evaluation of the drying stress in industrial kiln-dried boards using a force-based technique / S. Leelatanon, S. Jantawee, S. Vannarat, N. Matan // *BioResources*. – 2019. – Vol. 14, No. 2. – P. 4403-4412. – doi: 10.15376/biores.14.2.4403-4412/

4. Постников, В.С. Внутреннее трение в металлах / В.С. Постников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1974. – 351 с.

5. Эффективная микроволновая сушка дуба / А.В. Руссу, В.А. Шамаев, И.Н. Медведев, Н.А. Трубников. – Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 256-268.

REFERENCES

1. Ugolev, B.N. Stress control during wood drying / B.N. Ugolev, Yu.G. Lapshin, E.V. Krotov. – Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1980. – 205 p.

2. Yin, Q. Drying Stress and Strain of Wood: A Review / Q. Yin, H-H. Liu // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – P. 5023. – doi: <https://doi.org/10.3390/app11115023>.

3. Evaluation of the drying stress in industrial kiln-dried boards using a force-based technique / S. Leelatanon, S. Jantawee, S. Vannarat, N. Matan // *BioResources*. – 2019. – Vol. 14, No. 2. – P. 4403-4412. – doi: 10.15376/biores.14.2.4403-4412/

4. Postnikov, V.S. Internal friction in metals / V.S. Postnikov. – 2nd ed., revised. and add. – Moscow: Metallurgy, 1974. – 351 p.

5. Efficient microwave drying of oak / A.V. Russu, V.A. Shamaev, I.N. Medvedev, N.A. Trubnikov. – Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. – P. 256-268.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОЛИКОВОГО ТРАНСПОРТЕРА ДЛЯ СПУСКА ПЛОСКИХ СПЛОТОЧНЫХ ЕДИНИЦ В ВОДОЕМ JUSTIFICATION OF ROLLER CONVEYOR PARAMETERS FOR LAUNCHING FLAT COHESIVE UNITS INTO A BODY OF WATER

Васильев В.В., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

Vasiliev V.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

Афоничев Д.Н., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Воронеж, Россия

Afonichev D.N., DrSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Electrical Engineering and Automation Department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

Аннотация. Представлены аналитические зависимости для обоснования параметров роликового транспортера, предназначенного для спуска плоских сплоточных единиц в водоем энергосберегающим способом, а именно длины, рабочей и эксплуатационной ширины, шага ролика (вращающейся единицы), диаметра ролика, диаметра оси ролика, угла наклона транспортера относительно горизонта. Приведенные аналитические зависимости учитывают параметры плоских сплоточных единиц.

Ключевые слова: плоская сплоточная единица, спуск в водоем, роликовый транспортер, ролик, длина, ширина, шаг ролика, диаметр ролика, угол наклона транспортера.

Abstract. Analytical dependences are presented to substantiate the parameters of a roller conveyor designed to lower flat cohesive units into a reservoir in an energy-saving manner, namely, length, working and operational width, roller pitch (rotating unit), roller diameter, roller axis diameter, conveyor tilt angle relative to the horizon. The above analytical dependences take into account the parameters of flat cohesive units.

Keywords: flat cohesive unit, descent into a reservoir, roller conveyor, roller, length, width, roller pitch, roller diameter, conveyor angle.

Спуск усовершенствованных плоских сплоточных единиц [1-3] в водоем является частью производственного процесса сплава круглых лесоматериалов по водным путям. Необходимость данного процесса, возникает на береговых складах [4, 5], когда изготовленные плоские сплоточные единицы спускаются в водоем для дальнейшей транспортировки самосплавом, в кошеле или в составе навигационного плота. При этом в практических условиях спуск плоских сплоточных единиц в водоем может осуществляться с помощью грузовой платформы [6] или подъемно-транспортного агрегата [7], но наиболее целесообразно

применять энергосберегающий способ спуска плоских сплоточных единиц в водоем [8], который основывается на использовании роликового транспортера.

Анализ известных роликовых транспортеров [9-12], используемых в лесном комплексе, позволил предложить роликовый транспортер [13], отличительной особенностью которого является то, что по бокам цилиндрических рифленых роликов установлены вращающиеся относительно осей конические гладкие ролики с углом наклона образующей $\alpha > \arctg \mu$, где μ – коэффициент трения скольжения материала транспортируемого предмета о материал конического гладкого ролика.

Для реализации спуска плоских сплоточных единиц в водоем требуется обоснование габаритных размеров транспортера, которые зависят от многих факторов, но основополагающими факторами являются вид плоской сплоточной единицы и ее габаритные размеры. Дальнейшее обоснование параметров роликового транспортера выполним для трех усовершенствованных плоских сплоточных единиц [1-3].

Основные параметры роликового транспортера, проектируемого для спуска плоских сплоточных единиц в водоем: длина, ширина, шаг ролика (вращающейся единицы), диаметр ролика, диаметр оси ролика, угол наклона транспортера относительно горизонта.

Длина роликового транспортера зависит от протяженности спуска плоских сплоточных единиц в водоем, угла наклона транспортера относительно зеркала водного объекта и максимальной осадки плоских сплоточных единиц, подлежащих спуску. В данном случае протяженностью спуска плоских сплоточных единиц в водоем является расстояние от места установки сплоточных единиц на транспортер до зеркала водного объекта. Длина роликового транспортера L_{PT} , предназначенного для спуска плоских сплоточных единиц в водоем, рассчитывается по формуле:

$$L_{PT} = l_{BCPT} + l_{PCPT}, \quad (1)$$

где l_{BCPT} – длина береговой секции роликового транспортера, м; l_{PCPT} – длина русловой секции роликового транспортера, м.

Длина береговой секции роликового транспортера l_{BCPT} равна протяженности спуска плоских сплоточных единиц в водоем и зависит от способа установки сплоточных единиц на транспортер, параметров транспортных средств, доставляющих сплоточные единицы, угла наклона транспортера. Длина русловой секции роликового транспортера рассчитывается по формуле:

$$l_{PCPT} = \sqrt{(T_{\max ПСЕ})^2 + \left(\frac{T_{\max ПСЕ}}{i_{PT}} \right)^2} + l_{ЗPT}; \quad i_{PT} = \tg \alpha_{PT}, \quad (2)$$

где $T_{\max ПСЕ}$ – максимальная первоначальная осадка плоских сплоточных единиц, м; i_{PT} – уклон роликового транспортера; $l_{ЗPT}$ – запас длины роликового транспортера, м; α_{PT} – угол наклона роликового транспортера относительно горизонта, град.

Запас длины роликового транспортера необходим для плавного перехода плоской сплоточной единицы из состояния движения по роликовому транспортеру в плавучее состояние, и исключения ее опрокидывания, а также минимизации ударов рядов круглых лесоматериалов или нижних поперечных прокладок о роликовый транспортер при переходе

плоской сплottedной единицы в плавучее состояние. Указанный запас равен сумме расчетного расстояния между осями роликов (вращающихся единиц) и половины диаметра конического гладкого ролика. Это обеспечивается установкой дополнительных цилиндрического рифленого ролика и конических гладких роликов в конце погруженной в воду станины, которые будут располагаться на глубине большей $T_{\max ПСЕ}$.

Рабочая ширина роликового транспортера B_{PPT} – расстояние между крайними торцами конических гладких роликов, то есть рабочая ширина роликового транспортера включает в себя длину цилиндрического рифленого ролика и конических гладких роликов

$$B_{PPT} = l_{ЦРР} + 2l_{КГЛ} = K_{ЗРТ} L_{\max ПСЕ} + 2l_{КГЛ}, \quad (3)$$

где $l_{ЦРР}$ – длина цилиндрического рифленого ролика, м; $l_{КГЛ}$ – длина конического гладкого ролика, м; $K_{ЗРТ}$ – коэффициент, характеризующий отношение ширины конвейера к ширине груза на прямолинейном участке трассы, 1,1...1,2 [9]; $L_{\max ПСЕ}$ – наибольшая длина плоских сплottedных единиц, м.

Равенство (3) справедливо для расчета рабочей ширины роликового транспортера при спуске плоской сплottedной единицы [3]. В том случае, когда планируется спуск плоских сплottedных единиц [1, 2] то рабочая ширина роликового транспортера составит

$$B_{PPT} = l_{ЦРР} + 2l_{КГЛ} = K_{ЗРТ} B_{\max ПСЕ} + 2l_{КГЛ}, \quad (4)$$

где $B_{\max ПСЕ}$ – максимальная ширина плоской сплottedной единицы, м.

В равенствах (3) и (4) показатель $K_{ЗРТ}$ принимается равным 1,1, так как согласно рекомендациям, приведенным в [9], при транспортировке грузов с большими габаритами и массой, коэффициент $K_{ЗРТ}$ следует назначать минимальным.

Эксплуатационная ширина роликового транспортера $B_{ЭРТ}$ – расстояние между внешними сторонами станины

$$B_{ЭРТ} = B_{PPT} + 2b_{СРТ} + 2l_{РРС}, \quad (5)$$

где $b_{СРТ}$ – ширина станины роликового транспортера, м; $l_{РРС}$ – расстояние между гладким роликом и станией, м.

В практических условиях при спуске усовершенствованных плоских сплottedных единиц в водоем по роликовому транспортеру необходимо, чтобы нижние опорные ряды лесоматериалов располагались продольно.

Шаг роликов (вращающихся единиц) транспортера – это расстояние между центрами соседних осей. Так как на одной оси установлен цилиндрический рифленый ролик и два конических гладких ролика, то ось, рифленый ролик и два конических гладких ролика в совокупности являются одной вращающейся единицей. Расчет шага вращающихся единиц транспортера необходим для исключения переворачивания плоских сплottedных единиц.

При движении плоской сплottedной единицы по роликовому транспортеру ее устойчивость опрокидыванию определяется шагом вращающихся единиц, причем на величину шага вращающихся единиц влияют параметры плоской сплottedной единицы, ее масса и движущая сила [9].

Для обоснования допустимой величины шага вращающихся единиц обуславливаемся, что плоская сплottedная единица с определенными габаритными размерами $B_{ПСЕ}$ (ширина),

$L_{ПСЕ}$ (длина), $H_{ПСЕ}$ (высота) движется по наклонному роликовому транспортеру с углом наклона относительно горизонта α_{PT} (уклоном $i_{PT} = tg\alpha_{PT}$). Так как при изготовлении каждой плоской сплочной единицы преследуется цель формирования ее в виде прямоугольного параллелепипеда с равномерным распределением массы по длине, то принимаем плоскую сплочную единицу за прямоугольный параллелепипед, а центр тяжести сплочной единицы будет располагаться в центре тяжести параллелепипеда. Из-за наклонности роликового транспортера на плоскую сплочную единицу будет действовать движущая сила $F_{ДПСЕ}$, которая направлена параллельно продольной оси транспортера.

При движении плоской сплочной единицы по роликовому транспортеру, она опирается на два цилиндрических рифленых ролика вращающихся единиц в точках A и B (см. Рис. 1), от роликов на сплочную единицу действуют нормальные реакции P_A и P_B , а уравнения равновесия плоской сплочной единицы имеют вид

$$\begin{aligned} P_A + P_B - G_{ПСЕ} \cos \alpha_{PT} &= 0; \\ P_A t_{BE} - (x + t_{BE} - 0,5L_{ПСЕ}) G_{ПСЕ} \cos \alpha_{PT} - 0,5H_{ПСЕ} G_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT} &= 0; \\ (0,5L_{ПСЕ} - x) G_{ПСЕ} \cos \alpha_{PT} - 0,5H_{ПСЕ} G_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT} - P_B t_{BE} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $G_{ПСЕ}$ – сила тяжести, действующая на плоскую сплочную единицу, Н; x – расстояние по нормали от переднего торца плоской сплочной единицы до вектора P_A , или свес сплочной единицы за ролик A , м; t_{BE} – шаг вращающихся единиц, м.

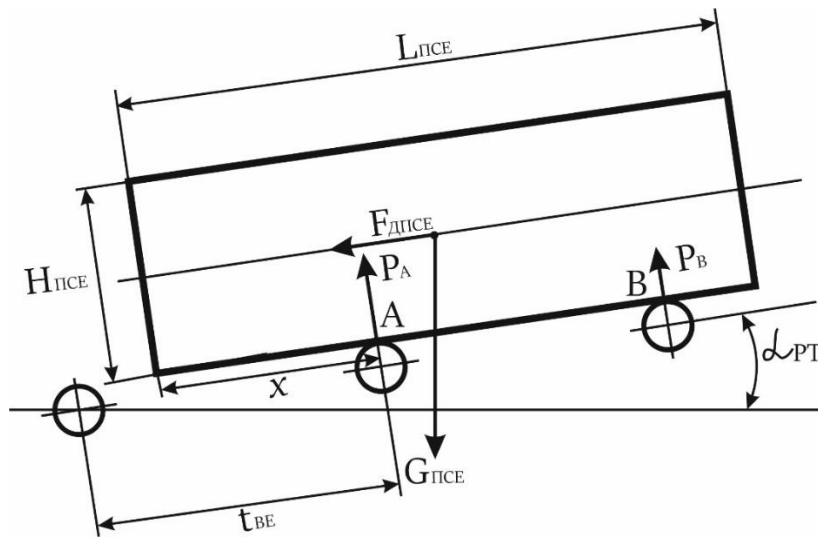


Рисунок 1 – Схема для оценки устойчивости плоской сплочной единицы опрокидыванию при движении по наклонному роликовому транспортеру

Плоская сплочная единица будет находиться в состоянии равновесия при условии, что реакция ролика B будет больше нуля, то есть $P_B > 0$, тогда из третьего уравнения системы (6):

$$\begin{aligned} P_B t_{BE} &= (0,5L_{ПСЕ} - x) G_{ПСЕ} \cos \alpha_{PT} - 0,5H_{ПСЕ} G_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT} > 0; \\ 0,5L_{ПСЕ} - x &> 0,5H_{ПСЕ} i_{PT}; \\ x &< 0,5(L_{ПСЕ} - H_{ПСЕ} i_{PT}). \end{aligned}$$

Так как максимальный свес может составлять не более t_{BE} , то

$$t_{BE} < 0,5(L_{ПСЕ} - H_{ПСЕ}i_{PT}). \quad (7)$$

Если транспортер горизонтальный ($i_{PT} = 0$), то $t_{BE} < 0,5L_{ПСЕ}$, а значит на наклонном транспортере вращающиеся единицы должны располагаться ближе друг к другу на величину $H_{ПСЕ}i_{PT}$, причем, чем больше уклон транспортера i_{PT} , тем ближе должны находиться вращающиеся единицы.

Условие устойчивости плоской сплottedной единицы опрокидыванию при ее движении по наклонному транспортеру будет обеспечено если удерживающий момент $M_{УПСЕ}$ будет больше опрокидывающего момента $M_{ОПСЕ}$ [9, 14], то есть $M_{УПСЕ} > M_{ОПСЕ}$.

Свес x создает опрокидывающий момент относительно ролика А

$$M_{ОПСЕ} = 0,5G_{ПСЕ} \left(\frac{x^2}{L_{ПСЕ}} \cos \alpha_{PT} + H_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT} \right). \quad (8)$$

Удерживающий момент создает часть сплottedной единицы, расположенная до ролика А и опирающаяся на ролик В, имеющая длину $L_{ПСЕ} - x$

$$M_{УПСЕ} = 0,5 \frac{G_{ПСЕ}(L_{ПСЕ} - x)^2}{L_{ПСЕ}} \cos \alpha_{PT}. \quad (9)$$

Максимально возможный свес x за ролик А равен шагу вращающихся единиц, то есть $x = t_{BE}$. С учетом этого зависимости (8) и (9) примут вид

$$M_{ОПСЕ} = 0,5G_{ПСЕ} \left(\frac{t_{BE}^2}{L_{ПСЕ}} \cos \alpha_{PT} + H_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT} \right); \quad (10)$$

$$M_{УПСЕ} = 0,5 \frac{G_{ПСЕ}(L_{ПСЕ} - t_{BE})^2}{L_{ПСЕ}} \cos \alpha_{PT}. \quad (11)$$

Условие устойчивости опрокидыванию $M_{УПСЕ} > M_{ОПСЕ}$, тогда согласно зависимостям (10) и (11):

$$\frac{(L_{ПСЕ} - t_{BE})^2}{L_{ПСЕ}} > \frac{t_{BE}^2}{L_{ПСЕ}} + H_{ПСЕ}i_{PT}; \quad 2L_{ПСЕ}t_{BE} < L_{ПСЕ}^2 - L_{ПСЕ}H_{ПСЕ}i_{PT}; \quad t_{BE} < 0,5(L_{ПСЕ} - H_{ПСЕ}i_{PT}).$$

Отношение удерживающего момента $M_{УПСЕ}$ к опрокидывающему моменту $M_{ОПСЕ}$ называется коэффициентом устойчивости груза [9]:

$$K_y = \frac{M_{УПСЕ}}{M_{ОПСЕ}}; \quad M_{УПСЕ} = K_y M_{ОПСЕ}. \quad (12)$$

Подставим выражения (10) и (11) в формулу (12) и, выполнив преобразования, получим квадратное уравнение:

$$t_{BE}^2(1 - K_y) - 2L_{ПСЕ}t_{BE} + L_{ПСЕ}^2 - K_y L_{ПСЕ}H_{ПСЕ}i_{PT} = 0. \quad (13)$$

Решение этого уравнения следующее

$$t_{BE} = \frac{L_{ПСЕ} \pm \sqrt{K_y [L_{ПСЕ}^2 + (1 - K_y)L_{ПСЕ}H_{ПСЕ}i_{PT}]}}{1 - K_y}. \quad (14)$$

Рекомендуется $K_v = 1,5$ [9], с учетом этого и зависимости (14) можно записать

$$t_{BE} = \frac{L_{ПСЕ} \pm \sqrt{1,5[L_{ПСЕ}^2 - 0,5L_{ПСЕ}H_{ПСЕ}i_{PT}]}}{1-1,5} = -2L_{ПСЕ} \pm 2\sqrt{1,5[L_{ПСЕ}^2 - 0,5L_{ПСЕ}H_{ПСЕ}i_{PT}]}. \quad (15)$$

Так как $t_{BE} > 0$, то

$$t_{BE} = -2L_{ПСЕ} + 2\sqrt{1,5[L_{ПСЕ}^2 - 0,5L_{ПСЕ}H_{ПСЕ}i_{PT}]}. \quad (16)$$

Из формул (14), (15) и (16) видно, что шаг вращающихся единиц t_{BE} зависит от длины $L_{ПСЕ}$ и высоты $H_{ПСЕ}$ плоских сплоточных единиц, а также от уклона i_{PT} роликового транспортера. Зависимости (14), (15) и (16), а также неравенство (7) позволяют установить шаг вращающихся единиц t_{BE} , обеспечивающий устойчивость плоских сплоточных единиц опрокидыванию на наклонном роликовом транспортере.

Диаметр роликов (цилиндрических рифленых роликов и конических гладких роликов) вращающихся единиц транспортера является показателем, который обеспечивает целостность и надежность работы всей конструкции роликового транспортера. При этом диаметр рифленых роликов в большей степени зависит от шага вращающихся единиц транспортера, габаритов плоских сплоточных единиц и породы сплавляемой древесины. В свою очередь диаметр конических гладких роликов зависит от диаметров круглых лесоматериалов, укладываемых в нижнем ряду или диаметра нижних прокладок сплоточных единиц.

Параметры цилиндрических рифленых роликов устанавливаются в зависимости от максимальной нагрузки, которую они будут воспринимать при движении плоских сплоточных единиц по роликовому транспортеру. Обоснование диаметра цилиндрических рифленых роликов основывается на следующих условиях. Транспортируемая плоская сплоточная единица с габаритными размерами $B_{ПСЕ}$, $L_{ПСЕ}$, $H_{ПСЕ}$ движется по наклонному роликовому транспортеру с углом наклона относительно горизонта α_{PT} , причем $L_{ПСЕ}$ равна минимально возможной длине плоской сплоточной единицы $L_{\min ПСЕ}$, а $H_{ПСЕ}$ равна максимально возможной высоте плоской сплоточной единицы $H_{\max ПСЕ}$. Плоская сплоточная единица обладает высокой прочностью и жесткостью, с отсутствием перемещения в ней круглых лесоматериалов относительно друг друга. При этом плоская сплоточная единица имеет форму прямоугольного параллелепипеда с равномерным распределением массы по объему. Все остальные факторы, влияющие на увеличение нагрузки на цилиндрические рифленые ролики, выразим через коэффициент K_{HPP} , учитывающий влияние дополнительных нагрузок на цилиндрический рифленый ролик роликового транспортера. Таким образом, нагрузка на каждый цилиндрический рифленый ролик зависит от доли веса плоской сплоточной единицы, приходящийся на ролик, угла наклона роликового транспортера относительно горизонта α_{PT} и коэффициента K_{HPP} .

Выразим максимально возможную нагрузку P_{HPP} , которая действует на цилиндрический рифленый ролик при движении плоской сплоточной единицы по роликовому транспортеру

$$P_{HPP} = \frac{1,5t_{PT}K_{HPP}G_{ПСЕ} \cos \alpha_{PT}}{L_{\min ПСЕ}}. \quad (17)$$

В формуле (17) показатель K_{HPP} изменяется от 1,1 до 1,3. Нижний порог принимается в случае, если роликовый транспортер имеет высокую точность изготовления при соблюдении правильности его монтажа, а круглые лесоматериалы, взаимодействующие с цилиндрическими рифлеными роликами, имеют минимальный процентный показатель кривизны с условием удаления всех сучков заподлицо. Верхний порог – при условии неточного изготовления и монтажа роликового транспортера, а также, если круглые лесоматериалы, взаимодействующие с цилиндрическими рифлеными роликами, характеризуются большой кривизной и неудовлетворительной очисткой от сучьев.

На основании полученного значения P_{HPP} подбирается цилиндрический рифленый ролик с диаметром d_{PPT} и диаметром оси d_{OPPT} при соблюдении следующего условия:

$$P_{ДНPP} \geq P_{HPP}, \quad (18)$$

где $P_{ДНPP}$ – допустимая нагрузка на цилиндрический рифленый ролик, установленная производителем, Н.

Каждый конический гладкий ролик вращающейся единицы представляет собой усеченный конус, где диаметр верхнего основания $d_{ВГРТ}$ усеченного конуса равен диаметру цилиндрического рифленого ролика d_{PPT} . Диаметр нижнего основания $d_{НГРТ}$ усеченного конуса зависит от диаметров круглых лесоматериалов, укладываемых в нижнем ряду или диаметра нижних прокладок сплоточных единиц. Для обеспечения безопасной и надежной транспортировки плоских сплоточных единиц по роликовому транспортеру необходимо, чтобы при взаимодействии плоской сплоточной единицы с коническими гладкими роликами, их диаметр не позволял плоской сплоточной единице выкатываться за пределы роликового транспортера. Таким образом, диаметр нижнего основания $d_{НГРТ}$ усеченного конуса каждого конического гладкого ролика вращающейся единицы составит

$$d_{НГРТ} = d_{PPT} + 2d_{КЛГР}, \quad (19)$$

где $d_{КЛГР}$ – диаметр круглого лесоматериала, взаимодействующего с рифлеными и гладкими роликами, м.

При обосновании параметров роликового транспортера показатель $d_{КЛГР}$ принимается равным, для плоской сплоточной единицы [3], максимальному расчетному диаметру нижней прокладки в верхнем отрезе, который зависит от габаритов сплоточной единицы. Для плоских сплоточных единиц [1, 2] $d_{КЛГР}$ принимается равным максимальному диаметру круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, укладываемых в нижнем ряду сплоточных единиц.

Учитывая приведенное обоснование диаметра круглого лесоматериала, взаимодействующего с рифлеными и гладкими роликами, определим длину конического гладкого ролика следующим образом

$$l_{КГЛ} = d_{КЛГР} \operatorname{ctg} \alpha_{КГР}, \quad (20)$$

где $\alpha_{КГР}$ – угол наклона боковой поверхности усеченного конуса относительно горизонта, град.

В процессе движения плоской сплottedной единицы по роликовому транспортеру возникает движущая сила $F_{ДПСЕ}$, определяемая зависимостью (9). Указанная сила $F_{ДПСЕ}$ обеспечивает движение плоской сплottedной единицы по роликовому транспортеру, в случае если она больше сопротивления движению плоской сплottedной единицы $F_{СПСЕ}$, то есть должно выполняться следующее условие:

$$F_{ДПСЕ} > F_{СПСЕ}. \quad (21)$$

Сопротивление движению плоской сплottedной единицы можно определить через коэффициент сопротивления b , то есть $F_{СПСЕ} = G_{ПСЕ}b$. На основании зависимости (9) запишем равенство

$$G_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT} > G_{ПСЕ}b. \quad (22)$$

Из равенства (22) выразим общий вид формулы для расчета требуемого угла наклона роликового транспортера относительно горизонта

$$\sin \alpha_{PT} > b. \quad (23)$$

Угол наклона транспортера также определяется рельефом прибрежной территории, а поэтому в зависимости от крутизны берега следует обосновывать соотношение угла наклона транспортера и коэффициента сопротивления движению сплottedной единицы посредством моделирования процесса спуска сплottedных единиц в водоем [15].

Представленные аналитические зависимости позволяют обосновать параметры роликового транспортера, предназначенного для спуска плоских сплottedных единиц в водоем энергосберегающим способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, В.В. Обоснование геометрических параметров высокоэффективной плоской сплottedной единицы / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев // Resources and Technology. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 1-19. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.6763.
2. Васильев, В.В. Расчет транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплottedной единицы / В.В. Васильев // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 1-22. – DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.
3. Васильев, В.В. Расчет прочности модернизированной плоской сплottedной единицы / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев // Resources and Technology. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 1-25. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623.
4. Митрофанов, А.А. Лесосплав: новые технологии, научное и техническое обеспечение: монография / А.А. Митрофанов ; Федеральное агентство по образованию, Архангельский государственный технический университет. – Архангельск: Издательство АГТУ, 2007. – 491 с.
5. Митрофанов, А.А. Новые технологии водного транспорта леса на смену полевого сплава / А.А. Митрофанов, М.О. Соколов // Вестник МГУЛа – Лесной вестник. – 2000. – № 3. – С. 47-51.
6. Патент № 2812680 С1 Российская Федерация, МПК В60Р 3/41. Грузовая платформа : № 2023121982 : заявл. 23.08.2023 : опубл. 31.01.2024 / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев, А.В. Лощенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I.

7. Патент № 2789562 С1 Российская Федерация, МПК В66С 23/42, В60Р 1/54. Подъемно-транспортный агрегат : № 2022126607 : заявл. 12.10.2022 : опубл. 06.02.2023 / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев, А.В. Лощенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I.

8. Патент № 2803459 С1 Российская Федерация, МПК В65G 69/00. Способ спуска сплоточных единиц в водоем : № 2022133702 : заявл. 21.12.2022 : опубл. 13.09.2023 / В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I.

9. Ивановский, К.Е. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства / К.Е. Ивановский, А.Н. Раковщик, А.Н. Цоглин. – Москва: Машиностроение, 1973. – 216 с.

10. Марон, Ф.Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин / Ф.Л. Марон, А.В. Кузьмин. – Минск: Высшая школа, 1977. – 272 с.

11. Patrick, M. Conveyors application, selection, and integration / M. Patrick, P.E. McGuire. – CRC Press, 2010. – 182 p.

12. Залегаллер, Б.Г. Технология и оборудование лесных складов / Б.Г. Залегаллер, П.В. Ласточкин, С.П. Бойков. – Москва: Лесная промышленность, 1984. – 352 с.

13. Патент на полезную модель № 216888 U1 Российская Федерация, МПК В21В 1/00, В65G 13/00. Роликовый транспортер : № 2023100001 : заявл. 01.01.2023 : опубл. 06.03.2023 / Д.Н. Афоничев, А.Н. Беляев, В.В. Васильев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I.

14. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Часть 1. Статика. Кинематика / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – Москва: Высшая школа, 1966. – 439 с.

15. Васильев, В.В. Математическое моделирование спуска плоских сплоточных единиц в водоем по береговой секции наклонного роликового транспортера / В.В. Васильев // Актуальные проблемы энергетики АПК в современной реальности: материалы международной научно-практической конференции, посвященной основателю факультета энергетики и электрификации Валентину Васильевичу Фокину: Ижевск, 15 мая 2024 г. – Ижевск: ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ, 2024. – С. 81-89.

REFERENCES

1. Vasiliev, V.V. Substantiation of geometric parameters of a highly efficient flat cohesive unit / V.V. Vasiliev, D.N. Afonichev // Resources and Technology. – 2023. – Vol. 20, No. 2. – P. 1-19. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.6763.

2. Vasiliev, V. V. Calculation of transport and operational parameters of an improved flat cohesive unit / V.V. Vasiliev // Resources and Technology. – 2022. – Vol. 19, No. 4. – P. 1-22. – DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.

3. Vasiliev, V.V. Calculation of the strength of a modernized flat split unit / V.V. Vasiliev, D.N. Afonichev // Resources and Technology. – 2023. – Vol. 20, No. 1. – P. 1-25. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623.
4. Mitrofanov, A. A. Wood alloy: new technologies, scientific and technical support: monograph / A.A. Mitrofanov ; Federal Agency for Education, Arkhangelsk State Technical University. – Arkhangelsk: AGTU Publishing House, 2007. – 491 p.
5. Mitrofanov, A.A. New technologies of water transport of forests to replace field rafting / A. A. Mitrofanov, M. O. Sokolov // Bulletin of MGULa – Lesnoy vestnik. – 2000. – No. 3. – P. 47-51.
6. Patent No. 2812680 C1 Russian Federation, IPC B60P 3/41. Cargo platform : No. 2023121982 : declared 08.23.2023 : published 01.31.2024 / V.V. Vasiliev, D.N. Afonichev, A.V. Loshchenko ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great.
7. Patent No. 2789562 C1 Russian Federation, IPC B66C 23/42, B60P 1/54. Lifting and transport unit : No. 2022126607 : declared 12.10.2022 : published 06.02.2023 / V.V. Vasiliev, D.N. Afonichev, A.V. Loshchenko ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great.
8. Patent No. 2803459 C1 Russian Federation, IPC B65G 69/00. The method of launching cohesive units into a reservoir : No. 2022133702 : declared 12.21.2022 : published 09.13.2023 / V.V. Vasiliev, D.N. Afonichev ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great.
9. Ivanovsky, K.E. Roller and disc conveyors and devices / K.E. Ivanovsky, A.N. Rakovshchik, A.N. Tsoglin. – Moscow: Mashinostroenie, 1973. – 216 p.
10. Maron, F.L. Handbook of calculations of lifting and transport machinery / F.L. Maron, A.V. Kuzmin. – Minsk: Higher School, 1977. – 272 p.
11. Patrick, M. Conveyors application, selection, and integration / M. Patrick, P.E. McGuire. – CRC Press, 2010. – 182 p.
12. Zalegaller, B.G. Technology and equipment of timber warehouses / B.G. Zalegaller, P.V. Lastochkin, S.P. Boikov. – Moscow: Forest industry, 1984. – 352 p.
13. Utility Model Patent No. 216888 U1 Russian Federation, IPC B21B 1/00, B65G 13/00. Roller conveyor : No. 2023100001 : declared 01.01.2023 : published 06.03.2023 / D.N. Afonichev, A.N. Belyaev, V.V. Vasiliev ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great.
14. Yablonsky, A.A. Course of theoretical mechanics. Part 1. Static. Kinematics / A.A. Yablonsky, V.M. Nikiforova. – Moscow: Higher School, 1966 – 439 p.
15. Vasiliev, V.V. Mathematical modeling of the descent of flat cohesive units into a reservoir along the coastal section of an inclined roller conveyor / V.V. Vasiliev // Actual problems of agricultural energy in modern reality: materials of the international scientific and practical conference dedicated to the founder of the Faculty of Energy and Electrification Valentin Vasilyevich Fokin: Izhevsk, May 15, 2024. – Izhevsk: Udmurt State Agrarian University, 2024. – P. 81-89.

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕСНЫХ МАШИН ДЛЯ ТРАКТОРНОЙ ТРЕЛЕВКИ

FACTOR ANALYSIS OF FOREST MACHINERY FOR TRACTOR SKIDDING

Четверикова И.В., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Chetverikova I.V., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Зимарин С.В., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Zimarin S.V., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Тракторная трелевка является энергоемкой операцией лесосечных работ, позволяющей освободить площадь под сельскохозяйственные нужды. К трелевочной технике предъявляются определенные требования в зависимости от условий работы, именно поэтому в данной статье выполнен факторный анализ наиболее часто встречающихся машин для трелевки леса, приведены массо-мощностные характеристики с целью выявления основных факторов, влияющих на показатели работы этих машин. Данные исследования существенно повысят производительность малобюджетных предприятий за счет правильно подобранных машин под определенные требования.

Ключевые слова: лесные машины, трелевка, факторный анализ.

Abstract. Tractor skidding is an energy-intensive logging operation that allows you to free up space for agricultural needs. There are certain requirements for skidding equipment depending on the working conditions, which is why this article performs a multidimensional analysis of the most common machines for skidding forests, provides mass and power characteristics in order to identify the main factors affecting the performance of these machines. These studies will significantly increase the productivity of low-budget enterprises due to properly selected machines for certain requirements.

Keywords: forest machines, skidding, factor analysis.

Транспортировка древесины – ключевой этап лесозаготовки, требующий значительных трудовых и энергетических ресурсов [1]. Одним из неотъемлемых пунктов расчистки территории является вывозка древесины или трелевка [2]. Затраты на трелевку составляют примерно 30 % от общих расходов при заготовке древесины. Для перемещения древесины с делянок используются различные методы трелевки: тракторная, канатная и другие, включая воздушную и гравитационную трелевку.

В настоящее время более 90 % всего объема работ по трелевке леса происходит с помощью тракторов. По способу перемещения различают волочение, полупогруженный и полностью погруженный методы. При волочении лесоматериалы контактируют с землей по всей длине. В полупогруженном состоянии один конец ствола опирается на трактор, другой волочится по земле. В полностью погруженном состоянии древесина перемещается, не касаясь грунта. Наиболее распространена тракторная трелевка, обеспечивающая перемещение до 87 % древесины. 13 % приходится на канатную трелевку.

В связи с возрастающим вниманием к экологии, все чаще применяются методы, минимизирующие контакт древесины с почвой, например, воздушная трелевка. Известно, что трелевка является одной из наиболее трудо- и энергоемкой операцией лесосечных работ. Выбор трактора, машины определенной конструкции с необходимыми техническими параметрами должны обеспечивать легкое маневрирование по лесосеке, свободное прохождение над пнями, движение по грунтам с низкой несущей способностью [3]. В данной работе нами проведен факторный анализ лесных трелевочных машин [4-8] с выбранными характеристиками (см. Табл. 1) в программе STATISTICA.

Таблица 1 – Основные характеристики лесных машин

Машина	Наибольший объем трелеваемого пакета деревьев, м ³	Мощность двигателя, кВт	Емкость топливного бака, л	Масса, кг	Дорожный просвет, мм	Грузовой момент манипулятора (среднее значение), кН·м
ОТЗ-330	10	88,2	140	13700	550	77,5
ЛП-18К	8,3	95,5	200	18100	537	100
ЛТ-187	10	95,5	200	16000	537	70
ВМ-4Б	8	95,5	135	17800	537	52
ЛТ-190	5	55	130	3600	465	50
К-703М-МЛ-56	7	184	320	18000	520	83
МЛ-30	6,5	230	320	16500	520	55
Амкодор 2662	19,8	132	230	17400	540	95

Таблица 2 – Нормализация данных

	Таблица - Трелевочные машины					
	1 Наибольший объем трелевочного пакета, м ³	2 Мощность двигателя, кВт	3 Емкость топливного бака, л	4 Масса, кг	5 Дорожный просвет, мм	6 Грузовой момент манипулятора, кН·м
ОТЗ-330	0,148036588	-0,584622753	-0,898607641	-0,294342	0,914002632	0,241557303
ЛП-18К	-0,224796301	-0,458217834	-0,121433465	0,6066005	0,42402184	1,40103236
ЛТ-187	0,148036588	-0,458217834	-0,121433465	0,1766052	0,42402184	-0,144934382
ВМ-4Б	-0,29059034	-0,458217834	-0,963372156	0,5451726	0,42402184	-1,07251443
ЛТ-190	-0,948530733	-1,1595054	-1,02813667	-2,362415	-2,28971793	-1,17557887
К-703М-МЛ-56	-0,509903804	1,07422537	1,43291489	0,5861246	-0,216722274	0,524984539
МЛ-30	-0,619560536	1,87074952	1,43291489	0,2789851	-0,216722274	-0,917917752
Форвардер Амкодор 2662	2,29730854	0,173806765	0,267153623	0,4632688	0,53709433	1,14337123

В начале работы нами выполнена нормализация данных (см. Табл. 2). Далее рассчитаны собственные значения главных компонент (Табл. 3), определено влияние характеристик машин на главные компоненты (Табл. 4) и построен график каменистой осыпи (Рис. 1).

Таблица 3 – Расчет собственных значений главных компонент

Номер знач-я	Собственные значения матрицы корреляций (Таблица) Только основные переменные			
	Собств. Зн	% общей дисперс.	Кумулятивн Собств. Зн	Кумулятивн %
1	2,974392	49,57319	2,974392	49,5732
2	1,811657	30,19429	4,786049	79,7675
3	0,678924	11,31540	5,464973	91,0829
4	0,433646	7,22744	5,898619	98,3103
5	0,081748	1,36247	5,980368	99,6728
6	0,019632	0,32721	6,000000	100,0000

Таблица 4 – Влияние характеристик машин на главные компоненты

Переменная	Вклад переменных на основе корреляций (Таблица)					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6
Наибольший объем трелевочного пакета, м3	0,110788	0,170829	0,226966	0,473887	0,016942	0,000587
Мощность двигателя, кВт	0,115628	0,339035	0,001892	0,056598	0,104263	0,382585
Емкость топливного бака, л	0,129420	0,300583	0,086143	0,005973	0,000722	0,477159
Масса, кг	0,278965	0,000077	0,183996	0,006992	0,511213	0,018757
Дорожный просвет, мм	0,205274	0,092143	0,280762	0,004616	0,349240	0,067963
Грузовой момент манипулятора, кН*м	0,159925	0,097333	0,220241	0,451933	0,017619	0,052949

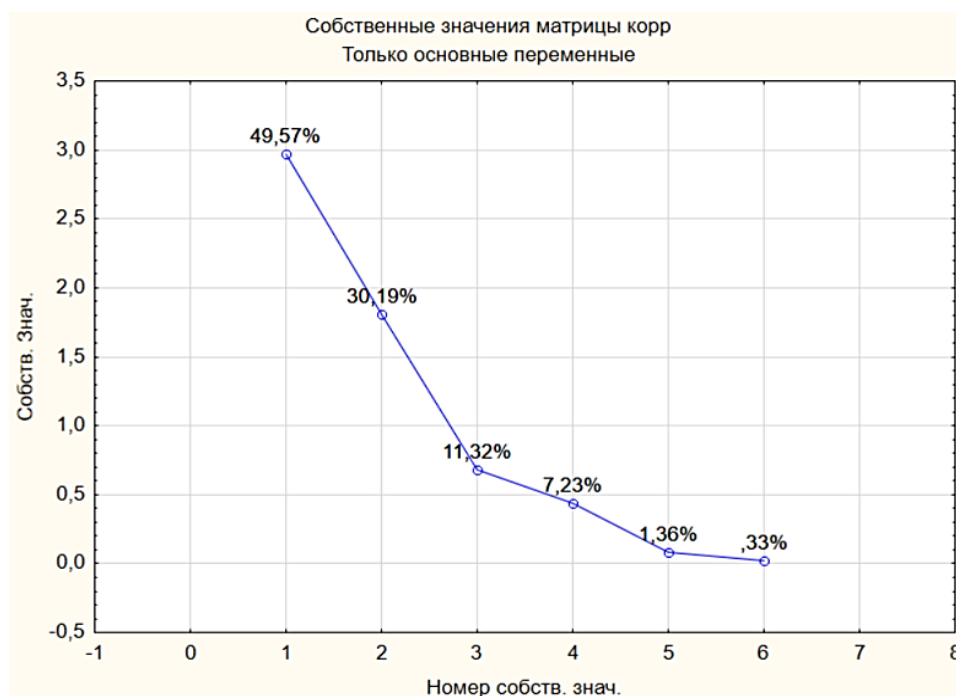


Рисунок 1 – График каменистой осыпи

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что два первых фактора покрывают дисперсию исходных данных на 80 %, первые три – на 91 %, четыре – на

98 %. Для отбора числа факторов используем критерий Кайзера. Основной акцент делаем на факторы 1 и 2, которым соответствуют собственные числа ковариационной матрицы больше 1 (2,97 и 1,81). Согласно этому определяем факторные нагрузки, задав вращение факторов – Варимакс нормализованных (см. Табл. 5) и строим график факторных нагрузок (см. Рис. 2).

Таблица 5 – Факторы – Варимакс нормализованные

Перемен.	Фактор.нагрузки (Варимакс нормализ.) Выделение: Главные компоненты (Отмечены нагрузки > ,700000)			
	Фактор 1	Фактор 2		
Наибольший объем трелевочного пакета, м3	0,791203	-0,114056		
Мощность двигателя, кВт	0,015527	0,978722		
Емкость топливного бака, л	0,069904	0,961567		
Масса, кг	0,730960	0,543680		
Дорожный просвет, мм	0,872536	0,127196		
Грузовой момент манипулятора, кН*м	0,804915	0,064241		
Общ.дис.	2,574639	2,211410		
Доля общ.	0,429106	0,368568		

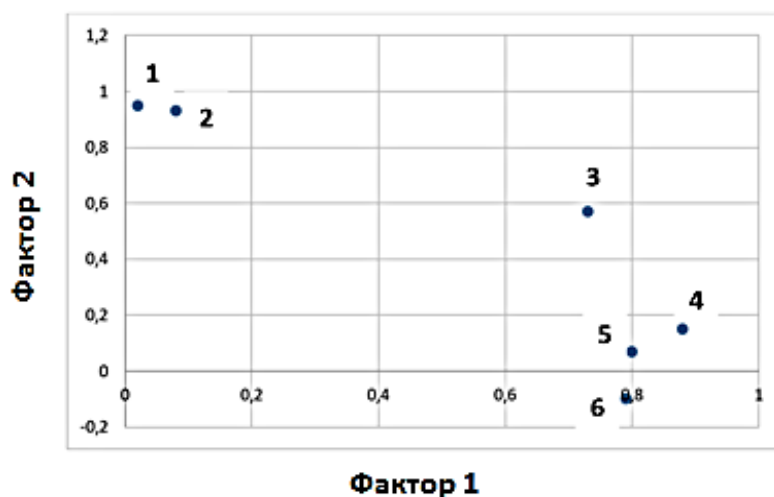


Рисунок 2 – Факторные нагрузки: 1 – мощность двигателя, кВт;

2 – емкость топливного бака, л; 3 – масса, кг; 4 – дорожный просвет, мм;

5 – грузовой момент манипулятора, кН; 6 – наибольший объем трелевочного пакета, кг

Как итог выразим влияние машин на главные компоненты в таблице 6, рисунок 3 и рассмотрим взаимосвязь между основными параметрами машин (Рис. 4).

Таблица 6 – Главные компоненты

Набл.	Вклад наблюдений на основе корреляций (Таблица)					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6
ОТЗ-330	0,06637	12,31409	4,51714	0,06205	62,65284	0,76981
ЛП-18К	3,06205	5,05873	0,00209	48,88384	2,21557	7,39769
ЛТ-187	0,02863	1,79050	2,62936	0,42631	0,60604	75,83793
ВМ-4Б	1,44211	1,69912	41,41747	7,26586	23,38568	8,23990
ЛТ-190	70,64312	0,29766	15,95647	0,00961	0,32896	0,25900
К-703М-МЛ-56	6,15868	18,43452	2,34960	12,78065	1,84459	2,23608
МЛ-30	1,89107	48,71632	1,10185	7,80772	6,76862	3,15191
Форвардер Амкодор 2662	16,70799	11,68906	32,02601	22,76396	2,19771	2,10769

Проанализировав полученную табличную и графическую информацию, можно выявить закономерности: на фактор 1 сильно влияют объем трелевочного пакета, грузовой момент манипулятора, масса и дорожный просвет, а на фактор 2 определяющим образом влияют мощность двигателя и емкость топливного бака.

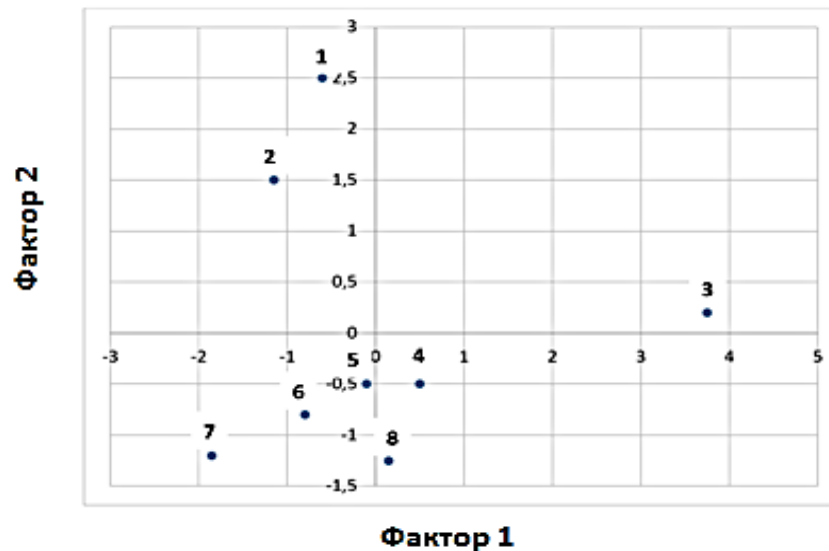


Рисунок 3 – Проекция на факторную плоскость: 1 – МЛ-30; 2 – К-703М; 3 – ЛТ-190; 4 – ВМ-4Б; 5 – ЛТ-18; 6 – ЛП-18К; 7 – Амкадор 2662; 8 – ОТЗ-330

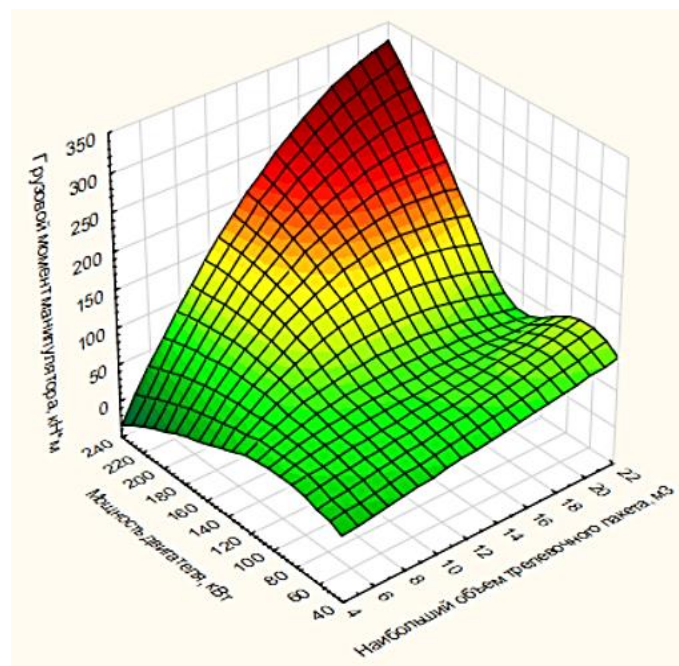


Рисунок 4 – Взаимосвязь характеристик машин

В рассматриваемом блоке трелевочных машин на первую главную компоненту основное влияние оказывают машины ЛТ-190 и Форвардер, на вторую – МЛ-30, МЛ-56, ОТЗ-330. Анализ главных компонент с высоким порядком (5 и 6), а по определению на такие

главные компоненты приходится минимальный процент дисперсии, следовательно, они выражают устойчивые свойства группы, позволяет заключить, что стабильными характеристикам представленных машин являются их масса и мощность. Массу трактора и мощность двигателя выбирают с учетом природно-производственных условий лесозаготовительного района и требований к заготавливаемому древесному сырью [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесозаготовительная техника. – URL: <https://dolina-sdm.ru/information/833/> (дата обращения 15.03.2025).
2. Zimarin, S.V. Comparative studies of energy efficient machines based on cluster analysis / S.V. Zimarin, I.V. Chetverikova, A.I. Uskov // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (на иностранных языках), Воронеж, 01-30 апреля 2022 года. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 179-184.
3. Типы лесозаготовительных машин. Трелевочная машина. – URL: <https://dolina-sdm.ru/information/1227/?ysclid=m8af1njbat23779736> (дата обращения 15.03.2025).
4. Glushkov, S Reduction of dynamic loads on the hydraulic drive of forest boom lifter / S. Glushkov, P. I. Popikov, I. V. Chetverikova, D. Yu. Druchinin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012023. – DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012023.
5. Федченко, В.Б. Импортзамещение лесных машин в РФ / В.Б. Федченко, Э.Ф. Хакимов, М.М. Литвинова // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее: материалы XIX международной научно-практической конференции : в 2 ч., Пенза, 05 февраля 2019 года. Часть 1. – Пенза: «Наука и Просвещение», 2019. – С. 82-85.
6. Евстегнеев, И.А. Новые модели лесозаготовительных машин 2016 года производства Онежского тракторного завода. Гусеничная техника / И.А. Евстегнеев, Е.В. Палкин // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 07 декабря 2017 года. – Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2017. – С. 208-212.
7. Попиков, П.И. Обоснование выбора схемы и моделирование устройства для бесчokerной трелевки леса с энергосберегающим гидроприводом / П.И. Попиков, В.И. Посметьев, А.С. Черных [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6, № 4 (24). – С. 216-224. – DOI 10.12737/23460.
8. Chetverikova, I.V. Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive / I.V. Chetverikova, P.I. Popikov, S. Glushkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 09-10 сентября 2021 года. – Voronezh, 2021. – P. 12055. – DOI 10.1088/1755-1315/875/1/012055.

REFERENCES

1. Logging equipment. – URL: <https://dolina-sdm.ru/information/833/> (accessed 15.03.2025).
2. Zimarin, S. V. Comparative studies of energy efficient machines based on cluster analysis

/ S.V. Zimarin, I.V. Chetverikova, A.I. Uskov // Actual problems of agricultural science, production and education: materials of the VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and specialists (in foreign languages), Voronezh, April 01-30, 2022. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022. – P. 179-184.

3. Types of logging machines. Skidding machine – URL: <https://dolina-sdm.ru/information/1227/?ysclid=m8af1njbat23779736> (accessed 15.03.2025).

4. Glushkov, S Reduction of dynamic loads on the hydraulic drive of forest boom lifter / S. Glushkov, P. I. Popikov, I. V. Chetverikova, D. Yu. Druchinin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, October 23, 2020. – Voronezh, 2020. – P. 012023. – DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012023.

5. Fedchenko, V.B. Import substitution of forest machinery in the Russian Federation / V.B. Fedchenko, E.F. Hakimov, M.M. Litvinova // Science and education: preserving the past, creating the future: materials of the XIX International Scientific and practical conference: at 2 a.m., Penza, February 05, 2019. Part 1. – Penza: «Science and Enlightenment», 2019. – P. 82-85.

6. Evstegneev, I.A. New models of logging machines manufactured in 2016 by the Onega Tractor Plant. Tracked vehicles / I.A. Evstegneev, E.V. Palkin // Forestry and chemical complexes - problems and solutions: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, December 07, 2017. – Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2017. – P. 208-212.

7. Popikov, P.I. Substantiation of the choice of a scheme and modeling of a device for shockless skidding of forests with an energy-saving hydraulic drive / P.I. Popikov, V.I. Posmetyev, A.S. Chernykh [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2016, – Vol. 6, No. 4 (24). – P. 216-224. – DOI: 10.12737/23460.

8. Chetverikova, I.V. Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive / I.V. Chetverikova, P.I. Popikov, S. Glushkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, September 09-10, 2021. – Voronezh, 2021. – P. 12055. – DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012055.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООТДАЧИ В ТРУБАХ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВОМАСЛЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

**HEAT TRANSFER PROCESS INTENSIFICATION IN AIRCRAFT OIL-FUEL
HEAT EXCHANGE TUBES**

Панченко С.Л., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Panchenko S.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Толстов С.А., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Tolstov S.A., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье обоснована необходимость интенсификации процесса охлаждения масла в масляных системах авиационных турбореактивных двигателей. Направление развития двигателей с целью увеличения тяги или снижения при постоянной тяге размеров и массы двигателя предполагает возрастание значений температуры газов перед турбиной. Однако данное обстоятельство приводит к увеличению тепловой нагрузки элементов двигателя, в том числе опор ротора, что вызывает рост температуры масла. В масляных системах современных турбореактивных двигателей используются те же самые масла, что и несколько десятилетий назад. В связи с этим интенсификация процесса охлаждения масла, позволяющая снизить его температуру, является основным способом сохранения смазочных свойств. Предлагается интенсификация процесса охлаждения масла в масляной системе авиационного турбореактивного двигателя за счет создания поперечной кольцевой накатки в теплообменных трубах топливомасляного теплообменника.

Ключевые слова: охлаждение масла, топливомасляный теплообменник, интенсификация процесса теплообмена, поперечная кольцевая накатка.

Abstract. The article substantiates the need to intensify of the oil cooling process in aircraft turbojet engines oil systems. The direction of engines development with the purpose of increasing thrust or reducing, at constant thrust, the size and weight of the engine, implies an increase in the temperature of the gases in front of the turbine. However, this circumstance lead to an increase in the thermal load of engine elements, including rotor supports, which causes an increase of oil temperature. The modern turbojet engines oil systems still use the same oils as several decades ago. Therefore, the oil cooling process intensification which allows reducing its temperature, is the main way to preserve the lubricating properties. It is proposed to the oil cooling process intensification in

aircraft turbojet engine oil system by creating a transverse annular knurling in heat exchange tubes of the fuel-oil heat exchanger.

Keywords: oil cooling, fuel-oil heat exchanger, heat transfer process intensification, transverse annular knurling.

Газотурбинные установки нашли широкое применение в технике. В частности, наземные газотурбинные установки используются в теплоэнергетике для получения различных видов энергии, а та же самая газотурбинная установка, адаптированная под условия использования в воздухе, в настоящее время используется в авиации в качестве авиационного газотурбинного двигателя. Газотурбинные двигатели в настоящее время используются почти на всех моделях гражданских и военных самолётов. Энергия, получаемая двигателем, является главным источником движения любого транспорта, в том числе авиационного. Кроме того, помимо силы тяги, движущей самолет вперед, двигатель создает и поддерживает подъемную силу, благодаря которой аппарат тяжелее воздуха может подниматься и лететь, преодолевая силу тяжести. Поэтому роль двигателя самолета сложно переоценить. С целью обеспечения лучшей тяги и подъемной силы, а при постоянных данных характеристиках – снижение габаритных размеров и массы двигателя, что для авиации особенно важно, параметры термодинамического цикла авиационных газотурбинных двигателей совершенствуются из поколения в поколение. Например, температура газов перед турбиной является основным термодинамическим параметром, от которого зависит полезная работа, а значит и получаемая сила тяги. Ее увеличение – фактически главное направление развития авиационного двигателестроения. При проектировании и изготовлении авиационных двигателей температура газов перед турбиной увеличивается по сравнению с предыдущими поколениями. В настоящее время у серийно выпускаемых двигателей она достигает значения 1600...1700 К, а в ближайшей перспективе и последующем намечается достижение значений 2000...2200 К и выше [1].

Однако с ростом температуры газов перед турбиной растет и тепловая нагрузка на элементы двигателя, в том числе и на опоры ротора турбины и компрессора. Подшипниковые узлы опор ротора современных теплонапряженных авиационных турбореактивных двигателей смазываются такими же маслами, таких же марок, какие применялись в масляных системах двигателей предыдущих поколений, температура газа перед турбиной у которых была меньше (например, синтетическое масло ИПМ-10 применяется с 1970-х годов до сих пор) [2, 3]. Данные масла сохраняют свои смазывающие свойства при температуре до 200 °С. В связи с ростом теплонапряженности современных двигателей температура опор роторов может превысить данное значение и привести к перегреву масла с потерей его смазывающих свойств. Хотя попытки разработать более термостойкие масла велись, их серийное производство не было начато. В связи с этим основным способом снижения температуры масла и сохранения его смазывающих свойств является интенсификация процесса его охлаждения при циркуляции в масляной системе двигателя.

Масляные системы авиационных турбореактивных двигателей оснащены топливомасляными теплообменниками, в которых масло, являющееся горячим теплоносителем, охлаждается холодным теплоносителем, в качестве которого выступает

авиационное топливо, через теплопередающие стенки теплообменных труб. При этом топливо проходит по трубам, а масло в межтрубном пространстве. Интенсифицируя дополнительно процесс теплопередачи от масла топливу либо процессы теплоотдачи от масла стенкам труб или от стенок труб топливу, возможно снизить температуру масла.

Схема авиационного топливомасляного теплообменника представлена на рисунке 1. Он представляет собой рекуперативный кожухотрубчатый аппарат, корпусом которого является обечайка 1 с двумя крышками 3 и 9. Внутри обечайки установлены трубные решетки 4 и 7, в отверстия которых способом завальцовки закреплены теплообменные трубы 5. Горячий теплоноситель (масло) подается в межтрубное пространство и проходит несколько ходов благодаря перегородкам 6. Увеличение числа ходов сделано с целью роста скорости движения теплоносителей и, соответственно, интенсификации процесса теплоотдачи. С этой же целью в крышках установлены перегородки 2 и 8. Они обеспечивают проход по трубам холодного теплоносителя (топлива) в несколько ходов. В целом движение масла и топлива в теплообменнике осуществляется по противоточной схеме.

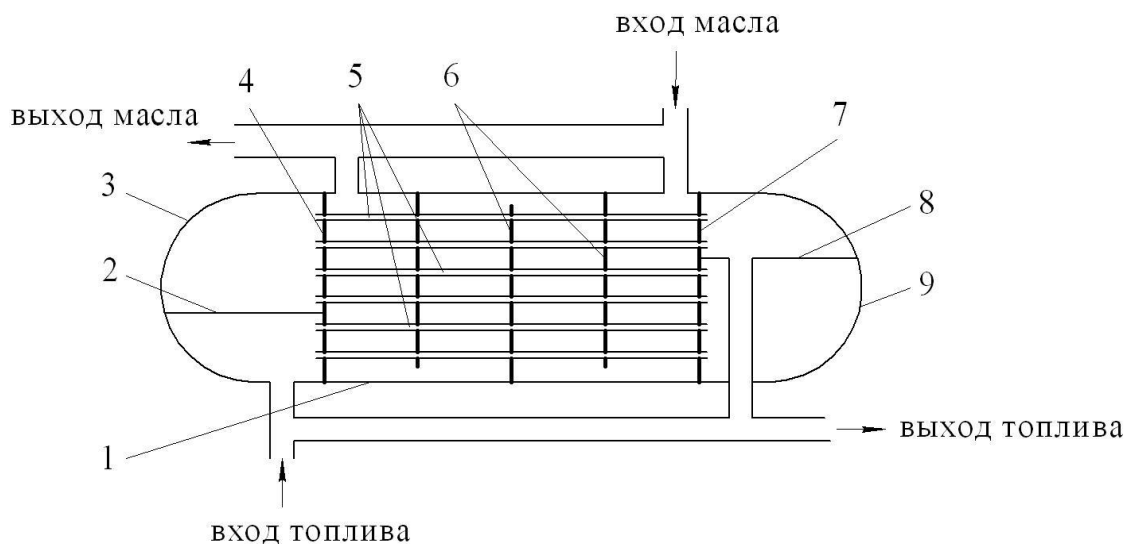


Рисунок 1 – Схема авиационного топливомасляного теплообменника:

1 – обечайка; 2, 8 – продольные перегородки; 3, 9 – крышки; 4, 7 – трубные решетки;
5 – теплообменные трубы; 6 – поперечные перегородки

Как известно [4], тепловой поток при теплопередаче через цилиндрическую стенку пропорционален линейному коэффициенту теплопередачи, длине трубы и среднему температурному напору. Для авиационного теплообменника особенно важно интенсифицировать процесс теплопередачи, не увеличивая длину теплообменных труб. Это возможно за счет роста линейного коэффициента теплопередачи, который в свою очередь зависит от коэффициентов теплоотдачи от теплоносителя стенке снаружи и внутри трубы. Таким образом, обеспечить интенсификацию процесса теплопередачи через цилиндрическую стенку возможно за счет увеличения одного из коэффициентов теплоотдачи.

Как известно, коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов, в том числе от режима движения теплоносителя (ламинарный или турбулентный), геометрических размеров

и конфигурации канала, свойств теплоносителя. При неизменных размерах канала и теплофизических свойствах теплоносителей интенсификацию теплообмена можно обеспечить за счет уменьшения ламинарного подслоя вдоль стенки канала (в данном случае трубы), искусственно турбулизируя поток в этом месте. В ламинарном подслое интенсивность теплообмена невысокая, поскольку перемешивания теплоносителя фактически нет. Теплота передается больше за счет теплопроводности через его слои, чем за счет конвекции, а теплоносители, поскольку являются жидкими или газообразными, обладают малой теплопроводностью. Турбулизация потока жидкости вдоль стенки увеличивает конвективную составляющую процесса теплообмена и таким образом интенсифицирует его.

Наиболее простым способом интенсификации теплообмена в трубах без усложнения конструкции и увеличения массы теплообменника (например, без установки в трубы завихрителей-турбулизаторов) является создание дискретно-шероховатой поверхности теплообмена [5]. Обеспечивается это применением труб с винтовой накаткой (Рис. 2а) или поперечными кольцевыми выступами в трубе, также получаемые способом накатки (Рис. 2б). При этом поперечные кольцевые выступы (поперечная кольцевая накатка) являются более простыми в изготовлении.

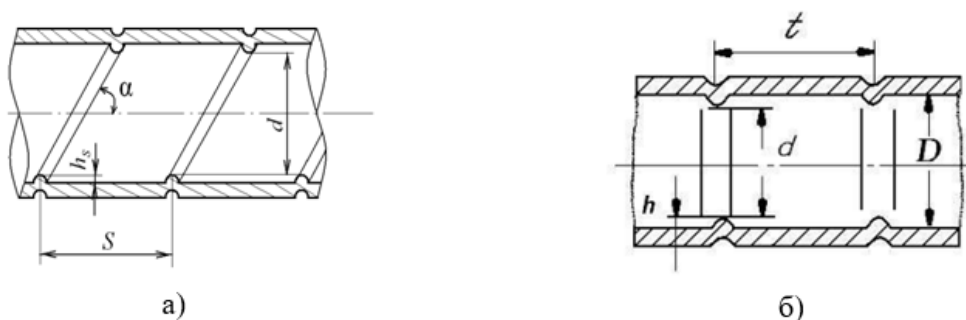


Рисунок 2 – Схема винтовой накатки (а) и поперечной кольцевой накатки (б)

Рассмотрим подробно интенсификацию теплообмена в трубе с поперечной кольцевой накаткой. При применении данного способа в трубе с определенным шагом t (см. Рис. 2б) способом накатки снаружи образуются кольцевые углубления, а внутри трубы – кольцевые выступы, которые турбулизируют поток. При этом в месте образования кольцевых выступов внутренний диаметр трубы D уменьшается до размера d .

Как известно, математическое определение и даже прямое экспериментальное измерение коэффициента теплоотдачи невозможно из-за зависимости его от огромного числа факторов, поэтому на практике прибегают к теории подобия тепловых процессов и пользуются безразмерным коэффициентом теплоотдачи – критерием Нуссельта (Nu). В свою очередь данный безразмерный комплекс зависит от определяющих безразмерных комплексов – критериев Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr). По соотношению между критериями Нуссельта, определенными в гладкой трубе и трубе с использованием, например, накатки, можно сделать вывод о соотношении коэффициентов теплоотдачи и интенсификации процесса теплообмена. Экспериментально установлено [6], что для теплоотдачи газов и жидкостей при $Re > 10^4$ внутри гладких цилиндрических труб и таких же по форме труб, но с

применением поперечной кольцевой накатки (см. Рис. 2б), между критериями Нуссельта наблюдаются следующие эмпирические зависимости:

– при $\frac{d}{D} = 0,9...0,98$; $\frac{t}{D} = 1...10$

$$Nu = Nu_0 \left(1 + \frac{\ln Re - 4,6}{7,45} \right) \left(\frac{1,14 - 0,28 \sqrt{1 - \frac{d}{D}}}{1,14} \right) \exp \left[\frac{9 \left(1 - \frac{d}{D} \right)}{\left(\frac{t}{D} \right)^{0,58}} \right]; \quad (1)$$

– при $\frac{d}{D} = 0,88...0,98$; $\frac{t}{D} = 0,25...0,8$

$$Nu = Nu_0 \left(1 + \frac{\ln Re - 4,6}{35} \right) \left(3 - 2 \exp \left[\frac{-18,2 \left(1 - \frac{d}{D} \right)^{1,13}}{\left(\frac{t}{D} \right)^{0,326}} \right] \right), \quad (2)$$

где Nu_0 , Nu – критерии Нуссельта при теплоотдаче в гладкой трубе и трубе с поперечной кольцевой накаткой соответственно; D – внутренний диаметр трубы, мм; d – внутренний диаметр трубы в месте образования кольцевых выступов, мм; t – шаг поперечной кольцевой накатки, мм (см. Рис. 2б).

Для расчетного сравнения критерия Нуссельта и коэффициента теплоотдачи внутри трубы (в данном случае для топлива) воспользуемся методикой расчета, приведенной на рисунке 3, а также выражениями (1) и (2) для сравнения критериев Нуссельта и коэффициентов теплоотдачи в штатной гладкой трубе топливомасляного теплообменника и модифицированной трубе с поперечной кольцевой накаткой при различных геометрических размерах накатки (d , t , см. Рис. 2б).

На рисунках 4 и 5 показаны графические зависимости, полученные для топливомасляного теплообменника, применяемого на авиационном турбореактивном двигателе АЛ-31Ф при следующих физических свойствах топлива (авиационный керосин марки ТС-1) и штатных размерах теплообменника [7]:

– температура топлива на входе и выходе теплообменника соответственно $t_{\text{Т ВХ}} = 50$ °С, $t_{\text{Т ВЫХ}} = 80$ °С;

– температура масла на входе и выходе теплообменника соответственно $t_{\text{М ВХ}} = 200$ °С, $t_{\text{М ВЫХ}} = 150$ °С;

– значения теплофизических свойств топлива при его средней температуре $t_{\text{Т}}$ и средней температуре стенки $t_{\text{СТ}}$, плотности ρ , удельной изобарной теплоемкости c_p и $c_{p \text{ СТ}}$, динамической вязкости μ и $\mu_{\text{СТ}}$, коэффициента теплопроводности λ и $\lambda_{\text{СТ}}$ определялись по таблицам зависимости свойств авиационного керосина ТС-1 от температуры [8];

– расход топлива через топливомасляный теплообменник $G = 9000$ кг/ч;

– внутренний диаметр одной трубы теплообменника $D = 0,002$ м;

– число ходов теплообменника по топливу $z = 3$;

– количество труб в теплообменнике $n = 350$.

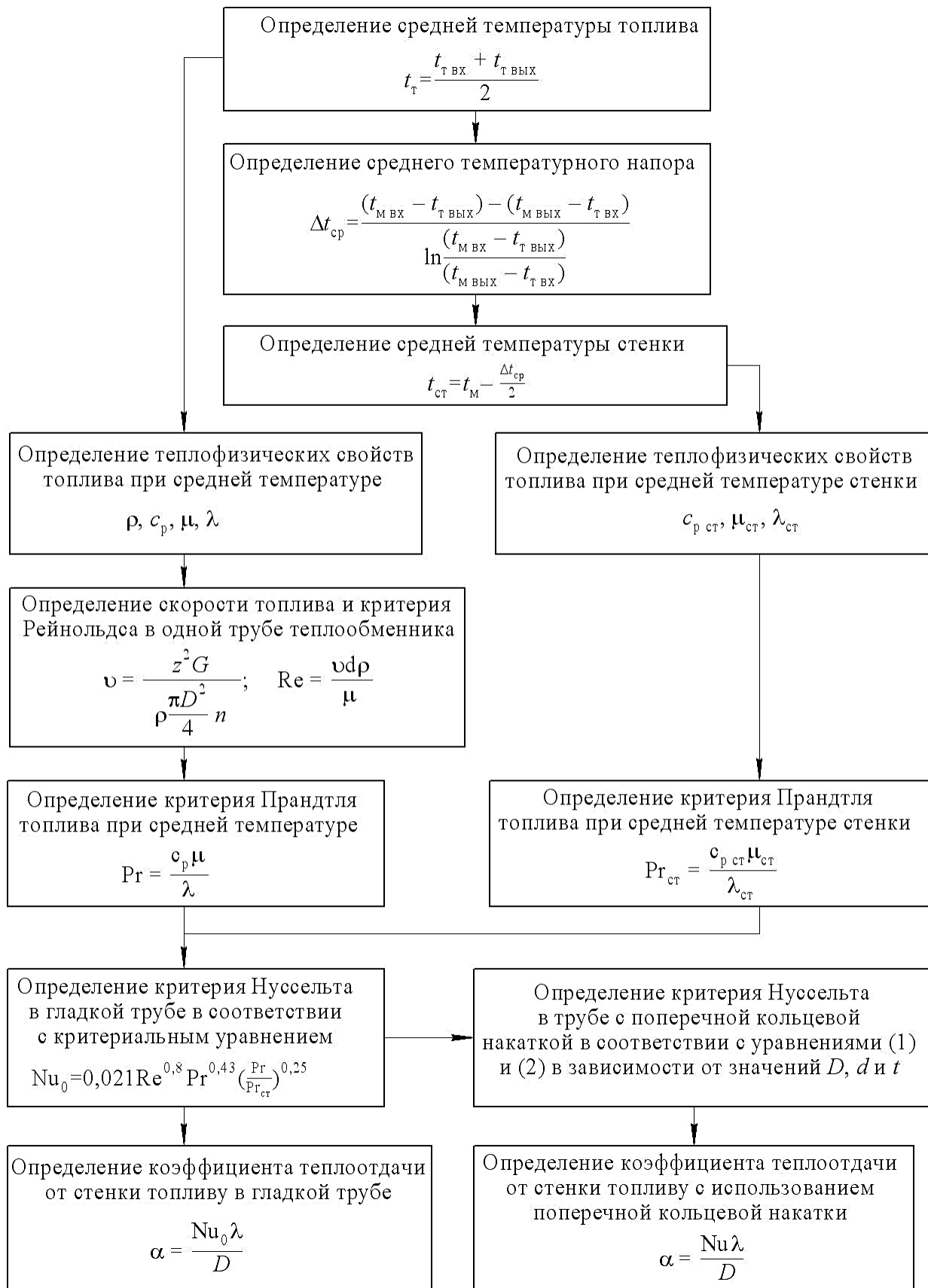


Рисунок 3 – Схема методики расчета критерия Нуссельта и коэффициента теплоотдачи от стенки теплоносителю (топливу) внутри трубы [8]

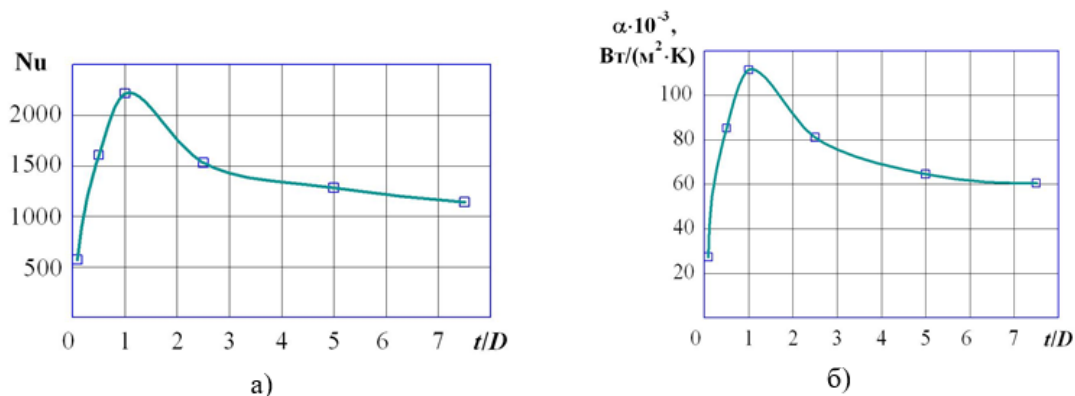


Рисунок 4 – Зависимость критерия Нуссельта Nu (а) и коэффициента теплоотдачи α (б) в трубе топливомасляного теплообменника с применением поперечной кольцевой накатки от отношения шага накатки t к внутреннему диаметру D

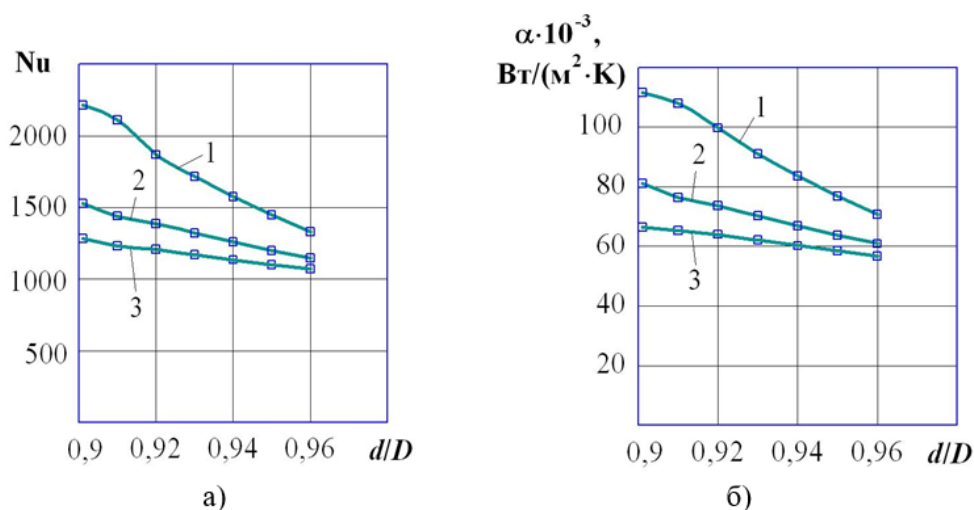


Рисунок 5 – Зависимость критерия Нуссельта Nu (а) и коэффициента теплоотдачи α (б) в трубе топливомасляного теплообменника с применением поперечной кольцевой накатки от отношения внутреннего диаметра трубы в месте образования кольцевых выступов к внутреннему диаметру трубы (d/D): 1 – при $t/D = 1$; 2 – при $t/D = 2,5$; 3 – при $t/D = 5$

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что параметры, характеризующие интенсивность процесса теплоотдачи (критерий Нуссельта Nu и коэффициент теплоотдачи α), с увеличением шага кольцевой накатки сначала возрастают по сравнению с их значениями в гладкой трубе, а по достижении им определенного значения начинают постепенно уменьшаться (см. Рис. 4). Это можно объяснить тем, что при малых значениях t (см. Рис. 2б) расстояние между кольцевыми выступами небольшое, соответственно, частицы топлива будут с трудом проходить в данное место трубы, что отрицательно скажется на уменьшении ламинарного пограничного слоя. При больших значениях t эффекта от разрушения ламинарного подслоя и, соответственно, турбулизации потока за счет одного кольцевого выступа может не хватить до следующего, и на данном участке перед следующим выступом процесс теплообмена будет проходить как в гладкой

трубе без использования поперечной кольцевой накатки. Что касается зависимости Nu и α от отношения внутреннего диаметра трубы в месте образования кольцевых выступов к внутреннему диаметру гладкой трубы (d/D), то с увеличением данного значения, а, соответственно, увеличением значения диаметра d при постоянном диаметре D , уменьшается высота кольцевого выступа h , равного половине разности диаметров D и d , что хорошо видно из схемы на рисунке 2б. Чем меньше высота h , тем меньший эффект на разрушение пограничного ламинарного слоя и турбулизацию потока оказывают выступы кольцевой накатки, а при $d/D = 1$ труба во внутреннем диаметре превращается в обычную гладкую трубу. Поэтому при увеличении значения d/D значения Nu и α уменьшаются (см. Рис. 5). Из этого же рисунка видно, что параметры процесса теплоотдачи уменьшаются также и при росте значения t/D , о чем было сказано выше.

Таким образом, при проектировании и изготовлении кольцевой накатки в теплообменных трубах с целью интенсификации процесса теплоотдачи необходимо выбирать такие значения t и D , которые обеспечат максимальный рост коэффициента теплоотдачи и тем самым интенсифицируют процесс теплоотдачи в трубе и теплопередачи между теплоносителями (в данном случае топливом и маслом) через стенку трубы, что поможет достичь лучшего охлаждения горячего теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория авиационных двигателей. Часть 1 / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров, В.Н. Котовский [и др.]. – Москва: Издательство ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2005. – 366 с.
2. Панченко, С.Л. Интенсификация охлаждения масла при установке воздухомасляного теплообменника во втором контуре двухконтурного турбореактивного двигателя / С.Л. Панченко // Вестник УГАТУ. – 2023. – Т. 27, № 2 (100). – С. 3-14.
3. Трянов, А.Е. О тепловой защите масляных полостей опор, создаваемых ГТД / А.Е. Трянов, О.А. Гришанов, А.С. Виноградов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – № 3 (19). – С. 318-328.
4. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Лаптев, А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов / А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – Москва: «Теплотехник», 2011. – 335 с.
6. Белозерцев В.Н. Интенсификация теплообмена: учебное пособие / В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.И. Довгялло [и др.]. – Самара: Издательство Самарского университета, 2018. – 208 с.
7. Турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф: учебное пособие / под ред. А.П. Назарова. – Москва: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1987. – 363 с.
8. Панченко, С.Л. Теплообменники масляных систем двигателей летательных аппаратов и их расчет: учебное пособие / С.Л. Панченко, С.А. Толстов, А.К. Айсин. – Воронеж: Роза ветров, 2022. – 94 с.

REFERENCES

1. The theory of aircraft engines. Part 1 / Yu.N. Nechaev, R.M. Fedorov, V.N. Kotovskiy [et al.]. – Moscow: Zhukovsky Air Force Engineering Academy Publ., 2005. – 366 p.
2. Panchenko, S.L. Intensification of oil cooling by installing an air-oil heat exchanger in the bypass duct of a bypass turbojet engine / S.L. Panchenko // Bulletin of UGATU. – 2023. – Vol. 27, No 2 (100). – P. 3-14.
3. Tryanov, A.E. About the thermal defense of supports oil cavities of the created gas turbine engines / A.E. Tryanov, O.A. Grishanov, A.S. Vinogradov // Bulletin of Samara State Aerospace university. – 2009. – No. 3 (19) – P. 318-328.
4. Mikheev, M.A. Basics of heat transfer / M.A. Mikheev, I.M. Mikheeva. – Moscow: Energy, 1977. – 344 p.
5. Laptev, A.G. Methods of intensification and modeling of heat mass transfer processes / A.G. Laptev, N.A. Nikolaev, M.M. Basharov. – Moscow: «Heating engineer», 2011. – 335 p.
6. Belozertsev, V.N. Heat transfer intensification: training manual / V.N. Belozertsev, V.V. Biryuk, A.I. Dovgyallo [et al.]. – Samara: Samara University Publ., 2018. – 208 p.
7. Turbojet baypass engine with afterburner combustion chamber AL-31F: training manual / A.P. Nazarov (ed.). – Moscow.: Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1987. – 363 p.
8. Panchenko, S.L. Heat exchangers of aerial vehicles engines oil systems and calculation: training manual / S.L. Panchenko, S.A. Tolstov, A.K. Aysin. – Voronezh: Wind rose, 2022. – 94 p.

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДВС С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВО-ВОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ

DEVELOPMENT OF A SCHEME FOR AN EXPERIMENTAL INSTALLATION OF AN
INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH A MODERNIZED FUEL-WATER-AIR MIXTURE
SUPPLY SYSTEM IN ORDER TO REDUCE HARMFUL EMISSIONS IN EXHAUST GASES

Толстов С.А., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Tolstov S.A., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Панченко С.Л., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Panchenko S.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Толстова А.С., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Tolstova A.S., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Набатов Д.Р., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Nabatov D.R., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Трощенко Р.В., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Troshchenko R.V., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Одним из основных поставщиков вредных веществ в атмосферу является автомобильный транспорт, оснащенный двигателем внутреннего сгорания. Топливом для ДВС служат фракции от переработки нефти, в основном, это бензин и солярка. В настоящее время в мире эксплуатируется около миллиарда автомобилей, которые потребляют более 70 % всей добываемой нефти. При сгорании автомобильного топлива в атмосферу выбрасываются различные токсичные вещества, негативно воздействуя на окружающую природу и здоровье людей, ухудшая экологическую ситуацию. В настоящее время экологическая обстановка настолько серьезная, что некоторые развитые страны уже начинают вводить запрет на использование классических ДВС. Таким образом, модернизация ДВС с целью уменьшения

токсичных выбросов в атмосферу является актуальной задачей. В статье описывается разработанная схема установки на базе четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, которая позволит уменьшить количество токсичных газов в продуктах сгорания.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, двигатель внутреннего сгорания (ДВС), топливо, впрыск воды, токсичные газы, экология, газоанализатор.

Abstract. One of the main sources of harmful substances in the atmosphere is motor transport equipped with an internal combustion engine. The fuel for internal combustion engines is fractions from oil refining, mainly gasoline and diesel fuel. Currently, about a billion cars are used in the world, which consume more than 70% of all oil produced. When motor fuel is burned, various toxic substances are emitted into the atmosphere, negatively affecting the environment and human health, worsening the environmental situation. Currently, the environmental situation is so serious that some developed countries are already beginning to ban the use of classic internal combustion engines. Thus, upgrading internal combustion engines to reduce toxic emissions into the atmosphere is an urgent task. The article describes the developed installation scheme based on a four-stroke internal combustion engine, which will reduce the amount of toxic gases in the combustion products.

Keywords: road transport, internal combustion engine (ICE), fuel, water injection, toxic gases, ecology, gas analyzer.

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – это тепловая машина, в которой тепловая энергия сгораемого топлива преобразуется в механическую работу. В настоящее время ДВС являются самыми распространенными видами двигателей, производятся и используются повсеместно. Можно сказать, что мы живем в веке ДВС. В мире огромное количество авто- и мототранспорта с ДВС используется в промышленности и в личных целях.

Топливом для ДВС служат фракции от переработки нефти, в основном, это бензин и солярка. В настоящее время в мире эксплуатируется около полутора миллиарда автомобилей, которые потребляют более 70% всей добываемой нефти. При сгорании автомобильного топлива в атмосферу выбрасываются различные токсичные вещества (оксид углерода (CO), углекислый газ (CO₂), оксиды азота (NO_x), а также углеводороды (C_nH_m)), негативно воздействуя на окружающую природу, здоровье людей и создавая серьезную экологическую ситуацию [1-3]. Таким образом, одним из основных поставщиков вредных веществ в атмосферу является автомобильный транспорт, оснащенный двигателем внутреннего сгорания (Рис. 1).

В настоящее время экологическая обстановка настолько серьезна, что некоторые развитые страны уже начинают вводить запрет на использование классических ДВС. Кроме того, топливные кризисы и снижение мировых запасов нефти заставили ученых и инженеров во множестве стран начать поиски альтернативного топлива для двигателей. На сегодняшний день практически все мировые лидеры автоиндустрии отказываются от дальнейших разработок ДВС, сконцентрировав свое внимание, в частности, на электродвигателях. Если 10 лет назад электромобиль был в диковинку, то сегодня этим уже никого не удивишь. Интенсивно развивается и инфраструктура для автомобилей на электротяге. С такими тенденциями за несколько десятков лет электромобили придут на смену традиционным на сегодняшний день автомобилям с ДВС [3-6].

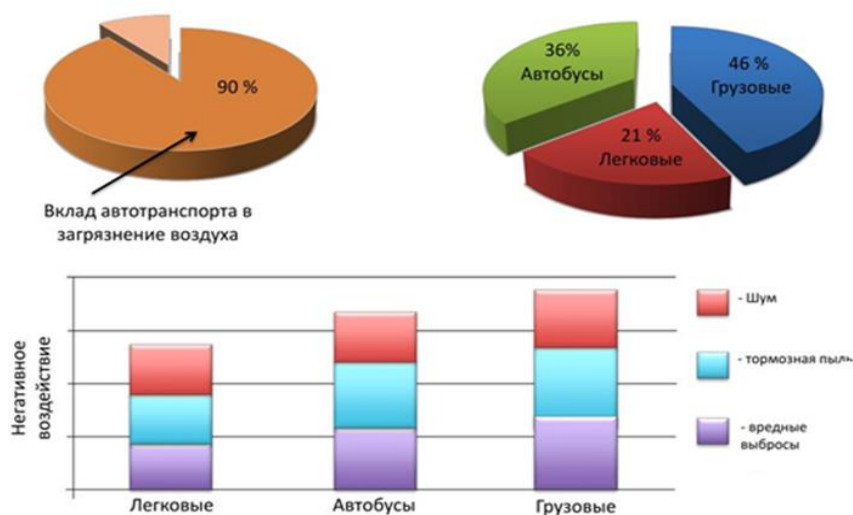


Рисунок 1 – Вклад автотранспорта с ДВС в экологию города

Но даже если предположить, что в ближайшем будущем будут производиться только автомобили на электротяге, все равно останется огромное количество классических автомобилей с ДВС, а значит, актуальна проблема по уменьшению вредных выбросов в атмосферу. Варианты есть. Это применение более чистого топлива, внедрение инновационных катализаторов, переход на газовое топливо. Еще один из способов снижения токсичности выхлопных газов – это добавление воды в топливно-воздушную смесь. Этот способ известен давно. Вопрос о применении воды в качестве охлаждающей и антидетонационной присадки к топливу был исследован еще в 30-х годах прошлого века в СССР, Германии, Соединенных Штатах Америки и даже использовался в некоторых областях на промышленных образцах. Но, тем не менее, данная технология широкого применения не получила и в настоящее время практически не используется, так как еще не до конца исследована, нет необходимой теории [4, 7, 8].

С точки зрения теплотехники, добавленная в топливо вода является балластом, так как часть тепла, выделяющегося при сгорании топлива, тратится на нагрев воды, испарение и перегрев пара, чем и объясняется охлаждающий эффект воды, впрыснутой в цилиндры двигателя. Вода благодаря высокой теплоемкости уменьшает температуру в двигателе. При стандартной работе на придание движению автомобиля уходит 30-45 % энергии от сжигания топлива, остальная часть «обогревает» окружающую среду. Впрыск же воды, уменьшая температуру внутри цилиндров, позволяет повысить эффективность работы мотора, так как более прохладный газ сжать намного легче и энергия, уходящая на сжатие, существенно снижается. Также вода попадает в цилиндр в распыленном виде и, соединяясь с бензином, помогает топливу заполнить всё пространство, благодаря чему оно равномерно выгорает. Такое явление должно обеспечить рост КПД, уменьшить детонацию и увеличить мощность двигателя. В подтверждение этому исследователи водяного впрыска отмечают следующие достоинства применения смеси топлива и воды:

- увеличение мощности двигателя;
- уменьшение расхода топлива;
- повышение КПД двигателя;

- увеличение срока эксплуатации двигателя;
- существенное снижение риска детонации ДВС;
- снижение токсичности выхлопных газов.

Недостатки:

- необходимость иметь сложные специальные устройства для подачи воды, ее распыления и автоматического регулирования;
- необходимость иметь запас чистой (дистиллированной) воды;
- при минусовой температуре работа впрыска может быть под угрозой, ибо вода может замерзнуть;
- возможность коррозии деталей двигателя от воды, поэтому перед остановкой двигателя необходимо отключить подачу воды.

Если говорить о достоинствах, то они впечатляют. Главное, на наш взгляд, это то, что при введении воды снижаются вредные выбросы в атмосферу и увеличивается срок эксплуатации двигателя. В подтверждение этому автомобилисты, которые используют данный способ на практике, единогласно уверяют, что даже после нескольких лет эксплуатации ДВС с впрыском воды внутренности его цилиндров имеют меньше нагара и выглядят совсем как новые [7, 8].

С целью исследования возможности применения впрыска воды в ДВС для снижения вредных выбросов в атмосферу и теоретического описания процессов, протекающих при этом, предложена схема экспериментальной установки на базе четырехтактного бензинового двигателя (Рис. 2). Причем, использовать воду будем не в жидком состоянии, а в газообразном. Для реализации этого способа разработан генератор для получения влажного насыщенного воздуха (тумана). Схема и разработанный генератор, представлены на рисунках 3 и 4. Ввод тумана в топливно-воздушную смесь предлагается осуществлять после воздушного фильтра во входной коллектор. Данный вариант ввода воды достаточно прост, не требует серьезного вмешательства в конструкцию двигателя и вспомогательного оборудования, что является существенным достоинством работы.

Основным элементом генератора для получения влажного воздуха (тумана) является ультразвуковой излучатель. Ультразвуковая мембрана излучателя вибрирует с высокой частотой, «разбивая» воду на мельчайшие капли (туман). Питание излучателя происходит от 12 В постоянного напряжения, т.е. не требует дополнительного электрического источника и может осуществляться от аккумуляторной батареи автомобиля.

Принцип работы данной системы прост: в резервуар с водой помещается ультразвуковой излучатель, который превращает воду в туман. Вентилятор вытесняет его из емкости в паропровод, который идет к впускному коллектору карбюратора двигателя, где происходит его смешивание с топливом, после чего смесь поступает в камеру сгорания двигателя. Кран, установленный на паропроводе, позволяет перекрывать подачу тумана в необходимых случаях. А именно, запуск двигателя необходимо осуществлять в обычном режиме на бензине, дождаться стабильной работы двигателя, а затем открыть кран подачи влаги. При глушении двигателя необходимо действовать в обратном порядке, сначала перекрыть кран влаги, дать двигателю поработать некоторое время в стандартном режиме, а затем заглушить. Эти условия необходимо выполнять для того, чтобы в цилиндре и картере двигателя не оставалась и не накапливалась вода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко, Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. Рабочие процессы / Н.Х. Дьяченко. – Ленинград: Машиностроение, 1974. – 551 с.
2. Свистула, А.Е. Двигатели внутреннего сгорания: учебное пособие / А.Е. Свистула. – Барнаул: Издательство АлтГТУ, 2009. – 81 с.
3. Кульчинский, А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей / А.Р. Кульчинский. – Владимир: Издательство Владимирского государственного университета, 2000. – 256 с.
4. Лефёров, А.А. Актуальность и проблемы совершенствования цикла ДВС применением непосредственного впрыска воды / А.А. Лефёров, Н.Д. Куприянов // Труды МАИ. – 2010. – № 39. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-i-problemy-sovershenstvovaniya-tsikla-dvs-primeneniem-neposredstvennogo-vpryska-vody> (дата обращения 15.03.2025).
5. В России начались испытания электромобиля. – URL: <https://www.yuga.ru/news/453302-v-adygee-sobrali-pervyj-v-rossii-elektricheskij-mikroavtomobil> (дата обращения 27.09.2024).
6. Впрыск воды в двигатель, форум. – URL: <https://vistclub.ru/forum/viewtopic.php?t=995342&start=15> (дата обращения 11.10.2024).
7. Как впрыск воды повышает мощность мотора. – URL: <https://quto.ru/journal/articles/kak-vprysk-vody-povyshaet-moschnost-motora.htm> (дата обращения 03.12.2024).
8. Системы впрыска воды в ДВС. – URL: <https://www.drive2.ru/c/1695222/?ysclid=m659rtp59y543101011> (дата обращения 03.12.2024).

REFERENCES

1. Dyachenko, N.H. Theory of internal combustion engines. Workflows / N.H. Dyachenko. – Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1974. – 551 p.
2. Svistula, A.E. Internal combustion engines: training manual / A.E. Svistula. – Barnaul: AltSTU Publishing House, 2009. – 81 p.
3. Kulchinsky, A.R. Toxicity of automobile and tractor engines / A.R. Kulchinsky. – Vladimir: Vladimir State University Press, 2000. – 256 p.
4. Leferov, A.A. The relevance and problems of improving the internal combustion engine cycle using direct water injection / A.A. Leferov, N.D. Kupriyanov // Proceedings of MAI. – 2010. – Iss. 39. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-i-problemy-sovershenstvovaniya-tsikla-dvs-primeneniem-neposredstvennogo-vpryska-vody> (accessed 15.03.2025).
5. Tests of an electric car have begun in Russia. – URL: <https://www.yuga.ru/news/453302-v-adygee-sobrali-pervyj-v-rossii-elektricheskij-mikroavtomobil> (accessed 27.09.2024).
6. Water injection into the engine, forum. – URL: <https://vistclub.ru/forum/viewtopic.php?t=995342&start=15> (date of circulation 11.10.2024).
7. How water injection increases engine power. – URL: <https://quto.ru/journal/articles/kak-vprysk-vody-povyshaet-moschnost-motora.htm> (accessed 03.12.2024).
8. Water injection systems in the internal combustion engine. – URL: <https://www.drive2.ru/c/1695222/?ysclid=m659rtp59y543101011> (accessed 03.12.2024).

DOI: 10.58168/PHBSc-IT2025_142-149

УДК УДК 630:62-91

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ ЛЕСНОГО ГИДРОМАНИПУЛЯТОРА С МАГНИТНЫМ ДЕМПФИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

MATHEMATICAL MODEL OF THE BOOM LIFTING MECHANISM OF A FORESTRY
HYDROMANIPULATOR WITH A MAGNETIC DAMPING DEVICE

Полумиско А.А., аспирант, преподаватель
СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж,
Россия

Polumisko A.A., Postgraduate student, College
teacher, Voronezh State University of Forestry
and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Евсиков И.Д., аспирант, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikov I.D., Postgraduate student, Voronezh
State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Попиков В.П., кандидат технических наук,
доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж,
Россия

Popikov V.P., PhD in Technical Sciences,
Docent, Associate Professor, Voronezh State
University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Анализ научных и технических источников подтверждает, что проблема снижения динамических нагрузок и повышения надежности лесотранспортных машин остается актуальной для лесозаготовительной отрасли. В рамках исследования был предложен усовершенствованный грузоподъемный механизм гидроманипулятора, включающий в свою конструкцию магнитное демпфирующее устройство, предназначенное для уменьшения ударных нагрузок в процессе работы. Разработана математическая модель движения плунжера магнитного демпфера, позволяющая описать его динамику в системе гидропривода. Внедрение данной технологии способствует повышению надежности гидравлических систем лесных манипуляторов и снижению энергетических затрат, что делает эксплуатацию техники более эффективной.

Ключевые слова: магнитный демпфер; гидропривод; динамические нагрузки; гидроманипулятор; математическая модель.

Abstract. An analysis of scientific and technical sources confirms that the problem of reducing dynamic loads and increasing the reliability of forestry machines remains relevant for the logging industry. As part of the study, an improved lifting mechanism of a hydraulic manipulator was proposed, which includes a magnetic damping device in its design, designed to reduce impact loads during operation. A mathematical model of the movement of the magnetic damper plunger has been

developed, allowing us to describe its dynamics in the hydraulic drive system. The introduction of this technology helps to increase the reliability of hydraulic systems of forestry manipulators and reduce energy costs, which makes the operation of equipment more efficient.

Keywords: magnetic damper; hydraulic drive; dynamic loads; hydraulic manipulator; mathematical model.

Эффективность лесозаготовительных процессов во многом зависит от технического состояния и надежности оборудования, используемого при выполнении погрузочно-разгрузочных операций. Важной задачей является минимизация перегрузок в гидравлических системах, возникающих при резких изменениях режимов работы, что приводит к преждевременному износу узлов и снижению ресурса машин. Особенно актуальна эта проблема для манипуляторных механизмов, в конструкции которых предусмотрены гидроцилиндры, подверженные ударным нагрузкам при работе с древесиной.

Одним из методов повышения плавности работы грузоподъемных устройств является использование демпфирующих механизмов, способных компенсировать резкие изменения давления в системе. Перспективным решением в данной области является внедрение магнитных демпферов, обеспечивающих контролируемое гашение колебаний за счет взаимодействия магнитных полей. Подобные устройства могут не только снижать динамические нагрузки, но и уменьшать потребление энергии, особенно при манипуляциях с малогабаритными грузами. Нами предложен новый грузоподъемный механизм лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством, защищенным патентом на полезную модель (рис. 1) [1].

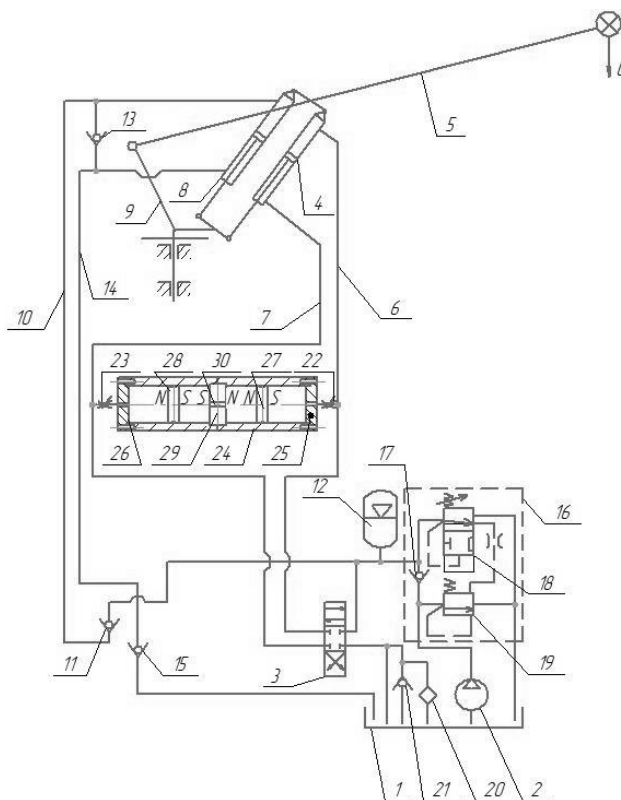


Рисунок 1 – Гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством

В данной работе представлена разработка математической модели магнитного демпфера, интегрируемого в гидропривод лесозаготовительных машин. Основное внимание уделяется принципу его действия, математическому описанию взаимодействующих сил и анализу влияния на рабочие характеристики манипулятора.

Составлена расчетная схема магнитного демпфирующего устройства гидропривода грузоподъемного механизма автосортиментовоза (рис. 2).

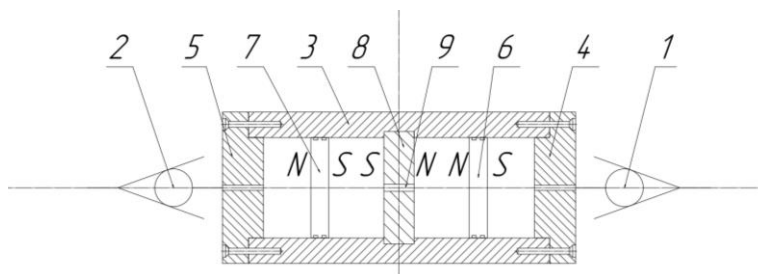


Рисунок 2 – Расчетная схема магнитного демпфирующего устройства в гидроприводе механизма подъема стрелы: 1, 2 – обратные клапаны; 3 – диэлектрический корпус; 4, 5 – диэлектрические крышки; 6, 7 – магнитные подвижные поршни; 8 – магнитная неподвижная перегородка; 9 – дроссельное отверстие.

Через обратные клапаны 1 и 2 подключено магнитное демпфирующее устройство 3, включающее корпус, крышки 4 и 5, подвижные поршни 6 и 7 и неподвижную перегородку 8, при этом корпус и крышки 4 и 5 магнитного демпфирующего устройства 3 выполнены из немагнитного материала, а его подвижные поршни 6 и 7 и неподвижная перегородка 8 – из магнитного материала, причем боковые стороны подвижных поршней 6 и 7 и неподвижной перегородки 8 обращены друг к другу одноименными полюсами *N* и *S* (рис. 1). В центре неподвижной перегородки 8 имеется дроссельное отверстие 9 для перетечки рабочей жидкости между полостями магнитного демпфирующего устройства 3.

Принцип работы нового демпфирующего устройства основан на описании процесса всплеска давления в гидролиниях [1]. В одной из них часть рабочей жидкости, равная объему деформации упругих элементов гидропривода, поступает через обратный клапан 1 в магнитное демпфирующее устройство 3, перемещая подвижный поршень 6 влево, при этом между одноименными полюсами *N* подвижного поршня 6 и неподвижной перегородки 8 возникает упругая отталкивающая сила, гасящая всплеск давления, и рабочая жидкость вытесняется через дроссельное отверстие 9 в полость между неподвижной перегородкой 8 и подвижным поршнем 7. При всплеске давления в противоположной гидролинии часть рабочей жидкости, равная объему деформации упругих элементов гидропривода, поступает через обратный клапан 2 в магнитное демпфирующее устройство 3, перемещая подвижный поршень 7 вправо, при этом между одноименными полюсами *S* подвижного поршня 7 и неподвижной перегородки 8 возникает упругая отталкивающая сила, гасящая всплеск давления, и рабочая жидкость вытесняется через дроссельное отверстие 9 в полость между неподвижной перегородкой 8 и подвижным поршнем 6.

Для рассмотрения процесса демпфирования используется математическая модель, включающая уравнения вращательного движения стрелы лесного манипулятора в процессе

подъема пачки сортиментов (1), расхода рабочей жидкости в гидроприводе механизма подъема стрелы (2), при этом зарядка гидроаккумулятора не происходит, и движения магнитного поршня внутри демпфера, выполненного из немагнитного материала, обеспечивающего минимальное влияние на магнитное поле (3).

Уравнение вращательного движения стрелы лесного манипулятора в процессе подъема пачки сортиментов представляет собой сумму уравнений моментов сил инерции масс подвижных элементов, движущей силы на штоке гидроцилиндра и сил тяжести звеньев манипулятора и груза относительно шарнирного соединения стрелы и поворотной колонны:

$$(J_{\text{бр}} + J_c) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta}{4} p - (G_{\text{бр}} L + G_c l_n) \cos \varphi, \quad (1)$$

где φ – угол подъема стрелы, рад; $J_{\text{бр}}$ – момент инерции пачки бревен относительно точки О, кг·м²; J_c – момент инерции стрелы относительно точки О, кг·м²; d_c – внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м; b_1 – расстояние от центра тяжести стрелы до точки подвеса груза, м; β – угол наклона гидроцилиндра, рад; p – текущее значение давления в гидросистеме, Па; $G_{\text{бр}}$ – сила тяжести пачки бревен в захвате, Н; G_c – сила тяжести стрелы, Н; L – вылет манипулятора, м; l_n – расстояние от точки О до центра масс стреловой группы, м.

Уравнение расхода рабочей жидкости в гидроприводе механизма подъема стрелы, включает в себя подачу насоса в левой части уравнения, расходы рабочей жидкости основного гидроцилиндра, магнитного демпфера, утечек через зазоры и деформации упругих элементов:

$$q_n n_n = \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta}{4} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \mu A_{\text{др}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} + a_y p + K_p \cdot \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

где q_n – рабочий объем насоса, $\frac{\text{м}^3}{\text{об}}$; n_n – частота вращения насоса, $\frac{\text{об}}{\text{с}}$; l – длина стрелы манипулятора, м; β – внутренний угол между осью гидроцилиндра и стрелы, рад; φ – угол подъема стрелы, рад; $A_{\text{др}}$ – площадь отверстия дросселя, м²; μ – коэффициент расхода; Δp – перепад давления на дросселе, Па; ρ – плотность рабочей жидкости, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; a_y – коэффициент утечек в гидросистеме, $\frac{\text{м}^3}{\text{Па·с}}$; K_p – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, $\frac{\text{м}^5}{\text{Н}}$.

Уравнение движения поршня в корпусе демпфера, представляет собой силу инерции поршня, в правой части уравнения. А в левой – движущую силу поршня под воздействием давления рабочей жидкости и отрицательные силы сопротивления от противодействия дросселя, силы взаимодействия между одноименными полюсами подвижного магнитного поршня и неподвижной перегородки, и силы вязкого трения при перемещении магнитного поршня:

$$m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} = p A_{\text{п}} - \frac{B_r^2 A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{(x_d + L)^2} - \frac{1}{x_d^2} \right) - k_d \frac{dx_d}{dt} \quad (3)$$

где m_d – масса плунжера демпфера, кг; p – давление рабочей жидкости, Па; $A_{\text{п}} = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4}$ – площадь поршня демпфера, м²; B_r – остаточная индукция магнита, Тл; A – площадь торца магнита, м²; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$; x_d – текущее расстояние между

магнитами (ход поршня), м; L — длина магнита, м; k_d — коэффициент вязкого трения подвижного поршня демпфера, $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}}$.

Для составления дифференциального уравнения (3) используется теория приближённого метода оценки силы взаимодействия между двумя соосными цилиндрическими магнитами основывается на анализе их магнитного поля и магнитной энергии [2]. Основная идея заключается в том, что два магнита взаимодействуют за счёт градиента магнитного поля и стремятся уменьшить свою потенциальную энергию [3].

В вакууме плотность энергии магнитного поля определяется как:

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4)$$

Цилиндрические магниты с поперечным сечением A обладают общей энергией магнитного поля (4) в некотором объёме V :

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot V, \text{ где } V = A \cdot l \quad (5)$$

Взаимодействие магнитов связано с изменением энергии системы в зависимости от расстояния между ними. Основной закон механики гласит, что сила связана с градиентом потенциальной энергии:

$$F = -\frac{dW}{dx} \quad (6)$$

Данная сила означает то, что, если магниты приближаются или удаляются друг от друга, их потенциальная энергия (5) изменяется, а возникающая сила пропорциональна скорости этого изменения [4]. Применительно к магнитному демпферу рассматривается случай двух цилиндрических магнита длиной L и диаметром D , расположенных соосно с расстоянием r между ними. Их взаимодействие можно описать через изменение энергии магнитного поля. Полная энергия взаимодействия будет определяться:

$$W = \frac{B_r A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+L} \right) \quad (7)$$

Найти силу (6) можно продифференцировав энергию W (7) по расстоянию r :

$$F = -\frac{dW}{dx} = \frac{d}{dx} \left\{ -\frac{B_r A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+L} \right) \right\} = \frac{B_r^2 A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{(r+L)^2} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (8)$$

Параметр r в формуле (8) обозначим как x_d так как расстояние между магнитами будет являться ходом магнитного плунжера. Данная формула представлена в соотношении (3), которое определяет силу отталкивания одноименных магнитов:

$$F = \frac{B_r^2 A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{(x_d+L)^2} - \frac{1}{x_d^2} \right) \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает силу отталкивания двух однополярных магнитов, размещенных друг против друга. Основой для этого выражения является закон взаимодействия магнитных полей [5] и их зависимость от расстояния между магнитами. Если x_d уменьшается, то $\frac{1}{x_d^2}$ растёт, разность в скобках увеличивается из-за чего сила возрастает.

Если же x_d увеличивается, то $\frac{1}{x_d^2}$ уменьшается, и сила ослабевает. Таким образом, при сближении магнитов сила отталкивания резко увеличивается, что предотвращает полный контакт магнитов и обеспечивает демпфирующий эффект.

Применительно к гидравлическому демпферу лесного манипулятора, представленная формула описывает противодействие движению поршня, вызванное магнитным отталкиванием. Чем ближе поршень к неподвижному магниту, тем большее усилие требуется для его дальнейшего перемещения. Также это уравнение объясняет стабилизацию движения поршня: при падении давления жидкости, поршень под действием магнитной силы отходит назад, вытесняя жидкость в магистраль.

С применением среды программирования MATLAB были получены графики изменения угла поворота стрелы, давления и перемещения магнитного поршня демпфера от времени (рис. 3).

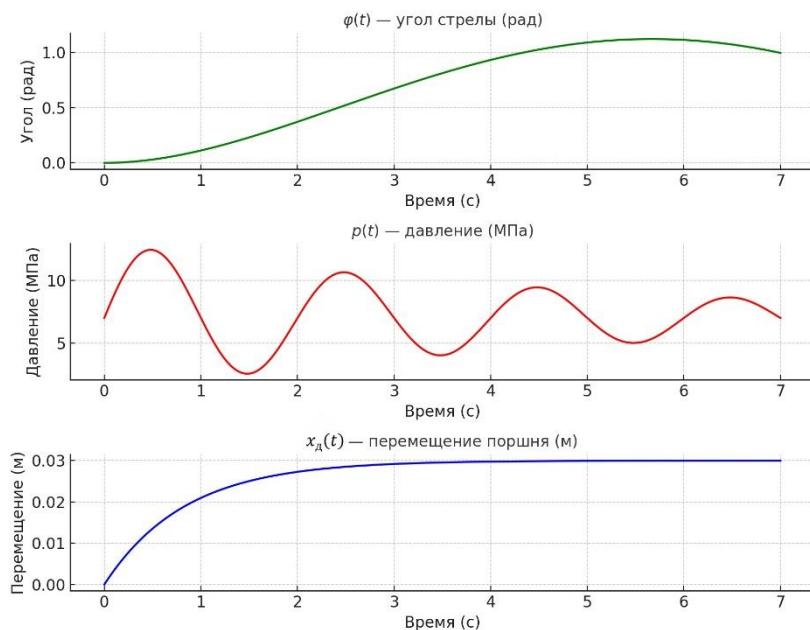


Рисунок 3 – График зависимости угла подъёма стрелы φ от времени t ; график зависимости давления в напорном трубопроводе p от времени t ; график зависимости хода плунжера демпфера x_d от времени t

На первом графике показано, как угол подъёма стрелы $\varphi(t)$ возрастает от 0 до примерно 1.3 радиан за 6–7 секунд, достигая пика и затем плавно снижается. Это поведение соответствует реальным условиям работы лесного манипулятора: подъём стрелы осуществляется под действием давления рабочей жидкости в гидроцилиндре, после чего начинается стабилизация под действием внешних и демпфирующих сил, включая сопротивление от магнитного демпфера.

Второй график отражает характер колебаний давления в гидросистеме. Амплитуда колебаний уменьшается с течением времени, что объясняется действием магнитного демпфера. Он создаёт отталкивающую силу между одноимёнными полюсами магнитов, которая эффективно гасит резкие всплески давления, перераспределяя энергию в системе и стабилизируя её работу.

На третьем графике показано, как перемещение магнитного поршня $x_d(t)$ увеличивается от 0 до 0.03 м (3 см), а затем выходит на установившийся уровень. Экспоненциальная форма кривой обусловлена работой магнитного демпфера: при резком

росте давления подвижный магнитный поршень сталкивается с увеличивающимся сопротивлением со стороны неподвижной магнитной перегородки с одноимённым полюсом. Это создаёт отталкивающую силу, предотвращающую дальнейшее движение и тем самым обеспечивает стабилизацию – ключевой эффект демпфирования.

Использование данной модели позволяет оптимизировать конструкцию магнитного демпфера, выбирая соответствующие параметры магнитов, оценивать динамику работы устройства и определять граничные условия для управления его работой, а также повышать эффективность демпфирования в гидравлических системах манипуляторов.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ВГЛТУ, выделенного в 2025 г. на проект «Выявление закономерностей режимов работы магнитного демпфирующего устройства гидропривода лесного манипулятора»; руководитель – преподаватель СПО, аспирант Полумиско А.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 230802 U1 Российская Федерация, МПК B66C 13/42. Гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством: № 2024127518 : заявл. 18.09.2024 : опубл. 19.12.2024 / А.А. Сидоров, П.И. Попиков, Е.В. Поздняков, И.Д. Евсиков, А.А. Полумиско, П.А. Путятин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

2. Буряк, А.А. Исследование процесса самостабилизации вертикальных колебаний в системе электродинамической левитации / А.А. Буряк, В.А. Дзензерский, Э.А. Зельдина // Вестник Днепропетровского университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2006. – С. 152–154.

3. Ячиков, И.М. Определение динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле / И.М. Ячиков, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 111–122. – DOI: 10.14529/ctcr200312.

4. Саранин, В.А. Экспериментальное исследование движения магнитного диполя по проводящей поверхности / В.А. Саранин // Вестник Пермского университета. Физика. – 2017. – № 3 (37). – С. 48-53. – DOI: 10.17072/1994-3598-2017-3-48-53.

5. Исмагилов, Ф.Р. Электромагнитные процессы в электромеханических демпфирующих элементах / Ф.Р. Исмагилов, Р.Р. Саттаров // Электричество. – 2008. – №10. – С. 47–52.

REFERENCES

1. Patent No. 230802 U1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Hydraulic drive of the boom lifting mechanism of a forestry manipulator with a magnetic damping device: No. 2024127518: declared 18.09.2024: published 19.12.2024 / A.A. Sidorov, P.I. Popikov, E.V. Pozdnyakov, I.D. Evsikov, A.A. Polumisko, P.A. Putyatin; applicant Federal State Budgetary Educational

Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov".

2. Buryak, A.A. Study of the process of self-stabilization of vertical oscillations in the electrodynamic levitation system / A.A. Buryak, V.A. Dzenzersky, E.A. Zeldina // Bulletin of the Dnepropetrovsk University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. – Dnepropetrovsk, 2006. – P. 152-154.

3. Yachikov, I.M. Determination of dynamic parameters of a permanent magnet when it is held in a pulsed magnetic field / I.M. Yachikov, V.I. Shiryayev // Bulletin of SUSU. Series "Computer technologies, control, radio electronics". – 2020. – Vol. 20, No. 3. – P. 111-122. – DOI: 10.14529/ctcr200312.

4. Saranin, V.A. Experimental study of the motion of a magnetic dipole along a conducting surface / V.A. Saranin // Bulletin of Perm University. Physics. – 2017. – No. 3 (37). – P. 48-53. – DOI: 10.17072/1994-3598-2017-3-48-53.

5. Ismagilov, F.R. Electromagnetic processes in electromechanical damping elements / F.R. Ismagilov, R.R. Sattarov // Electricity. – 2008. – No. 10. – P. 47–52.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ

ANALYSIS OF METHODS FOR MEASURING INTERNAL STRESSES IN WOOD

Хворых А.М., аспирант, преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия
Khvorykh A.M., Postgraduate student, College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы измерения внутренних (остаточных) напряжений в древесине. Представлена классификация методов на разрушающие и неразрушающие, описан их принцип действия, преимущества и ограничения. Особое внимание уделяется применению ультразвуковых, рентгеновских и оптических технологий. Выполнен сравнительный анализ методов по точности, доступности и применимости к различным видам древесины. Отмечены перспективные направления развития методик контроля внутренних напряжений в древесных материалах.

Ключевые слова: внутренняя напряжённость древесины, остаточные напряжения, методы измерения, анизотропия, неразрушающие испытания, механические свойства древесины.

Abstract. This paper reviews current methods for measuring internal (residual) stresses in wood. The methods are classified into destructive and non-destructive categories, with descriptions of their operating principles, advantages, and limitations. Special attention is given to ultrasonic, X-ray, and optical techniques. A comparative analysis is presented regarding the accuracy, accessibility, and applicability of each method to different types of wood. Promising directions for the development of stress measurement techniques in wooden materials are also highlighted.

Keywords: internal stresses in wood, residual stresses, measurement methods, anisotropy, non-destructive testing, mechanical properties of wood.

Внутренние (остаточные) напряжения в древесине возникают и накапливаются на различных стадиях жизненного цикла материала [1]. На этапе роста деревьев неоднородность биологических процессов проявляется в переменной толщине и плотности годовичных колец: ранние кольца, образованные весенним ростом клеток, имеют более низкую плотность и большую пористость, в то время как поздние кольца, образовавшиеся в конце сезона, отличаются повышенным содержанием плотных слоев целлюлозы и лигнина. Такая неоднородность ведёт к возникновению начальных полей напряжений в ядре и заболони: разница в объёме клеток и скорости роста создаёт напряжения смятия и растяжения, сосредотачивающиеся в зонах перехода между кольцами. При спиле ствола и формировании круглого бревна концентрические напряжения перераспределяются в ответ на изменение

формы и сечения заготовки. Геометрические дефекты, такие как сучки, места почечных рубцов и изменения кривизны волокон, нарушают симметрию поля, что приводит к локальным концентрациям напряжений. Эти макроструктурные напряжения могут быть оценены по величине упругих деформаций, возникающих при освобождении материала от окружающих его слоёв. В технологических процессах, особенно в сушке древесины, анизотропия клеточной структуры приобретает ключевое значение. Под действием тепла и пониженной влажности ранние слои усыхают быстрее, чем поздние, что формирует радиальный градиент усушки до 2-4 % [2, 3]. В результате внутренние напряжения могут достигать порядка нескольких МПа, что при превышении локальной прочности вызывает образование микротрещин и «внутренних расколов» [4]. Эти дефекты часто скрыты в глубине бруса и становятся заметными лишь при дополнительной обработке или эксплуатации, что критично для ответственных конструкций [5]. Микроструктурные причины напряжений связаны с неравномерным распределением упругих характеристик составляющих клеточных стенок: связующие вещества (лигнин, гемицеллюлозы) обладают более низкой упругостью по сравнению с целлюлозными микрофибриллами. При изменении влажности сначала происходит упругое «сжатие» полимерной матрицы, а затем более жесткие целлюлозные фибриллы ограничивают деформацию, создавая сложные локальные поля растяжения и сжатия. Это взаимодействие неоднородных фаз древесины приводит к формированию как объёмных, так и поверхностных напряжений, которые определяют последующую реакцию образца на механические воздействия и условия эксплуатации.

Разрушающие методы измерения внутренних напряжений основаны на локальном освобождении напряжённого состояния и регистрации возникающих при этом деформаций [3]. Так, метод расщепления предполагает вырезание в образце двузубой прорези глубиной 20-30 мм и дальнейшее удаление центрального сегмента: после этого зубцы слегка раздвигаются, и по величине их симметричного раскрытия Δu [6, 7], измеренного микрометром или оптическим датчиком, оценивают напряжение по формуле:

$$\sigma_r = \frac{E}{2L} \Delta u, \quad (1)$$

где E – модуль упругости древесины, L – длина зубца.

При сверльном методе на поверхность образца наклеивают тензодатчики «моста Уитстона», сверлят отверстие диаметром 2-3 мм и по изменению деформации $\Delta \varepsilon$ в датчиках рассчитывают напряжение через

$$\sigma_r = k \Delta \varepsilon, \quad (2)$$

где k – калибровочный коэффициент, учитывающий геометрию зоны сверления. Если сверление повторить на нескольких глубинах (обычно с шагом 2-5 мм), то по зависимости $\Delta \varepsilon(h)$ строят подробный профиль $\sigma_r(h)$ вдоль радиуса.

Ещё один распространённый приём – послойное шлифование, когда шлифовальным кругом снимают слой древесины толщиной 0,5-1 мм и измеряют изгиб балочного образца или прогиб $w(t)$ оставшейся части; среднее напряжение $\sigma(t)$ при этом вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{mean}}(t) = \frac{E w(t)}{6t}, \quad (3)$$

где t – толщина образца после каждого шага. Ключевым условием точности всех разрушающих методов является строгое соблюдение геометрии заготовки и стабильный уровень влажности (изменения не более 1 %) [8] – иначе объёмная усушка или колебания влажности приведут к систематическим погрешностям. Погрешность данных техник составляет в среднем 5-10 %, а основной ограничивающий фактор – невозможность повторного использования образца после измерений.

Неразрушающие методы измерения внутренних напряжений в древесине позволяют сохранить образец и многократно проводить испытания. Так, в ультразвуковой диагностике [4] два пьезоэлектрических преобразователя (передатчик и приёмник) устанавливают на расстоянии d друг от друга, генерируют импульс с частотой ~ 100 кГц [9] и измеряют время пролёта t_p , по которому рассчитывают скорость волны

$$v = \frac{d}{t_p}, \quad (4)$$

а изменение полей напряжений выявляют по затуханию

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A}, \quad (5)$$

и по относительному изменению скорости $\Delta v/v_0 \propto \sigma_r/E$.

Оптическая спекл-интерферометрия (ESPI) основывается на анализе фазового сдвига между опорным и измерительным лучами лазера ($\lambda \approx 532$ нм) по четырёхкадровой схеме.

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}, \quad u(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\phi(x, y)}{\cos \theta}, \quad (6)$$

где $I_1 - I_4$ – интенсивности кадров; θ – угол падения. ESPI чувствительна к микроперемещениям (до десятков нанометров) [10] и требует полированной поверхности и виброизоляции.

Фотоэластические методы используют полимерный шлиф, проявляющий двойное лучепреломление; по числу интерференционных полос N определяют разность главных напряжений

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N f_\sigma}{t}, \quad (7)$$

где f_σ – фотоэластичный коэффициент; t – толщина слоя. Точность – около 5-7 %.

В рентгеноструктурном анализе коллимированный рентген или синхротронный пучок ($\lambda \approx 0,1 - 0,2$ Å) даёт дифракционные пики, смещение которых позволяет вычислить межплоскостное расстояние d по закону Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (8)$$

а упругую деформацию и напряжение по формулам:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0}, \quad \sigma = E\varepsilon. \quad (9)$$

Этот метод обеспечивает наивысшую точность (2-3 %) и даёт возможность микроуровневого анализа структуры, но требует сложного оборудования и подготовки образцов.

Во всех неразрушающих техниках критическими являются стабильность влажности (± 1 %), тщательная полировка поверхности ($Ra \leq 0,5$ мкм для ESPI и ≤ 5 мкм для ультразвука)

и квалификация оператора, что вместе с портативностью оборудования определяет их применимость – от полевых замеров ультразвуком до лабораторных исследований ESPI и рентгеноструктурного анализа.

Сравнение описанных методов измерения внутренних напряжений в древесине по нескольким критериям представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение параметров различных методов измерения внутренних напряжений в древесине

Критерий	Разрушающие	Ультразвук и фотоэластика	ESPI	Рентген
Точность	5-10 %	8-12 %	≈ 5 %	2-3 %
Сохранность образца	Полное разрушение, 1 измерение	Неразрушающие, многократные	Неразрушающие, многократные	Неразрушающие, многократные
Экономика	20-30 тыс. руб. (сверла + датчики)	100-150 тыс. руб.	от 500 тыс. руб.	миллионы руб.
Применимость	Универсальны, разрушают образец	Требуют полированной поверхности, квалификации оператора	Требуют полированной поверхности, лабораторные условия	Требуют полированной поверхности, лабораторные условия

Сравнительный анализ показывает, что по точности измерений наивысшие результаты даёт рентгеноструктурный анализ (погрешность 2-3 %), за ним следует оптическая спекл-интерферометрия ESPI (около 5 %), тогда как ультразвуковые и фотоэластические методы обеспечивают точность в диапазоне 8-12 %. Разрушающие методы остаются достаточно точными (5-10 %), но при этом образец теряет возможность многократного использования.

Неразрушающие методы (ультразвук, ESPI, фотоэластика и рентген) позволяют проводить повторные измерения без серьёзных повреждений материала, однако требуют более тщательной подготовки образцов (полированная поверхность, стабильная влажность) и высокой квалификации оператора. Чисто лабораторными (по условиям применения) методами являются ESPI и рентгеноструктурный анализ, тогда как ультразвуковые и фотоэластические технологии при наличии портативного оборудования могут использоваться и в полевых, и в производственных условиях.

С точки зрения затрат, самые доступные решения – это наборы сверл и тензодатчиков для разрушающих методов (примерно 20-30 тыс. рублей). Ультразвуковые и фотоэластические станции требуют уже 100-150 тыс. рублей, а портативные ESPI-системы стоят от 500 тыс. рублей. Наибольшие капитальные вложения требуют рентгеноструктурные комплексы – стоимость оборудования измеряется миллионами рублей.

Таким образом, выбор метода измерения внутренних напряжений в древесине определяется компромиссом между требуемой точностью, сохранностью образца, условиями применения и бюджетом. Для оперативного контроля на производстве подойдут ультразвук

или фотоэластика, в лабораторных исследованиях при жёстких требованиях к точности предпочтительнее ESPI или рентген, а разрушающие методы остаются универсальным и относительно недорогим решением для одноразовых испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tree Growth Stress and Related Problems / J. Gril, D. Jullien, S. Bardet, H. Yamamoto // *Journal of Wood Science*. – 2017. – Vol. 63, No. 5. – P. 411-432. – DOI: 10.1007/s10086-017-1639-y.
2. Уголев, Б.Н. Деформационные свойства древесины и напряжения при сушке / Б.Н. Уголев. – Москва: Лесная промышленность, 1971. – 176 с.
3. Evaluation of moisture-induced stresses in wood cross-sections determined with a time-dependent, plastic material model during long-time exposure / S. Pech, M. Autengruber, M. Lukacevic, R. Lackner, J. Füssl // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 4. – Art. No. 937. – DOI: 10.3390/buildings14040937.
4. Simpson, W.T. Dry Kiln Operator's Manual / W.T. Simpson. – Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. – 274 p.
5. Yin, Q. Drying stress and strain of wood: a review / Q. Yin, H.-H. Liu // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – Frt. No. 5023. – DOI: 10.3390/app11115023.
6. Determination of residual stress in bonded wood components / M. Scheffler, T. Weber, P. Niemz, H.-J. Hardtke // *Holzforschung*. – 2007. – Vol. 61, No. 3. – P. 285-290. – DOI: 10.1515/HF.2007.065.
7. Unique characteristics of residual stress distribution of large-diameter keyaki (*Zelkova serrata*) logs and examination of their measurement method / M. Matsuo-Ueda, H. Yamamoto [et al.] // *Journal of Wood Science*. – 2023. – Vol. 69, Art. No. 16. – DOI: 10.1186/s10086-023-02088-z.
8. Кондратьев, Ю.Н. Влияние кондиционирующей обработки на внутренние остаточные напряжения в высушенных пиломатериалах / Ю.Н. Кондратьев // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 1974. – № 1. – С. 83–84.
9. Ross, R.J. Nondestructive Evaluation of Wood: Second Edition / R.J. Ross. – Madison : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR-238, 2015. – 176 p.
10. Bucur, V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood / V. Bucur. – Berlin : Springer, 2003. – 368 p.

REFERENCES

1. Tree Growth Stress and Related Problems / J. Gril, D. Jullien, S. Bardet, H. Yamamoto // *Journal of Wood Science*. – 2017. – Vol. 63, No. 5. – P. 411-432. – DOI: 10.1007/s10086-017-1639-y.
2. Ugolev, B.N. Deformation properties of wood and stress during drying / B.N. Ugolev. – Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1971. – 176 p.
3. Evaluation of moisture-induced stresses in wood cross-sections determined with a time-dependent, plastic material model during long-time exposure / S. Pech, M. Autengruber, M. Lukacevic, R. Lackner, J. Füssl // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 4. – Art. No. 937. – DOI: 10.3390/buildings14040937.

4. Simpson, W.T. Dry Kiln Operator's Manual / W.T. Simpson. – Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. – 274 p.
5. Yin, Q. Drying stress and strain of wood: a review / Q. Yin, H.-H. Liu // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – Frt. No. 5023. – DOI: 10.3390/app11115023.
6. Determination of residual stress in bonded wood components / M. Scheffler, T. Weber, P. Niemz, H.-J. Hardtke // Holzforschung. – 2007. – Vol. 61, No. 3. – P. 285-290. – DOI: 10.1515/HF.2007.065.
7. Unique characteristics of residual stress distribution of large-diameter keyaki (*Zelkova serrata*) logs and examination of their measurement method / M. Matsuo-Ueda, H. Yamamoto [et al.] // Journal of Wood Science. – 2023. – Vol. 69, Art. No. 16. – DOI: 10.1186/s10086-023-02088-z.
8. Kondratiev, Yu.N. Effect of conditioning treatment on internal residual stresses in dried lumber / Yu.N. Kondratiev // News of higher educational institutions. Forestry magazine. – 1974. – No. 1. – P. 83-84.
9. Ross, R.J. Nondestructive Evaluation of Wood: Second Edition / R.J. Ross. – Madison : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR-238, 2015. – 176 p.
10. Bucur, V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood / V. Bucur. – Berlin : Springer, 2003. – 368 p.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**ENSURING FOREST FIRES MONITORING**

Рыжков В.В., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

Ryzhkov V.V., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Кожевников А.Е., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

Kozhevnikov A.E., Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Кольцова А.В., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

Koltsova A.V., Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Аннотация. Рассматривается проблема мониторинга природных пожаров. Обсуждается использование возможностей дистанционного зондирования земли, аэросъемки и беспилотных летательных аппаратов. Дается оценка целесообразности привлечения беспилотных аппаратов разного класса для решения стратегических и тактических задач. Рекомендуются к применению серийные беспилотные средства, прошедшие проверку в подразделениях Министерства обороны РФ. Представлены примеры успешного использования тяжелых беспилотников вертолетного типа для тушения очагов возгорания.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, аэросъемка, беспилотные летательные аппараты, тепловизионная съемка, тушение пожаров.

Annotation. The problem of monitoring natural fires is considered. The use of the possibilities of remote sensing of the earth, aerial photography and unmanned aerial vehicles is discussed. An assessment is made of the feasibility of using unmanned vehicles of various classes to solve strategic and tactical problems. Serial unmanned aerial vehicles that have been tested by units of the Russian Ministry of Defense are recommended for use. Examples of the successful use of heavy helicopter-type drones to extinguish fires are presented.

Keywords: remote sensing of the earth, aerial photography, unmanned aerial vehicles, thermal imaging, fire fighting.

Борьба с лесными и ландшафтными пожарами на сегодняшний день – одна из главных проблем в лесном хозяйстве Российской Федерации. Анализ данных последнего десятилетия указывает на необходимость модернизации методов контроля и предотвращения лесных возгораний в стране, а также увеличения ресурсов. Число возгораний продолжает расти. Одной из ключевых причин этого является глобальное потепление, которое охватывает всю Землю. В экваториальных зонах повышение температуры идет постепенно, тогда как в областях умеренного климата оно ускоряется вдвое, а в полярных районах – втрое. Российский

регион относится к последним [1]. Это подтверждается данными о суммарных площадях пожаров (Табл. 1) [2]. За пять последних лет выгорело более 2 % российской территории.

Таблица 1 – Суммарные площади лесных пожаров в России [2]

Год	2010	2020	2021	2022	2023	2024
Площадь (млн. га.)	3,0	9,1	10,0	3,4	4,6	13,7

В настоящее время для контроля лесных пожаров активно привлекается спутниковая система дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Использование мультиспектрального радиометра среднего класса (MODIS) на космических аппаратах НАСА Terra и Aqua обеспечивает получение изображений с детализацией от 250 до 500 метров на пиксель, охватывающих диапазон волн от 3,660 до 14,385 мкм, а ширина полосы захвата составляет 2300 км. При этом повторяемость съемки одной территории 4 раза в сутки, а производительность съемочной аппаратуры достигает до 700 тыс. км² в сутки [3].

Мировое сообщество информируется о результатах мониторинга через пять платформ: НАСА, ЕКА, Global Forest Watch, Global Wildfire Information System (GWIS) и Global Fire Monitoring Center (GFMC), которые предоставляют данные о пожарах по всему миру. Информация становится доступной в течение 2-10 дней. Каждый месяц НАСА публикует карты, на которых отображены зоны активных пожаров.

В России функционирует информационная система дистанционного мониторинга (ИСДМ) лесных пожаров, разработанная Рослесхозом. Она получает данные от систем ДЗЗ с пространственным разрешением от 250 до 1000 м в тепловом инфракрасном диапазоне со спутников Terra, Aqua, Noaa, Suomi NPP и Метеор М [4]. При облачности не более 15 % в зоне пожара спутниковый мониторинг позволяет надежно выявлять природные пожары на площади не менее 10 га.

Помимо ИСДМ-Рослесхоз в России также применяются глобальные системы дистанционного мониторинга пожаров FIRMS и EFFIS. Полученные ежедневно данные регулярно передаются в российские пожарные службы. ИСДМ располагает авиационными средствами (подразделениями «Авиалесоохраны») для уточнения информации, полученной от ДЗЗ, а также для наблюдения и ликвидации пожаров [5].

В авиационном патрулировании лесов России ежегодно участвует более 300 воздушных судов, что приводит к значительным затратам из-за высокой стоимости летного часа. Например, стоимость часа полета самолета Ан-2 составляет от 40 тысяч рублей. Однако этот тип летательного аппарата давно не производится, и ежегодно десятки таких самолетов выводятся из эксплуатации. В связи с этим лесоохранные организации часто заменяют Ан-2 модификациями вертолета Ми-8, стоимость полета которого превышает 130 тысяч рублей за час. В будущем планируется использование легкого многоцелевого самолета «Байкал» (ЛМС-901). В 2022 году были проведены первые испытательные полеты и к 2030 году планируется ввести в эксплуатацию 154 единицы. Их технические характеристики значительно

превосходят характеристики Ан-2, а стоимость летного часа составит около 60 тысяч рублей [1].

Для мониторинга возникновения и распространения пожаров применяются различные методы. Обнаружение пожаров основано на выявлении повышения локальной температуры и яркости на местности. Пожары можно обнаружить на спутниковых снимках благодаря градиенту температур между земной поверхностью и очагом пожара, что приводит к увеличению теплового излучения. Визуальное выявление пожара осуществляется по наличию дымового шлейфа от очага горения.

Авиационные съемки с борта самолета или вертолета обладают явными преимуществами по сравнению с космическими, так как пользователь может самостоятельно выбирать время полетов, направление маршрутов и оценивать погодные условия. Такие съемки характеризуются более высоким пространственным разрешением, оперативностью, высокой мобильностью в выборе объекта и параметров съемки, а также отсутствием влияния облаков при съемке в условиях облачности. Однако возможности классической авиации имеют свои ограничения: в зонах сильной задымленности ее применение становится неэффективным. Одним из решений этой проблемы является использование беспилотных авиационных систем (БПАС) [6].

Применение беспилотников для мониторинга природных пожаров представляет собой альтернативу авиационной разведке. Кроме того, совокупность технических характеристик БПАС позволяет использовать их в чрезвычайных ситуациях, когда полеты пилотируемых летательных аппаратов неэффективны или невозможны, при этом эксплуатация беспилотных воздушных судов оказывается более экономичной.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) оправдано при выявлении очагов возгорания, контроле за распространением огня, координации действий при тушении пожаров и в процессе оперативного тушения. Использование БПЛА позволяет минимизировать риски для здоровья и жизни членов экипажей самолетов и вертолетов, задействованных в мониторинге и локализации пожаров.

Можно выделить несколько задач, которые успешно решаются с помощью БПАС:

Стратегические задачи: Выявление очагов возгорания на труднодоступных и малонаселенных территориях, оперативная оценка масштабов бедствия и своевременное оповещение соответствующих служб. Оперативное тушение небольших очагов помогает предотвратить значительные экономические потери, так как потушить верховой лесной пожар современными средствами практически невозможно. При этом мониторинг с использованием беспилотных средств, обладающих длительным временем полета, оказывается значительно дешевле космического мониторинга.

Тактические задачи: Информационная поддержка оперативных штабов по тушению крупных лесных пожаров, включая работу в сложных и чрезвычайных условиях. Это включает обеспечение высокого уровня мониторинга распространения лесных пожаров даже в неблагоприятных погодных условиях (например, при сильном задымлении); передачу видеоинформации непосредственно в оперативный штаб на расстояние до 50 км; ретрансляцию сигналов УКВ-связи и передачу цифровых пакетов информации между командами тушения и оперативным штабом для повышения качества управления силами

тушения. БПЛА могут использоваться для наведения наземных команд на малые площади пожара или проблемные участки кромки пожара в условиях пересеченного рельефа, а также для мониторинга изменения обстановки на пожаре и поддержки наземного патрулирования.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно развиваются и на рынок поступает широкий ассортимент таких устройств [7].

Выделяют следующие классы беспилотных летательных аппаратов, соответствующие категориям А, В и С [8]:

- малый класс: аппараты с массой до 50 кг, время их пребывания в воздухе достигает 5 часов (Рис. 1);

- средний класс: беспилотные летательные аппараты весом до 1 тонны, рассчитанные на полет до 15 часов;

- тяжелые беспилотные аппараты: устройства с большой продолжительностью полета.

Конструктивно БПЛА можно разделить на три типа: самолеты, вертолеты и мультикоптеры (с количеством винтов 3 и более).

Для мониторинга и контроля удаленных и труднодоступных местностей целесообразно использовать беспилотные аппараты самолетного типа, которые соответствуют требованиям по дальности, простоте в изготовлении и удобству в эксплуатации.



Рисунок 1 – Беспилотный летательный аппарат для мониторинга лесного хозяйства

Беспилотные аппараты вертолетного типа и мультикоптеры обладают рядом преимуществ по сравнению с самолетами: они могут зависать на одном месте и проводить детальный осмотр выбранного объекта с близкого расстояния. Однако их использование ограничено мониторингом и контролем зон на небольшом и среднем расстоянии (до 15 км).

Мониторинг с помощью БПЛА представляет собой процесс периодического или непрерывного сбора информации о характеристиках и параметрах объекта разведки для определения тенденций изменения его состояния. В зависимости от поставленных задач на беспилотный летательный аппарат может устанавливаться различное оборудование: навигационные системы, приборы радиационной или химической разведки, видеокамеры, газоанализаторы, радиолокационные станции и радиоаппаратура для использования в качестве ретранслятора связи при тушении пожаров.

Для мониторинга зон с высоким уровнем задымления, работы в условиях плохой видимости и в темное время суток БПЛА оснащаются инфракрасными камерами. Для надежного определения очагов горения на фото и видеоизображениях, получаемых с борта БПЛА, разработаны специальные методики распознавания, которые используют, в том числе, методы искусственного интеллекта [9].

Высокая автономность и длительность полета беспилотных летательных аппаратов достигаются только при высокой экономичности полета, что предъявляет повышенные требования к эффективности двигателей. В последние годы научные разработки сосредоточены на поиске более экономичных видов топлива. Интерес представляет использование солнечных батарей в высотных БПЛА в качестве дополнительного источника электрической энергии. Учитывая тенденцию к уменьшению удельного веса аккумуляторов для питания в ночное время, можно ожидать дальнейшего развития возобновляемой энергетики в беспилотных системах [10].

Надежность и хорошие эксплуатационные характеристики БПЛА являются необходимыми условиями для эффективного использования БПАС. Эти качества, как правило, присутствуют только у серийно выпускаемых аппаратов. Поэтому для мониторинга целесообразно использовать машины, которые зарекомендовали себя в структурах Министерства обороны, обладающего большим опытом эксплуатации БПЛА. Для решения тактических задач подойдут аппараты «Орлан-10», «Элерон-3» и «Застава». Для стратегических задач рекомендуется использовать аппарат большой продолжительности полета «Орион-Э» (Рис. 2) [7].



Рисунок 2 – БПЛА большой продолжительности полета

Опытная эксплуатация показала, что тяжелые БПЛА могут быть эффективно использованы для тушения пожаров в качестве альтернативы пилотируемой авиации. Наибольших успехов в этой области достигли вертолетные БПАС. Например, китайский беспилотник вертолетного типа JC260, оснащенный двумя «пожарными бомбами», способен сбрасывать их поочередно или одновременно. Каждая «бомба» охватывает участок горящего леса объемом до 50 м³. Технические характеристики аппарата включают крейсерскую скорость 100 км/ч, а одной заправки хватает на 3-4 часа полета при массе аппарата 260 кг.

Другим примером является беспилотный вертолет K-MAX, разработанный в сотрудничестве компаний Lockheed Martin и Kaman. В ходе испытаний он сбросил более 24 тысяч фунтов воды на очаг возгорания (Рис. 3) [11]. Для выявления очагов возгорания использовался квадрокоптер Indago, данные с которого позволили оператору беспилотного вертолета K-MAX точно определить точку сброса. По оценкам американских экспертов интеграция технологий и взаимодействие аппаратов различных классов вдвое сокращает время подавления пожара, что позволяет оперативно реагировать на ситуацию [12]. В России аналогичные испытания успешно прошел БПЛА вертолетного типа «Ворон-700» [13].



Рисунок 3 – Примеры беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа предназначенных для тушения пожаров

Таким образом, благодаря развитию технических средств оснащения, БПЛА позволяют облегчить решение многих задач мониторинга и оперативной поддержки тушения лесных пожаров. При этом использование беспилотных летательных аппаратов более дешево, оперативно и безопасно по сравнению с привлечением средств пилотируемой авиации и с системами ДЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FORESTCOMPLEX.RU. – URL: <https://forestcomplex.ru/rf-protection/krupnye-lesnye-rozhary-v-rossii-za-pyat-let/> (дата обращения 25.03.2025).
2. Федеральное агентство лесного хозяйства. – URL: <http://rosleshoz.gov.ru/> (дата обращения 25.03.2025).
3. Шинкаренко, С.С. Перспективы спутникового мониторинга состояния степных и пустынных ландшафтов / С.С. Шинкаренко, С.А. Барталев // Степи Северной Евразии: материалы X международного симпозиума (Международного степного форума), Оренбург, 27 мая-02 июня 2024 года. – Оренбург: Институт степи УрО РАН Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН, 2024. – С. 1513-1517. – DOI 10.24412/cl-37200-2024-1513-1517.

4. Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз / Р.В. Котельников, Е.А. Лупян, С.А. Барталев, Д.В. Ершов // Лесоведение. – 2019. – № 5. – С. 399-409. – DOI 10.1134/S0024114819050048.
5. Оценка пространственной точности картографирования гарей и динамика пройденной огнём площади на территории России по данным глобальных продуктов ДЗЗ / А.М. Матвеев, С.А. Барталев, В.А. Егоров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 22-й Международной конференции, Москва, 11-15 ноября 2024 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2024. – С. 193. – DOI 10.21046/22DZZconf-2024a.
6. Поляхова, Н.М. Мониторинг природных пожаров с использованием беспилотных авиационных систем / Н.М. Поляхова, В.В. Рыжков, И.С. Попов // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы VI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях, Воронеж, 21-22 декабря 2020 года / Отв. редактор И.Г. Дроздов. Том Часть III. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2021. – С. 138-145.
7. Просвирина, Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов / Н.В. Просвирина // Московский экономический журнал. – 2021. – № 10. – С. 560-575. – DOI 10.24411/2413-046X-2021-10619.
8. ГОСТ Р 59517-2021 Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 мая 2021 г. № 472-ст: дата введения 2021-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 10 с.
9. Матюха, С.В. Искусственный интеллект в беспилотных авиационных системах / С.В. Матюха // Транспортное дело России. – 2022. – № 1. – С. 8-11. – DOI: 10.52375/20728689_2022_1_8.
10. Воронин, А.П. Солнечная энергия в авиации / А.П. Воронин, В.В. Рыжков, В.В. Самохвалов // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: материалы II Международной научно-практической конференции, Воронеж, 16-18 сентября 2020 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 231-232.
11. Воронин, А.П. Проблемы эксплуатации беспилотного вертолета / А.П. Воронин, В.В. Рыжков // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2021. – Т. 1. – С. 41-44.
12. Беспилотный вертолет-пожарный: уникальная разработка K-MAX Kaman. – URL: <https://texnomaniya.ru/bespilotniy-vertolet-pozharniy-unikalnaya-razrabotka-k-mah-Kaman> (дата обращения 25.03.2025).
13. Ворон 700. Технические характеристики. Фото. – URL: <https://avia.pro/blog/voron-700-tehnicheskie-harakteristiki-foto> (дата обращения 25.03.2025).

REFERENCES

1. FORESTCOMPLEX.RU. – URL: <https://forestcomplex.ru/rf-protection/krupnye-lesnye-pozhary-v-rossii-za-pyat-let/> (accessed 25.03.2025).

2. Federal Forestry Agency. – URL: <http://rosleshoz.gov.ru/> (accessed 25.03.2025).
3. Shinkarenko, S.S. Prospects for satellite monitoring of steppe and desert landscapes / S.S. Shinkarenko, S.A. Bartalev // Steppes of Northern Eurasia: materials of the X International Symposium (International Steppe Forum), Orenburg, May 27-June 02, 2024. – Orenburg: Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024. – P. 1513-1517. – DOI 10.24412/cl-37200-2024-1513-1517.
4. Space monitoring of forest fires: history of the creation and development of ISDM-Rosleskhoz / R.V. Kotelnikov, E.A. Lupyan, S.A. Bartalev, D.V. Ershov // Forestry. – 2019. – No. 5. – P. 399-409. – DOI 10.1134/S0024114819050048.
5. Assessment of the spatial accuracy of mapping burnt areas and the dynamics of the area traversed by fire on the territory of Russia according to global remote sensing products / A.M. Matveev, S.A. Bartalev, V.A. Egorov [et al.] // Modern problems of remote sensing of the Earth from space: materials of the 22nd International Conference, Moscow, November 11-15, 2024. – Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2024. – P. 193. – DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
6. Polyakhova, N.M. Monitoring of wildfires using unmanned aircraft systems / N.M. Polyakhova, V.V. Ryzhkov, I.S. Popov // Complex problems of technosphere safety: materials of the VI International Scientific and Practical Conference. In 3 parts, Voronezh, December 21-22, 2020 / Editor-in-chief I.G. Drozdov. Volume Part III. – Voronezh: Voronezh State Technical University, 2021. – P. 138-145.
7. Prosvirina, N.V. Analysis and prospects of development of unmanned aerial vehicles / N.V. Prosvirina // Moscow Economic Journal. – 2021. – No. 10. – P. 560-575. – DOI 10.24411/2413-046X-2021-10619.
8. GOST R 59517-2021 Unmanned aircraft systems. Classification and categorization: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated May 27, 2021 No. 472-st: date of introduction 2021-07-01. – Moscow: Standartinform, 2021. – 10 p.
9. Matyukha, S.V. Artificial intelligence in unmanned aircraft systems / S.V. Matyukha // Transport business of Russia. – 2022. – No. 1. – P. 8-11. – DOI 10.52375/20728689_2022_1_8.
10. Voronin, A.P. Solar energy in aviation / A.P. Voronin, V.V. Ryzhkov, V.V. Samokhvalov // Alternative and intelligent energy: materials of the II International Scientific and Practical Conference, Voronezh, September 16-18, 2020. – Voronezh: Voronezh State Technical University, 2020. – P. 231-232.
11. Voronin, A.P. Problems of operation of an unmanned helicopter / A.P. Voronin, V.V. Ryzhkov // Aerospace engineering, high technologies and innovations. – 2021. – Vol. 1. – P. 41-44.
12. Unmanned firefighting helicopter: a unique development of K-MAX Kaman. – URL: <https://texnomaniya.ru/bespilotniy-vertolet-pozharniy-unikalnaya-razrabotka-k-mah-Kaman> (accessed 25.03.2025).
13. Raven 700. Technical characteristics. Photo. – URL: <https://avia.pro/blog/voron-700-tehnicheskie-harakteristiki-foto> (accessed 25.03.2025).

МЕТОДИКА СВЧ-РАДИОМЕТРИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ METHODOLOGY OF MICROWAVE RADIOMETRY VEGETATION COVER

Моргачева В.С., студент 4 курса физического факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия
Morgacheva V.S., 4th year student at the Faculty of Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. Предложена упрощенная модель регистрации скорости роста растительного покрова на открытой местности, учитывающая особенности ее диэлектрической проницаемости и проводимости.

Ключевые слова: проводимость, тангенс угла потерь, S-параметры, диэлектрическая проницаемость, СВЧ-радиометрия.

Abstract. A simplified model for recording the growth rate of vegetation cover in an open area is proposed, taking into account the features of the dielectric constant and conductivity of the area.

Keywords: conductivity, loss angle tangent, S-parameters, dielectric permittivity; microwave radiometry.

Введение

Сверхвысокочастотная (СВЧ) радиометрия [1] является перспективным методом дистанционного зондирования растительных покровов. Этот метод основан на анализе объектов в микроволновом диапазоне, что дает возможность изучать влажность почвы, биомассу растений и скорость их роста [2].

Широко используемые методы радиометрии для оценки биомассы и влажности растительных покровов, в основном, либо вовсе не включают в расчеты высоту покрова, либо не оценивают скорость его роста, являющуюся важным показателем в сельском хозяйстве [2-5].

В данной работе предложена методика СВЧ-радиометрии для исследования растительного покрова, включающая упрощенную модель определения скорости его роста с учетом затухания сигнала из-за диэлектрических и проводящих свойств местности.

1. Электродинамическая модель растительных покровов

Растительные покровы представляют собой сложные гетерогенные среды, состоящие из множества элементов, таких как листья, ветки, стволы. Эти элементы обладают различными диэлектрическими свойствами, что делает задачу прямого электродинамического моделирования распространения радиоволн в таких средах крайне сложной. В работе предложен подход, основанный на упрощении представления до «смеси» двух материалов – воздуха и растительной среды.

Модель густого растительного покрова в виде сплошной двухкомпонентной среды «элементы растительности – воздух» [1] характеризуется диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon_{эфф} = \frac{\varepsilon_p(1+pu)+u(1-p)}{\varepsilon_p(1-p)+p+u}, \quad (1)$$

где $10 \leq u \leq 20$ – коэффициент, зависящий от формы элементов растительности; $\varepsilon_p = \varepsilon_v \rho_p$ – диэлектрическая проницаемость растительного покрова; ε_v – диэлектрическая проницаемость воды; ρ_p – объемное влагосодержание элемента растительности.

На диэлектрическую проницаемость растительных компонент влияют такие параметры как плотность заполнения растительностью единицы объема p , относительная объемная влажность ρ_p растительных элементов, количество воды G_B , содержащееся в растительном покрове высотой l_p на площади S [1]:

$$G_B = W_B S = p \rho_p l_p S d_v, \quad (2)$$

$$Q = p l_p d_v, \quad (3)$$

где d_v – удельный вес воды; Q – параметр, характеризующий количество зеленой массы растительности на единицу площади: $Q p \rho_p = W_B$.

Как следует из [1], для травянистых покровов и посевов сельскохозяйственных культур параметры p и ρ_p могут принимать следующие значения: в зависимости от типа, состояния посева и фазы вегетации: $p = 10^{-3} \div 10^{-2}$ для изреженного покрова; $p = 10^{-2} \div 10^{-1}$ для густого покрова; $\rho_p = 0,1 \div 0,2$ для сухой растительности; $\rho_p = 0,5 \div 0,8$ для сырой зеленой растительности. Примерные биометрические показатели ряда сельскохозяйственных культур представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Примерные биометрические показатели ряда сельскохозяйственных культур [1]

Культура	Густота посевов, ед./м ²	Высота растительности, см	Вес зеленой массы с единицы площади, ц/га	Влажность культуры, %	Влагозапас растительного покрова (толщина осажденной воды), мм
Озимая пшеница	400-1000	60-120	20-40 35-130	70-85 50-60	0,25-1,1 0,6-2,2
Озимая рожь	300-700	120-150	20-45	75-85 50-60	0,75-1,3 -
Яровая пшеница	300-500	80-120	50-150	55-65	1,1-2,5
Яровой ячмень	400-900	40-90	-	60-70	0,7-2,4
Кукуруза	5-30	120-320	-	80-85	-
Сахарная свекла	4-80	30-50	125-300	80-90	1,2-2,8

Заметим, что растительный покров является не чисто диэлектрической средой, а имеет некоторую удельную проводимость $\sigma_{раст}$, которую согласно [3, 5] можно пересчитать для хаотической однородной смеси следующим образом:

$$\sigma_{\text{эф}} = \sigma_{\text{раст}}^{\theta_{\text{раст}}}, \quad (4)$$

где $\theta_{\text{раст}}$ – объемная доля растительного компонента в смеси; $\sigma_{\text{раст}}$ – проводимость растительных компонент.

Проводимость $\sigma_{\text{раст}}$ фитоэлементов растительности составляет $(2-7) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. При этом значение проводимости фитоэлементов хвойного и лиственного леса составляет $(4-5) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, проводимость фитоэлементов таких культур, как люцерна, клевер на стадии цветения, озимая рожь, пшеница на стадии молочно-восковой спелости, составляет $(5-7) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [1].

В таблице 2 приведены значения для температуры 20°C и значений $\sigma_{\text{раст}} = 0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $\sigma_{\text{раст}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Как видно из таблицы, наличие проводимости существенно влияет на мнимую часть диэлектрической проницаемости ε'' [1].

Таблица 2 – Расчетные значения мнимой части диэлектрической проницаемости фитоэлементов

$\lambda, \text{ см}$	ε''	
	$\sigma_{\text{раст}} = 0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$\sigma_{\text{раст}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
2	37,2	37,9
10	13	16,6
20	6,7	13,9
30	4,2	15

Данные формулы справедливо применять, потому что линейный размер растительных неоднородностей, в среднем, в несколько раз меньше длины волны, то есть достаточно мал, чтобы смесь можно было считать однородной.

При прохождении радиоволн через слой растительности возникает экранирование и рассеяние радиоволн при их распространении из-за взаимодействия с растительностью. На данные явления влияют коэффициент отражения от слоя растительности [1, 5]:

$$r = r_0(1 - e^{-\tau}), \quad (5)$$

где $r_0 = \frac{\sigma_p'}{\sigma_p + \sigma_{\text{п}}}$ – альбедо полубесконечной среды; σ_p' – сечение рассеяния в верхнюю полусферу; $\sigma_p, \sigma_{\text{п}}$ – определенные по размерам и ориентациям фитоэлементов сечения рассеяния и ослабления; $\tau = \gamma_3 l_p$ – интегральный коэффициент поглощения; $\gamma_3 = k\sqrt{2\varepsilon'}\sqrt{\sqrt{1 + tg^2\delta} - 1}$ – погонный коэффициент поглощения по мощности; ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости; $tg\delta$ – тангенс угла потерь; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

На экранирование и рассеяние влияет степень покрытия почвы растительностью [1]:

$$\xi_{\text{эп}} = 1 - \frac{1}{S} \sum_i S_{0i}, \quad (6)$$

где S_{0i} – площадь участков поверхности, не занятых растительностью («просветов») на обозреваемой площади S . Приближение справедливо, если оно удовлетворяет условию $\frac{S_0}{\lambda l_p} \gg 1$.

Также, при прохождении радиоволн через растительный покров, они испытывают затухание [1-5, 6]:

$$E(d) = E_0 e^{-\alpha d}, \quad (7)$$

где α – коэффициент затухания; d – толщина слоя; E_0 – амплитуда входной волны.

Тангенс угла потерь – еще один важный параметр, отражающий потери электромагнитной энергии, и он напрямую зависит от диэлектрической проницаемости, особенно от содержания воды [6]:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (8)$$

где ε' – это действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости элементов растительности; ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости элементов растительности.

2. Методика проведения измерений скорости роста растения

Для проведения измерений и моделирования будем считать, что антенны расположены на высоте, сравнимой с радиусом первой зоны Френеля, в которой происходит основное взаимодействие радиоволн с растительным покровом. Если растительный покров находится в пределах этой зоны, это приводит к значительному затуханию сигнала, которое будет увеличиваться в соответствии с ростом растительного покрова.

Если в точке А расположен источник (излучающая антенна), а в точке В – приемная антенна (см. Рис. 1.), причем расстояние АВ намного больше длины волны, то первая зона Френеля будет рассчитана следующим образом [7]:

$$R_1 = \sqrt{\frac{r'_0 r''_0 \lambda}{r'_0 + r''_0}}, \quad (9)$$

$$AB = r = r'_0 + r''_0 \gg \lambda. \quad (10)$$

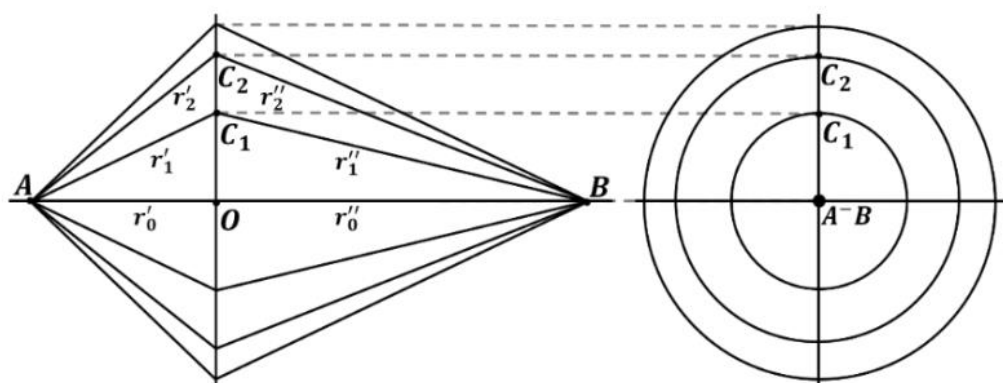


Рисунок 1 – Определение первой зоны Френеля с растительностью

Для описания приемно-передающей системы будем использовать S-параметры. Они связывают падающие и отражённые электромагнитные волны в многопортовых системах. В системе, содержащей две приемно-передающие антенны матричные уравнения примут вид [7]:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где S_{11} – коэффициент отражения от первого входа; S_{22} – коэффициент отражения от второго входа; S_{21} – коэффициент передачи в прямом направлении; S_{12} – коэффициент передачи в обратном направлении.

Согласно [8], коэффициент передачи в прямом направлении S_{21} можно переписать в виде:

$$|S_{21}| = \left| \frac{E(d)}{E_0} \right|. \quad (12)$$

А согласно [1] коэффициент передачи β для растительного покрова можно записать как:

$$\beta = e^{-2\tau}, \quad (13)$$

где τ – интегральное ослабление излучения в растительном слое.

Например, интегральное ослабление растительного покрова τ в диапазоне длин волн 3-100 см можно определить следующим образом [5]:

$$\tau = 4,34 \nu \frac{W_b}{\lambda} = 4,34 \frac{\nu W_b}{3 \cdot 10^4},$$

где W_b – влагозапас, кг/м²; ν – коэффициент, определяемый из регрессионного анализа экспериментальных данных, изменяющийся в пределах 2,5-5 в зависимости от типа покрова.

Расчетная зависимость интегрального ослабления при $\nu = 3$ $W_b = 4$ кг/м² приведена на рисунке 2.

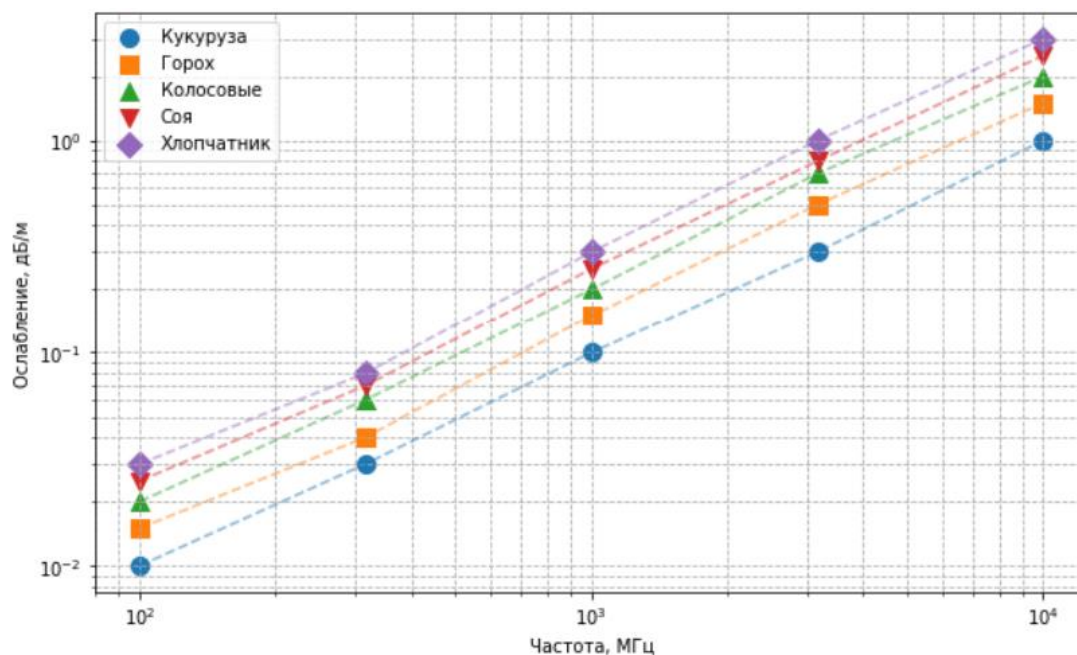


Рисунок 2 – Характерные значения затухания радиоволн в различных типах сельскохозяйственной растительности

В таком случае справедливо следующее:

$$|S_{21}| = e^{-2\tau}. \quad (14)$$

Данная формула помогает связать параметр S_{21} со скоростью роста растения.

Авторами работы [9] была доказана взаимосвязь между S_{21} и объемом растительного покрова. Как следует из графика (см. Рис. 3) с увеличением объема растительного покрова параметр S_{21} убывает по экспоненциальному закону. Данную зависимость можно объяснить тем, что с увеличением объема растительного покрова растет влагосодержание и плотность в растительном покрове, что в свою очередь напрямую влияет на диэлектрическую проницаемость и проводимость покрова.

Тогда, скорость роста растительного покрова можно определить следующим образом. Пусть $v = \frac{dV}{dt}$, где V – объем растительного покрова и $|S_{21}| = e^{-2\tau}$:

$$\frac{dV}{dt} = -2e^{-2\tau} \frac{d\tau}{dt}. \quad (14)$$

Проиллюстрируем это, используя данные об объеме растительного покрова и изменения S_{21} параметра из [9] и отобразим на рис. 4. Данную зависимость также можно объяснить тем, что с увеличением скорости роста растения, увеличивается влагосодержание и плотность растительного покрова.

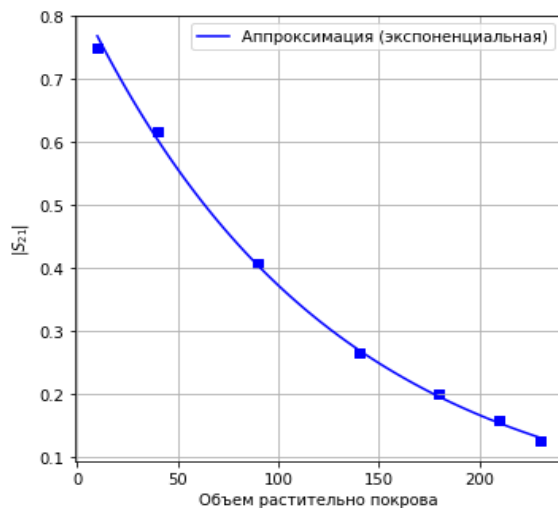


Рисунок 3 – График зависимости S_{21} параметра от объема растительного покрова

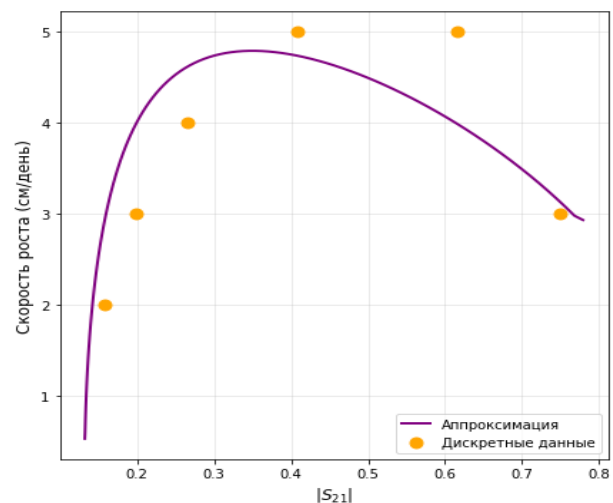


Рисунок 4 – График зависимости скорости роста растительного покрова от S_{21} параметра

Заключение

Предложенная методика СВЧ-радиометрии растительных покровов демонстрирует эффективность использования упрощенной электродинамической модели, учитывающей диэлектрические и проводящие свойства среды. Модель, основанная на представлении растительности в виде гомогенной смеси воздуха и фитоэлементов, позволяет оценивать ключевые параметры, такие как эффективная диэлектрическая проницаемость, проводимость и тангенс угла потерь, которые напрямую зависят от влагосодержания и плотности растительного покрова.

Установлено, что затухание СВЧ-сигнала, описываемое коэффициентом передачи S_{21} экспоненциально связано с объемом растительности. Это открывает возможность косвенного определения скорости роста растений через анализ динамики изменения S_{21} . Практическая

значимость методики подтверждается данными из литературных источников, где продемонстрирована корреляция между уменьшением S_{21} и увеличением биомассы, обусловленным ростом влагосодержания и объемом растительного покрова.

Разработанный подход обладает потенциалом для применения в сельском хозяйстве, позволяя дистанционно контролировать состояние посевов, оценивать фазы вегетации и оптимизировать агротехнические мероприятия. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение модели для различных типов культур, а также на интеграцию методики с системами спутникового или беспилотного зондирования для масштабирования на крупные территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутко, А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов / А.М. Шутко. – Москва: Наука, 1985. – 215 с.
2. Радиометрия : монография / А.Г. Гудков, И.А. Сидоров, Е.П. Новичихин [и др.]; под ред. А.Г. Гудкова и И.А. Сидорова. – Москва: Научная библиотека, 2024. – 336 с.
3. Чухланцев, А.А. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами / А.А. Чухланцев, А.М. Шутко, С.П. Головачев // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 11. – С. 1285-1311.
4. Chukhlantsev, A.A. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100-10000 mhz frequency band / A.A. Chukhlantsev, A.M. Shutko, S.P. Golovachev // Журнал радиоэлектроники. – 2003. – № 2.
5. Чухланцев, А.А. Оценки затухания радиоволн диапазона 3-300 см в растительных покровах / А.А. Чухланцев, С.П. Головачев // Лесной вестник (1997-2002). – 2002. – № 1. – С. 112-117.
6. Ishimaru, A. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering / A. Ishimaru. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991. – 656 p.
7. Степкин, В.А. Распространение радиоволн: учебное пособие / В.А. Степкин, К.В. Смусева, Г.К. Усков. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – 286 с.
8. Pozar, D.M. Microwave Engineering / D. M. Pozarю – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. – 752 p.
9. Ulaby, F.T. Microwave Dielectric Properties of Plant Materials / F.T. Ulaby, R.P. Jedlicka // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1984. – Vol. GE-22, No. 4 – P. 406-415. – DOI: 10.1109/TGRS.1984.350644.

REFERENCES

1. Shutko, A.M. Microwave radiometry of the water surface and soils / A.M. Shutko. – Moscow: Nauka, 1985. – 215 p.
2. Radiometry: monograph / A.G. Gudkov, I.A. Sidorov, E.P. Novichikhin [et al.]; edited by A.G. Gudkov and I.A. Sidorov. – Moscow: Scientific library, 2024. – 336 p.
3. Chukhlantsev, A.A. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation / A.A. Chukhlantsev, A.M. Shutko, S.P. Golovachev // Radio engineering and electronics. – 2003. – Vol. 48, No. 11. – P. 1285-1311.

4. Chukhlantsev, A.A. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100-10000 mhz frequency band / A.A. Chukhlantsev, A.M. Shutko, S.P. Golovachev // Journal of Radio Electronics. – 2003. – No. 2.
5. Chukhlantsev, A.A. Estimation of attenuation of radio waves in the 3-300 cm range in vegetation / A.A. Chukhlantsev, S.P. Golovachev // Lesnoy vestnik (1997-2002). – 2002. – No. 1. – P. 112-117.
6. Ishimaru, A. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering / A. Ishimaru. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991. – 656 p.
7. Stepkin, V.A. Propagation of radio waves: training manual / V.A. Stepkin, K.V. Smuseva, G.K. Uskov. – Voronezh: VSU Publishing House, 2024. – 286 p.
8. Pozar, D.M. Microwave Engineering / D. M. Pozarю – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. – 752 p.
9. Ulaby, F.T. Microwave Dielectric Properties of Plant Materials / F.T. Ulaby, R.P. Jedlicka // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1984. – Vol. GE-22, No. 4 – P. 406-415. – DOI: 10.1109/TGRS.1984.350644.

**ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА
КОМБИНИРОВАННЫХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

THE PROGRAM FOR AUTOMATED SELECTION OF COMBINED DRUGS FOR THE
TREATMENT OF CARDIOVASCULAR DISEASES

Петрищев К.О., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Petrishchev K.O., Student, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Асеева А.А., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Aseeva A.A., Student, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Кургалин С.Д., доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой цифровых технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Kurgalin S.D., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Digital Technologies Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Борзунов С.В., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Borzunov S.V., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Гончарова Н.Ю., кандидат медицинских наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», Воронеж, Россия

Goncharova N.U., PhD in Medicine, Docent, Associate Professor, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia

Кириянова А.А., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», Воронеж, Россия

Kiryanova A.A., Student, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье представлена разработка автоматизированной системы для подбора комбинированных препаратов при фармакотерапии артериальной гипертензии. Программа, созданная на платформе Windows Forms (C#), анализирует базу данных препаратов и предоставляет врачу оптимальные схемы лечения с учетом современного состояния фармацевтического рынка антигипертензивных лекарственных средств. Применение программы позволяет оптимизировать работу, повышая комплаентность пациентов к лечению, улучшая качество назначений и сокращая время на подбор терапии. Перспективы развития включают расширение базы данных препаратов.

Ключевые слова: медицинское ПО, алгоритм подбора лечения, C#, Windows Forms, EPPlus, медицинские информационные системы.

Abstract. The article presents the development of an automated system for selecting combined drugs in the pharmacotherapy of arterial hypertension. The program, created on the Windows Forms platform (C#), analyzes a database of medications and provides the doctor with optimal treatment regimens, considering the current state of the pharmaceutical market for antihypertensive drugs. The use of the program helps optimize workflows, improving patient compliance with treatment, enhancing the quality of prescriptions, and reducing the time spent on therapy selection. Future development prospects include expanding the drug database.

Keywords: medical software, treatment selection algorithm, C#, Windows Forms, EPPlus, medical information systems.

Артериальная гипертензия (АГ) остается одним из ведущих заболеваний сердечно-сосудистой системы, ассоциированным с развитием таких потенциально смертельных кардиоваскулярных осложнений как острый инфаркт миокарда, ишемическая болезнь сердца, хроническая сердечная недостаточность, нарушение мозгового кровообращения. Основная цель антигипертензивной терапии – снижение артериального давления (АД) ниже целевого уровня (140/90 мм рт.ст.), для чего применяются 5 классов антигипертензивных препаратов: ингибиторы АПФ (ИАПФ), антагонисты рецепторов ангиотензина-II (АРА), бета-адреноблокаторы (ББ), блокаторы кальциевых каналов (АК) и диуретики. В большинстве случаев пациентам с АГ рекомендована комбинация антигипертензивных препаратов. При этом, согласно клиническим рекомендациям, для лечения АГ предпочтительно назначение фиксированных комбинаций (в «одной таблетке») для улучшения приверженности к терапии [1, 2].

Фармацевтический рынок в настоящее время предлагает широкий выбор комбинированных антигипертензивных средств, однако лечащему врачу сложно сориентироваться в большом количестве многокомпонентных препаратов, особенно при назначении 3-4 лекарственных средств одновременно [4]. Для решения данной задачи была разработана автоматизированная система подбора комбинированных препаратов, главная цель которой – упростить и ускорить процесс выбора эффективных схем лечения, минимизируя при этом вероятность врачебных ошибок.

Программа работает с основными группами антигипертензивных препаратов, указанными в клинических рекомендациях, а также с информацией о комбинированных препаратах, содержащих гиполипидемические средства группы статины, поскольку коррекция дислипидемии является актуальной проблемой для пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями [2, 3]. База данных включает международные непатентованные названия (МНН) лекарственных средств, торговые наименования (ТН), форму выпуска и страну производителя препарата, стоимость 1 упаковки, частоту встречаемости в аптечной сети. При необходимости одновременного назначения нескольких лекарственных средств с антигипертензивным действием с помощью разработанного ПО лечащий врач может на основе запланированного лечения подобрать схемы с использованием 2-х, 3-х или 4-х компонентных препаратов, одновременно получив информацию о приблизительной

стоимости назначенного лечения и доступности назначенных препаратов в розничной продаже.

Программа анализирует базу данных и представляет результаты в удобном формате: полные совпадения (все выбранные компоненты присутствуют в одном препарате) выделяются жирным шрифтом. Частичные совпадения (например, 2 из 3-х требуемых компонентов) предлагаются как альтернативные варианты. Результаты сортируются по степени соответствия запросу.

Ключевыми преимуществами разработанного ПО перед традиционными методами подбора лечения являются: экономия времени – процесс, занимающий вручную 10-15 минут, сокращается до 30-60 секунд; повышение точности – исключаются ошибки, связанные с человеческим фактором; наглядность – удобное представление данных с возможностью быстрого сравнения вариантов; актуальность – база препаратов может оперативно обновляться.

Таким образом, ПО необходимо для решения задачи поиска препаратов, переводя процесс подбора комбинированной терапии в удобный формат – от трудоемкого ручного поиска к быстрому, точному и наглядному компьютерному анализу. Использование ПО позволяет врачам упростить процесс выбора и назначения фиксированных комбинаций антигипертензивных препаратов, что способствует улучшению контроля АД у пациентов, предотвращая развитие сердечно-сосудистых осложнений.

Технологии разработки ПО

Программный комплекс разработан на языке C# с использованием платформы Windows Forms, что обеспечивает создание удобного графического интерфейса для работы в операционной системе Windows. Выбор данной технологии обусловлен несколькими ключевыми преимуществами.

Архитектура и основные компоненты включают графический интерфейс, построенный на базе Windows Forms. В нем используются элементы управления ComboBox для выбора категорий и групп препаратов, DataGridView для наглядного представления результатов поиска, ListBox для отображения списка назначений и рекомендаций, а также стандартные элементы Label и Button для управления процессом.

Обработка данных реализована с помощью библиотеки EPPlus для работы с Excel-файлами (как видно на рисунке 1, где представлен скриншот окна с данными из Excel-таблицы), что позволяет выполнять чтение, анализ и поиск информации [5].

Также задействованы System.Data для организации структурированного хранения данных и System.Windows.Forms для управления элементами интерфейса.

Перечислим ключевые функциональные модули.

Модуль загрузки данных, который, как видно из листинга 1, использует EPPlus для парсинга Excel-файлов. Это позволяет загружать и обновлять базу препаратов без изменения кода программы, обрабатывать большие объемы данных с высокой скоростью и выполнять сложные поисковые запросы по нескольким параметрам.

Модуль хранения данных, применяющий словари (Dictionary) для эффективного хранения категорий препаратов, LINQ-запросы для быстрой фильтрации и сортировки информации, а также коллекции List для управления динамическими наборами данных.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	аптека ру (наличие)	СТОИМОСТЬ	РАСПРОСТРАНЕНИЕ В АПТЕКАХ	КОЛ-ВО ТАБЛ В УПАКОВКЕ	страна	ТН	иАПФ	ДОЗИРОВКА
2	есть	300	188	20	Россия	Энап Н	эналаприл	10 мг
3	есть	331	141	20	Словения	Энап НЛ	эналаприл	20 мг
4	есть	504	54	45	Россия	Энзикс дуо	эналаприл	10 мг
5	есть	443	4	30	Германия	Берлиприл плюс	эналаприл	10 мг
6	есть	628	25	28	Великобритания	Ко-ренитек	эналаприл	20 мг
7	есть	599	11	28	Италия	Леркамен Дуо	эналаприл	10 мг
8	есть	779	11	28	Италия	Леркамен Дуо	эналаприл	20 мг
9	есть	442 нет информации		30	Россия	Амлодипин Периндоприл Канон	периндоприл	5 мг
10	есть	539 нет информации		30	Россия	Амлодипин Периндоприл Канон	периндоприл	10 мг
11	есть	491	41	30	Венгрия	Амлодипин Периндоприл Тева	периндоприл	5 мг
12	есть	600	28	30	Венгрия	Амлодипин Периндоприл Тева	периндоприл	10 мг
13	есть	630	18	30	Венгрия	Амлодипин Периндоприл Тева	периндоприл	10 мг
14	есть	471	22	30	Венгрия	Амлодипин Периндоприл Тева	периндоприл	5 мг
15	есть	243	30	30	Россия	Амлодипин Периндоприл-СЗ	периндоприл	4 мг
16	есть	295	27	30	Россия	Амлодипин Периндоприл-СЗ	периндоприл	8 мг
17	есть	648	58	30	Россия	Дальнева	периндоприл	4 мг
18	есть	713	108	30	Россия	Дальнева	периндоприл	8 мг
19	есть	1643	74	90	Россия	Дальнева	периндоприл	8 мг
20	есть	410	109	30	Россия	Ко-дальнева	периндоприл	2 мг
21	есть	621	139	30	Россия	Ко-дальнева	периндоприл	4 мг
22	есть	1414	83	90	Россия	Ко-дальнева	периндоприл	4 мг
23	есть	745	144	30	Россия	Ко-дальнева	периндоприл	8 мг
24	есть	1649	80	90	Россия	Ко-дальнева	периндоприл	8 мг
25	есть	806	137	30	Россия	Ко-дальнева	периндоприл	8 мг
26	есть	1788	80	90	Россия	Ко-дальнева	периндоприл	8 мг

Рисунок 1 – Скриншот окна с данными из Excel таблицы

Листинг 1 – Модуль, отвечающий за обработку данных

```

public void LoadDrugData()
{
    string filePath = Path.Combine(Application.StartupPath,
"data", "Файл.xlsx");
    using (var package = new ExcelPackage(new
FileInfo(filePath)))
    {
        var worksheet =
package.Workbook.Worksheets["Препараты"];
        int totalRows = worksheet.Dimension.Rows;

        for (int row = 2; row <= totalRows; row++)
        {
            string category = worksheet.Cells[row, 1].Text;
            string group = worksheet.Cells[row, 2].Text;

            if (!groupData.ContainsKey(category))
            {
                groupData[category] = new List<string>();
            }
            groupData[category].Add(group);
        }
    }
}

```

В примере реализации загрузки данных были применены ключевые принципы, обеспечивающие высокую эффективность работы системы.

Для оптимизации производительности данные загружаются в память при старте программы, что сокращает время обработки запросов. Дополнительно используется кэширование часто запрашиваемой информации, а поиск выполняется по предварительно индексированным структурам, что значительно ускоряет обработку данных.

Архитектура системы отличается гибкостью: она позволяет легко расширять список категорий препаратов и добавлять новые параметры поиска без значительных изменений кода. Модульная структура кода упрощает сопровождение и дальнейшую доработку программы.

Программная реализация сочетает надежные технологии .NET Framework, что гарантирует стабильную работу и удобство использования приложения.

Алгоритм работы программы

Программа реализует комплексный процесс обработки данных, начинающийся с загрузки информации из структурированного Excel-файла (Файл.xlsx). На первом этапе система считывает и анализирует данные с нескольких рабочих листов, каждый из которых содержит специфическую информацию: основные группы лекарственных средств, комбинированные препараты, а также данные о дозировках и особенностях применения. Процесс загрузки включает строгую валидацию данных для проверки их целостности и соответствия требуемым форматам. Полученная информация преобразуется в оптимальные структуры хранения – используются словари (Dictionary) для организации быстрого поиска, выстраиваются иерархические связи между категориями и группами препаратов, а также реализуется кэширование часто используемых данных для ускорения последующих операций.

После успешной загрузки данных программа переходит к этапу интеллектуального поиска комбинаций. Этот процесс начинается с анализа критериев, выбранных пользователем (конкретные категории и группы препаратов). Система строит сложный поисковый запрос, учитывающий, как полные совпадения (когда в препарате присутствуют все указанные компоненты), так и частичные (не менее 50 % от запрошенных компонентов). Особое внимание уделяется применению специальных правил: автоматическому исключению несовместимых комбинаций, учету возможных фармакологических взаимодействий и приоритизации часто назначаемых схем лечения. Листинг 2 демонстрирует алгоритм добавления данных в таблицу результатов. Для обеспечения высокой скорости работы используются оптимизированные структуры данных и эффективные алгоритмы поиска.

Листинг 2 – Модуль, добавление данных в таблицу результатов

```
foreach (var row in matchGroup.Value)
{
    var rowValues = new string[worksheet.Dimension.Columns];
    for (int col = 1; col <= worksheet.Dimension.Columns; col++)
    {
        rowValues[col - 1] = worksheet.Cells[row, col].Text.Trim();
    }

    int rowIndex = dataGridView1.Rows.Add(rowValues);

    // Выделение полных совпадений
    if (matchGroup.Key == requiredCount)
```

```
{
dataGridView1.Rows[rowIndex].DefaultCellStyle.Font =
new Font(dataGridView1.DefaultCellStyle.Font, FontStyle.Bold);
}
}
```

Финальный этап работы программы (см рис. 2) – главное окно включает продвинутую обработку и представление результатов. Система выполняет многоуровневую фильтрацию полученных данных, учитывая степень совпадения, популярность назначений среди специалистов и доступность препаратов в аптечной сети. Результаты интеллектуально сортируются – сначала по количеству совпадающих компонентов, затем по частоте назначения и в алфавитном порядке. Особое внимание уделяется удобству представления информации: полные совпадения визуально выделяются, данные группируются по категориям, а цветовая индикация сразу показывает уровень совместимости препаратов. Дополнительно программа предлагает полезные функции, такие как экспорт результатов в различные форматы (Excel, PDF), формирование краткой справки по каждому препарату и показ альтернативных вариантов для рассмотрения.

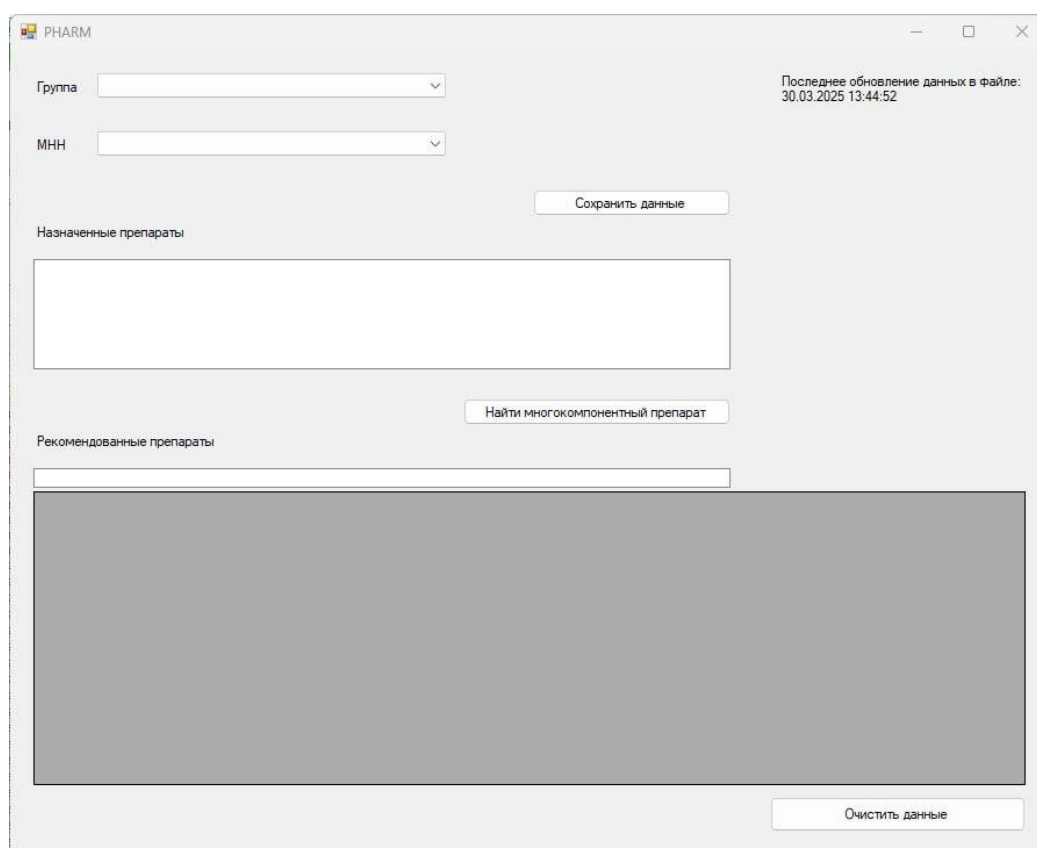


Рисунок 2 – Скриншот главного окна программы

Использование программного комплекса

Интерфейс программы разработан с учетом потребностей медицинских специалистов, предлагая интуитивно понятное и удобное рабочее пространство. Главное окно, представленное на рис. 2, организовано для максимально эффективной работы.

В верхней части интерфейса расположены ключевые элементы управления: выпадающие списки «Группа» для выбора категории препаратов (например, «Бета-адреноблокаторы») и «МНН» для указания международного непатентованного названия (такого как «бисопролол»). Здесь же находится информационная панель, отображающая дату последнего обновления данных в формате «Последнее обновление данных в Файле: 30.03.2025 13:44:52», что позволяет пользователю всегда быть в курсе актуальности информации. Завершает верхний блок кнопка «Сохранить данные», предназначенная для фиксации выбранных препаратов в списке назначений.

Центральная часть интерфейса содержит несколько важных компонентов. Секция «Назначенные препараты» динамически отображает текущий выбор пользователя (например, «Препарат: Антагонисты рецепторов АП II, валсартан»). Рядом расположена кнопка «Найти многокомпонентный препарат», активирующая поиск лекарственных комбинаций. Основное пространство занимает таблица результатов (DataGridView) с колонками «Торговое название», «Доза» и другими, демонстрирующая результаты поиска. На рис. 3 показан пример работы программы в процессе подбора препарата.

Полных совпадений (жирный шрифт): 0, частичных совпадений: 15

	Торговое название	иАПФ	Доза	Антагонисты рецепторов ангиотензина	Доза	Бета-адреноблокаторы
▶	Престиллол	периндоприл	5 мг			бисопролол
	Амлодипин+Валсартан Канон			Валсартан	160 мг	
	Амлодипин+Валсартан+Ги, Канон			Валсартан	80 мг	
	Амлодипин+Валсартан+Ги, Канон			Валсартан	160 мг	
	Валз Комби			Валсартан	160 мг	
	Валз Н			Валсартан	80 мг	
	Конкор АМ					бисопролол
	Конкор НСТ					бисопролол
	Нипертен комби					бисопролол
	Конкор АМ					бисопролол
	Конкор АМ					бисопролол

Очистить данные

Рисунок 3 – Скриншот окна программы с подбором препарата

Нижняя часть интерфейса предоставляет сводную информацию: здесь отображаются рекомендованные препараты с указанием количества полных (выделенных жирным шрифтом) и частичных совпадений (например, «Полных совпадений: 0, частичных совпадений: 15»). Дополнительно система предлагает альтернативные варианты, такие как комбинация «Амлодипин+Валсартан» с указанием дозировки 160 мг, помогая специалисту принять оптимальное решение при назначении терапии.

Вывод

Разработанный программный комплекс автоматизирует процесс подбора комбинированных антигипертензивных препаратов, что сокращает время подбора терапии и повышает потенциальную эффективность рекомендованного лечения. Программа обеспечивает точность назначений благодаря встроенной базе данных препаратов с информацией о фармакологических группах, МНН и формах выпуска, исключая ошибки

ручного подбора. ПО формирует структурированную информацию о фиксированных комбинациях лекарственных средств, представленных на фармацевтическом рынке. Предоставляет врачу наглядные и удобные инструменты для анализа: цветовую индикацию совместимости, сортировку результатов по степени соответствия, возможность сравнения альтернативных вариантов. Простой и интуитивно понятный интерфейс делает доступной для использования ПО в отделениях терапевтического профиля, а также для работы фармацевтов и провизоров в условиях аптечных организаций. Дальнейшее развитие программы предполагает расширение и актуализацию базы данных, что позволит обеспечить более широкое внедрение ПО в клиническую практику. Таким образом, программа становится ценным инструментом для врачей, способствуя оптимизации лечебного процесса и улучшению качества помощи пациентам с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозова, Т.Е. Комбинированная антигипертензивная терапия в свете современных рекомендаций: стратегия одной таблетки / Т.Е. Морозова // Системные гипертензии. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 92-96. – DOI 10.26442/2075082X.2018.4.180110.
2. Левченкова, О.С. Выбор между фиксированными дозированными комбинациями антигипертензивных средств и их свободными комбинациями в лечении артериальной гипертензии / О.С. Левченкова, Р.Р. Галимулина, Б.Р. Комев, К.Д. Загнет // Архивъ внутренней медицины. – 2024. – Т. 14, № 5 (79). – С. 325-338. – DOI 10.20514/2226-6704-2024-14-5-325-338.
3. Галеева, З.М. Современные фиксированные комбинации в коррекции артериальной гипертензии и дислипидемии / З.М. Галеева, А.С. Галявич, Л.В. Балеева [и др.] // Кардиология. – 2024. – Т. 64, № 5. – С. 26-32. – DOI 10.18087/cardio.2024.5.n2656.
4. Поповская, Д.П. Выбор схем терапии пожилых пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями с учетом нежелательных лекарственных реакций / Д.П. Поповская, В.И. Шевцова, А.А. Зуйкова, А.Н. Шевцов // Научно-медицинский вестник Центрального Черноземья. – 2023. – Т. 24, № 2. – Р. 40-45. – DOI:10.18499/1990-472X-2023-24-2-40-45.
5. Шилдт, Г. С# 4.0: полное руководство. – Москва: ООО «И.Д. Вильямс», 2010. – 1056 с.

REFERENCES

1. Morozova, T.E. Combined antihypertensive therapy in the light of modern recommendations: strategy of one tablet – / T.E. Morozova // Systemic Hypertension. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 92-96. – DOI 10.26442/2075082X.2018.4.180110.
2. Levchenkova, O.S. The choice between fixed-dose combinations of antihypertensive agents and their free combinations in the treatment of hypertension / O.S. Levchenkova, R.R. Galimulina, B.R. Komev, K.D. Zagnet // Archive of Internal Medicine. – 2024. – Vol. 14, No. 5 (79). – P. 325-338. – DOI 10.20514/2226-6704-2024-14-5-325-338.
3. Galeeva, Z.M. Modern fixed combinations in the correction of arterial hypertension and dyslipidemia / Z.M. Galeeva, A.S. Galyevich, L.V. Baleeva [et al.] // Cardiology. – 2024. – Vol. 64, No. 5. – P. 26-32. – DOI 10.18087/cardio.2024.5.n2656.

4. Popovskaya, D.P. The choice of treatment regimens for elderly patients with cardiovascular diseases, taking into account undesirable drug reactions / D.P. Popovskaya, V.I. Shevtsova, A.A. Zuikova, A.N. Shevtsov // Scientific and Medical Bulletin of the Central Chernozem region. – 2023. – Vol. 24, No. 2. – P. 40-45. – DOI:10.18499/1990-472X-2023-24-2-40-45.
5. Schildt, G. C# 4.0: The Complete Guide. – Moscow: I.D. Williams LLC, 2010. – 1056 p.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КОЛОРИРОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

INTENSIFICATION OF THE TEXTILE DYEING PROCESS USING LOW TEMPERATURE PLASMA

Иванов Н.А., старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий и дизайна»,
Санкт-Петербург, Россия

Ivanov N.A., Senior Lecturer, Saint-Petersburg
State University of Industrial Technology and
Design, Saint-Petersburg, Russia

Киселев А.М., доктор технических наук,
профессор, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный
университет промышленных технологий и
дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Kiselev A.M., DrSc in Technical Sciences,
Professor, Professor, Saint-Petersburg State
University of Industrial Technology and Design,
Saint-Petersburg, Russia

Аннотация. Представлена информация о технологии интенсифицированного крашения текстильных материалов, модифицированных путем обработки низкотемпературной плазмой. Дана оценка перспективности крашения модифицированных материалов нерастворимыми азокрасителями, способными к ковалентной фиксации на волокне.

Ключевые слова: крашение, текстильный материал, низкотемпературная плазма, модификация, интенсификация, азокраситель, качество окраски.

Abstract. The paper presents information on a technology for the intensified dyeing of textile materials modified by low-temperature plasma treatment. The prospects of dyeing the modified materials with water-insoluble azo dyes capable of covalent fixation on the fiber are assessed.

Keywords: dyeing, textile material, low temperature plasma, modification, intensification. azo pigments, quality of coloration.

Интерес к физическим методам воздействия на текстильные материалы значительно вырос в связи с высокой эффективностью интенсифицированных таким образом технологических процессов и возможностью улучшения потребительских свойств текстильных изделий [1]. Для модификации текстильных материалов, в частности, используется низкотемпературная плазма (НТП), генерируемая тлеющим, барьерным или коронным разрядами [2]. Это наиболее значимый и безопасный метод модификации текстильных и других материалов, а также интенсификации процессов их колорирования и облагораживания.

НТП представляет собой частично ионизированный газ, стационарное состояние которого поддерживается подводом энергии внешнего электромагнитного поля, Степень

ионизации газа в неравновесной НТП составляет 10^{-4} - 10^{-6} , концентрация электронов – 10^{15} - 10^{17} ед. /м³ со средней энергией 1-10 эВ при температуре $1 \cdot 10^4$ – $8 \cdot 10^5$ К. Важным свойством НТП является наличие интенсивного УФ-излучения [3].

При воздействии НТП на полимерный материал наблюдается два эффекта: специфическое для каждого газа изменение поверхностного слоя субстрата толщиной 5 нм и не зависящий от вида газа «глубинный эффект», состоящий в образовании радикалов, вызывающих процессы сшивки и дегидрирования в полимерном слое толщиной $5 \cdot 10^{-6}$ м. Интенсивность воздействия на материал УФ-излучения определяется, в первую очередь, величиной давления газа [4].

Наиболее полно изучены процессы плазмохимической модификации и интенсификации колорирования и отделки шерстяных, кожевенных и меховых материалов. В отношении интенсифицирующего влияния НТП на процесс крашения шерстяных материалов установлено, что основными барьерами для диффузии больших молекул красителей являются эпи- и экзокутикулярные слои со значительным количеством внутри- и межмолекулярных дисульфидных связей. Именно эти гистологические элементы в структуре шерстяного волокна претерпевают травление, деструкцию и модификацию при воздействии НТП. Образование макропор и трещин, а также повышение смачиваемости волокон способствует увеличению скорости диффузии красителя в модифицированный волокнистый субстрат, но одновременно дезаминирование и некоторые другие процессы приводят к снижению количества, способных к протонированию в кислой среде азотсодержащих групп в структуре шерстяных волокон, которые являются активными центрами для сорбции и фиксации кислотных и других классов красителей, используемых для окрашивания шерсти [5].

Увеличение длительности обработки плазмой тлеющего разряда повышает степень деструкции и количество поперечных связей-сшивок за счет рекомбинации макрорадикалов и образования новой сетчатой структуры в кутикулярном слое кератина шерсти. Эти сшивки также могут снижать величину сорбции красителей и скорость процесса крашения. Однако, замедляющее действие НТП-модификации проявляется только в начальный период этого процесса, прежде всего для образцов, подвергнутых кратковременной плазмохимической обработке, а также вследствие крашения в не изотермическом режиме.

Обработка НТП изменяет значение дзета-потенциала шерсти, способствует росту сил отталкивания анионов красителя со снижением скорости крашения в начальный период, что содействует формированию более равномерных окрасок. В дальнейшем процесс крашения резко интенсифицируется за счет увеличения проницаемости волокнистого субстрата модифицированной шерсти в результате частичной деструкции под воздействием плазмы тлеющего разряда. Увеличение продолжительности обработки шерсти НТП приводит к увеличению степени разрушения кутикулярного слоя и снижению количества цистиновых связей, особенно в α -слое экзокутикулы, что облегчает диффузию красителя во внутренние слои волокна и интенсифицирует процесс крашения с получением более прочных окрасок. В том случае, если используется азотная плазма, то отмечается повышение сорбции красителя, что обусловлено образованием дополнительного числа аминокгрупп [6].

Анализ результатов кинетических исследований для красителей различных классов показал наличие взаимосвязи между химическим строением и молекулярной массой красителя

и эффектом плазменной интенсификации процесса крашения шерсти. Ввиду изменения электроповерхностных свойств шерстяного волокна при обработке плазмой, увеличение количества сульфогрупп в молекуле красителя приводит к замедлению скорости крашения в начальном периоде процесса, особенно при кратковременной обработке шерстяного материала в кислородной плазме.

На основании полученных кинетических кривых сорбции проведен расчет кажущихся коэффициентов диффузии красителей в модифицированное шерстяное волокно с использованием методов «половинного крашения» и уравнения Вильсона-Крэнка [7] (Табл. 1). Обработка образцов производилась кислородной плазмой тлеющего разряда при давлении 103 Па в течение 7.5 с.

Таблица 1 – Значения кажущихся коэффициентов диффузии красителей в шерстяное волокно, модифицированное низкотемпературной плазмой

Наименование красителя (температура крашения, °С)	Коэффициент диффузии красителя, $D \cdot 10^9, \text{см}^2/\text{с}$			
	Метод половинного крашения		По уравнению Вильсона-Крэнка	
	Исходный образец	Модифицированный образец	Исходный образец	Модифицированный образец
Активный оранжевый ЖШ (94)	0,49	0,80	3,88	6,60
Активный желтый КШ (94)	1,99	3,30	31,8	50,0
Кислотный зеленый антрахиноновый (84)	–	–	2,32	8,95
Кислотный алый (84)	–	–	7,34	14,20
Кислотный ярко-синий антрахиноновый (80)	1,90	2,20	1,35	4,40

В результате плазменной модификации выявлено повышение энергии активации процесса крашения шерстяной ткани, при этом увеличение продолжительности плазменной обработки незначительно отражается на величине этой энергии.

Установлено, что обработка НТП повышает сродство анионных красителей к волокну, равновесная сорбция красителей шерстяной тканью увеличивается, в зависимости от класса и строения красителя, на 8-12 % по сравнению с крашением немодифицированного материала. Это позволяет формировать более интенсивные и устойчивые окраски, которые по визуальной и инструментальной колористической оценке отличаются, главным образом, по показателю светлоты.

Доказано, что основные физико-механические свойства (разрывная нагрузка, относительное удлинение, устойчивость к истиранию и др.) шерстяного материала не ухудшаются в результате обработки НТП атмосферного и низкого давления, а соответствующие показатели для модифицированных и окрашенных материалов имеют тенденцию к улучшению.

На основании исследований, выполненных научной школой профессора С.Ф. Садовой, определены следующие основные направления целенаправленной модификации шерстяных материалов с использованием их плазмохимической обработки [8]:

– кратковременное воздействие НТП с частичной деструкцией эпи- и экзокутикулы с изменением проницаемости поверхности шерстяного волокна для химических реагентов и красителей, снижением способности волокон к свайчиванию и усадке и повышением адгезионных свойств и прядильной способности шерсти;

– частичная деструкция поверхностного слоя волокна под воздействием НТП с ростом скорости диффузии молекул красителей;

– более глубокая модификация, затрагивающая все слои эндо- и экзокутикулы и приводящая к сглаживанию рельефа поверхности шерсти (изменение фактора чешуйчатости со снижением валкоспособности и усадки при влажной обработке и многократных стирках с повышением устойчивости шерстяных материалов к истиранию).

Плазмохимическая технология может использоваться для подготовки тканей к процессам крашения и печати. Замена операции хлорирования шерстяных материалов гипохлоритом натрия на обработку НТП плазмой позволяет увеличить набухание волокон, их смачиваемость, уменьшить степень желтизны, сохранить прочностные характеристики и повысить качество колористического оформления.

В условиях плазмохимической интенсификации повышение скорости диффузии красителей дает возможность перехода к непрерывным технологиям крашения, которые более производительны и экономичны. При реализации непрерывной плазмохимической технологии крашения рекомендуется максимальный уровень температуры плюсовочной ванны и проведение операции запаривания окрашенного материала без промежуточной сушки, что позволяет обеспечить сохранность физико-механических свойств шерсти и необходимую прочность окрасок при снижении расхода красителя на 55-65 % по сравнению с традиционной периодической технологией крашения.

Для плазмохимической обработки текстильных материалов существует специализированное оборудование, характеристика которого приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Техническая характеристика плазмохимических установок для обработки текстильных материалов

Марка установки	Ширина ткани, см	Диаметр рулона, мм	Скорость движения ткани, м/мин	Длина заправки, м	Мощность разряда, кВт	Диаметр вакуумной камеры, мм
УПХ-140	120	200	0-20	1,6	20	1200
ЛПХ-180Ш	170	1350	0-80	8,5	900	1000
КПР-180-1	170	1050	0-80	6,7	80	2010
КПР-180-4	170	700	0-80	6,7	80	2000
КПР-180	180	700	0-80	6,7	80	2000

Плазмохимические технологии интенсификации процессов колорирования и облагораживания материалов характеризуются улучшенными экологическими показателями, безопасны для человека и окружающей среды. Эффективность их реализации подтверждена

результатами промышленного применения на предприятиях текстильной и легкой промышленности.

С целью расширения применения различных классов красителей и видов текстильных волокнистых материалов, модифицированных НТП и предназначенных для окрашивания, на кафедре химических технологий имени профессора А.А. Хархарова Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна проведены исследования процесса крашения модифицированной НТП смесовой пряжи путем синтеза на ней нерастворимых азокрасителей, способных к ковалентной фиксации на волокнистом субстрате. В ходе выполнения эксперимента изучен синтез красителей с ковалентной фиксацией на пряже из смеси шерстяных и льняных волокон. При этом оценивались образцы, не прошедшие и подвергнутые плазменной обработке по оптимальному режиму. Доказана более высокая выбираемость азокомпонентов (И-кислота, кислота Невиль-Винтера) модифицированной пряжей. В качестве диазосоставляющих, способных обеспечить ковалентную фиксацию синтезированных азокрасителей на волокне, использовались следующие ароматические амины:

амин 1 – сернокислый эфир-4β-оксиэтилсульфонил-2-аминоанизола;

амин 2 – сернокислый эфир-4β-оксиэтилсульфониланилина

Исследование перехода эфирной формы амина в винилсульфовую в зависимости от значений pH, температуры и продолжительности обработки показало (Табл. 3), что данный процесс протекает быстро и без затруднений, а его скорость определяется строением ароматического радикала используемого амина [9].

Таблица 3 – Кинетика процесса перехода ароматического амина в винилсульфовую форму

pH среды	Время полного перехода ароматического амина в винилсульфовую форму (мин) при температуре, °C			
	20	25	30	35
9,0	52	34	25	19
10,0	29	14	7	4

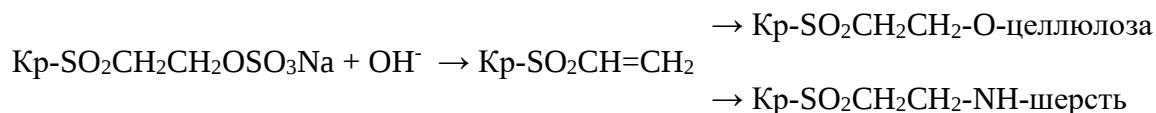
Рекомендуемые азо- и диазокомпоненты могут использоваться для синтеза азокрасителя на смесовой пряже по следующим схемам:



Вторая схема предпочтительнее, так как обеспечивает максимальное сочетание реагирующих компонентов при минимальном повреждении волокна.

При синтезе на смесовой пряже дисазокрасителя в процессе азосочетания в щелочной среде происходит образование активной винилсульфоновой формы, способной к образованию

ковалентной связи с аминогруппами шерстяного и гидроксильными группами целлюлозного (льняного) волокон по механизму нуклеофильного присоединения [10]:



Наиболее важным выводом является факт возможного получения более прочных окрасок на смесовой пряже, подвергнутой плазменной обработке, что подтверждается данными таблицы 4. Установлено сохранение физико-механических показателей модифицированной и окрашенной смесовой пряжи.

Таблица 4 – Сравнительные показатели устойчивости окрасок смесовой пряжи при применении синтезированных азокрасителей (1 – не обработанный образец; 2 – образец, обработанный НТП)

Вид азосоставляющей при синтезе азокрасителя	Устойчивость окраски, балл					
	к стирке при 40°C		к сухому трению		к мокрому трению	
	1	2	1	2	1	2
Нафтионовая кислота	4/4/5	4/5/5	4	5	3-4	5
И-кислота (моноазо)	4/4/4	4/5/5	4	4-5	4	4-5
И-кислота (дисазо)	3/4/4	5/4/5	4	5	3-4	4-5
И-кислота+ нафтионовая кислота (дисазо)	4/4/5	5/5/5	4-5	5	4	5

Таким образом, в результате выполненных исследований доказана перспективность плазмохимической модификации смесовой пряжи с обеспечением высокого качества крашения нерастворимыми азокрасителями, синтезированными на материале и имеющими прочную ковалентную связь с волокнистыми компонентами смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горберг, Б.Л. Применение низкотемпературной плазмы для обработки материалов, используемых в легкой и текстильной промышленности / Б.Л.Горберг, А.И.Максимов, Б.Н. Мельников // Известия вузов: Химия и химическая технология. – 1983. – Т. 24, № 11. – С. 1158-1161.
2. Иванов, А.А. Неравновесная плазмохимия / А.А. Иванов, Т.К. Соболева. – Москва: Атомиздат, 1978. – 238 с.
3. Плазмохимические реакции и процессы / под ред. Л.С. Полака. – Москва: Наука, 1977. – 486 с.
4. Русанов, В.Д. Физика химически активной плазмы / В.Д. Русанов, А.А. Фридман. – Москва: Наука, 1984. – 312 с.
5. Соловьева, И.А. Исследование процесса крашения шерсти, обработанной низкотемпературной плазмой / И.А. Соловьева, И.В. Осина, С.Ф. Садова // Известия вузов: Технология текстильной пром-сти. – 1999. – № 6. – С. 58-61.

6. Неборако А.А. Исследование особенностей крашения шерсти, обработанной низкотемпературной плазмой, кислотными красителями, содержащими четвертичный атом азота / А.А. Неборако, С.Ф. Садова // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности «Поиск-2002»: Тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Иваново, 2002. – С. 121.
7. Забашта, В.Н. Основы интенсификации крашения полиэфирных волокон / В.Н. Забашта. – Ленинград: изд-во Ленинградского университета, 1981. – 136 с.
8. Садова, С.Ф. Исследование обработки в тлеющем разряде для отделки шерстяных материалов / С.Ф. Садова. – Москва: ЦНИИТЭИЛегпром: Шерстяная пром-сть, 1991. – № 1. – 48 с.
9. Иванов, Н.А. Крашение смесовых текстильных материалов путем синтеза азокрасителей с ковалентной фиксацией на волокне / Н.А. Иванов, А.М. Киселев // Известия вузов: Технология легкой пром-сти. – 2022. – № 3. – С. 93-98.
10. Иванов, Н.А. Получение стойких форм диазолей, обеспечивающих ковалентную фиксацию синтезированного на волокне азокрасителя в процессе крашения текстильного материала / Н.А. Иванов, Л.А. Ковжин, А.М. Киселев // Известия вузов: Технология легкой пром-сти. – 2015. – Т.27, № 1. – С. 67-70.

REFERENCES

1. Gorberg, B.L. Application of low-temperature plasma for processing materials used in the light and textile industries / B.L. Gorberg, A.I. Maksimov, B.N. Melnikov // News of universities: Chemistry and chemical technology. – 1983. – T. 24, No. 11. – P. 1158-1161.
2. Ivanov, A.A. Nonequilibrium plasma chemistry / A.A. Ivanov, T.K. Soboleva. – Moscow: Atomizdat, 1978. – 238 p.
3. Plasma-chemical reactions and processes / ed. L.S. Polaka. – Moscow: Nauka, 1977. – 486 p.
4. Rusanov, V.D. Physics of chemically active plasma / V.D. Rusanov, A.A. Friedman. – Moscow: Nauka, 1984. – 312 p.
5. Solovieva, I.A. Study of the process of dyeing wool treated with low-temperature plasma / I.A. Solovieva, I.V. Osina, S.F. Sadova // News of universities: Technology of the textile industry. – 1999. – No. 6. – P. 58-61.
6. Neborako, A.A. Study of the features of dyeing wool treated with low-temperature plasma, acid dyes containing a quaternary nitrogen atom / A.A. Neborako, S.F. Sadova // Young scientists – development of textile and light industry “Poisk-2002”: Abstracts of reports of the interuniversity scientific and technical conference of students and postgraduates. – Ivanovo, 2002. – P. 121.
7. Zabashta, V.N. Fundamentals of intensification of dyeing of polyester fibers / V.N. Zabashta. – Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1981. – 136 p.
8. Sadovaya, S.F. Study of glow discharge treatment for finishing woolen materials / S.F. Sadovaya. – Moscow: TsNIITEILegprom: Woolen industry, 1991. – No. 1. – 48 p.
9. Ivanov, N.A. Dyeing of blended textile materials by synthesis of azo dyes with covalent fixation on fiber / N.A. Ivanov, A.M. Kiselev // News of universities: Technology of light industry. – 2022. – No. 3. – P. 93-98.
10. Ivanov, N.A. Obtaining stable forms of diazoles providing covalent fixation of azo dye synthesized on fiber during textile dyeing / N.A. Ivanov, L.A. Kovzhin, A.M. Kiselev // News of universities: Technology of light industry. – 2015. – Vol. 27, No. 1. – P. 67-70.

НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ L-ЛИЗИНА: СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОТИВОГРИБКОВАЯ АКТИВНОСТЬ

SILVER NANOPARTICLES SYNTHESIZED USING L-LYSINE: STRUCTURAL FEATURES
AND ANTIFUNGAL ACTIVITY

Смирнова М.П., магистрант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Smirnova M.P., Master's student, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Буринская А.А., кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Burinskaya A.A., PhD in Technical Sciences, Docent, Senior Research Fellow, Professor, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Кудрявцева Е.В., кандидат химических наук, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Kudryavtseva E.V., PhD in Chemical Sciences, Senior Lecturer, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Амарантов С.В., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории рефлектометрии и малоуглового рассеяния Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Amarantov S.V., PhD in Physics and Mathematics, Researcher at the Laboratory of Reflectometry and Small-angle Scattering at the Kurchatov Institute of Crystallography and Photonics Research Center, Moscow, Russia

Аннотация. В статье предложен экологически безопасный метод синтеза наночастиц серебра (НЧ Ag) с использованием L-лизина в качестве восстановителя и стабилизатора. Исследовано влияние концентрации ионов серебра (0,0015 - 0,003 моль/л) на размер, монодисперсность и морфологию частиц. Установлено, что L-лизин формирует сферические наночастицы среднего размера 12 ± 2 нм с высокой стабильностью коллоидных растворов. Анализ SAXS подтвердил монодисперсность, а атомно-силовая микроскопия выявила логнормальное распределение по радиусам. Подтверждена противогрибковая активность синтезированных НЧ Ag в отношении плесневых грибов *Aspergillus terreus*, эффективность фунгицидного действия составляет 94,4 %. Результаты демонстрируют роль L-лизина в контроле морфологии частиц и перспективность применения НЧ Ag.

Ключевые слова: наночастицы серебра, L-лизин, малоугловое рентгеновское рассеяние, противогрибковая активность, биохимический синтез.

Annotation. The paper proposes an environmentally safe method for the synthesis of silver nanoparticles (Ag nanoparticles) using L-lysine as a reducing agent and stabilizer. It was investigated The influence of silver ion concentration (0.0015-0.003 mol/L) on the size, monodispersity and morphology of particles. It was found that L-lysine forms spherical nanoparticles of average size 12 ± 2 nm with high stability of colloidal solutions. SAXS analysis confirmed the monodispersity, and atomic force microscopy revealed a lognormal radius distribution. The antifungal activity of synthesized Ag NPs against the mold fungi *Aspergillus terreus*, the efficiency of the fungicidal action is 94.4 %. The results demonstrate the role of L-lysine in the control of particle morphology and promising application of Ag NPs.

Keywords: silver nanoparticles, L-lysine, small-angle X-ray scattering, antifungal activity, biochemical synthesis.

Введение

В настоящее время синтез и применение наночастиц занимают лидирующие позиции в динамично развивающейся области химических технологий. Особое внимание уделяется исследованиям наночастиц серебра различной морфологии и размеров [1]. Металлы в наноразмерном состоянии, благодаря существенно увеличенному соотношению площади поверхности к объёму, демонстрируют уникальные физико-химические свойства, что определяет высокую эффективность их применения. Широкий спектр использования наночастиц серебра в медицине, сельском хозяйстве и других отраслях науки и техники обусловлен их выраженными антибактериальными и оптическими характеристиками. В частности, данные наноматериалы применяются при разработке медицинских текстильных изделий, стоматологических имплантатов, а также в терапевтических системах и системах целевой доставки лекарственных средств [2-7].

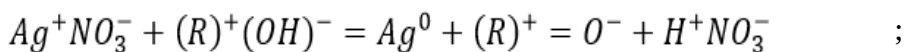
Среди многочисленных методов синтеза наночастиц серебра наиболее значимым является контролируемое восстановление ионов серебра Ag^+ в водных растворах [8].

Для разработки экологически безопасных методов синтеза наночастиц большой интерес представляет использование фитохимических компонентов. Механизм процесса основан на способности фитохимических компонентов, таких как гетероциклические алкалоиды, фенольные соединения, терпеноиды, ферменты, коферменты, белки и сахара, и другие, восстанавливать катионы металлов. Эти биологически активные вещества обладают выраженными восстановительными свойствами и способны катализировать переход катионов металлов из высших степеней окисления в термодинамически стабильное нуль-валентное состояние. В результате этого процесса происходит нуклеация и рост металлических наноструктур [9].

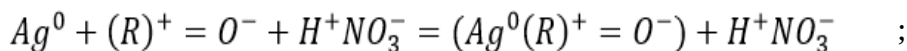
В настоящей работе синтез наноразмерных частиц серебра осуществлялся путем восстановления катионов серебра из водного раствора соли серебра с применением аминокислоты L-лизин.

Химизм процесса образования наночастиц серебра можно описать следующим образом [10]:

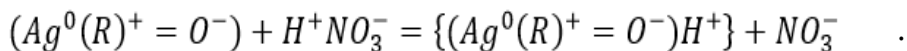
1. восстановление атомов серебра (химическая реакция)



2. образование зародышей (ван-дер-ваальсовское взаимодействие)



3. рост и образование наночастиц серебра



Объекты и методы исследования

Объект исследования – серебро азотнокислое $AgNO_3$, аминокислота L-лизин (Рис. 1).

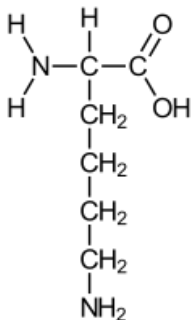


Рисунок 1 – Структурная формула L-лизина

Предположительно, L-лизин может выступать в качестве восстановителя и стабилизатора при синтезе наночастиц серебра благодаря своим структурным и химическим свойствам. Восстановительная активность связана с наличием аминогруппы ($-NH_2$), которая может отдавать электроны для восстановления ионов серебра (Ag^+ до Ag^0). Стабилизирующая роль L-лизина обусловлена его способностью образовывать защитный слой вокруг наночастиц. Функциональные группы аминокислоты (амино- и карбоксильная) взаимодействуют с поверхностью частиц, предотвращая их агрегацию. Ключевыми преимуществами L-лизина являются его нетоксичность, совместимость с биологическими системами и доступность, что упрощает синтез и расширяет потенциал применения наночастиц, в том числе, в медицине, включая создание антимикробных материалов.

Электронные спектры поглощения полученных коллоидных растворов фиксировались с использованием спектрофотометра УФ-6700. Микрофотографии наночастиц серебра (НЧ Ag) получали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) *Merlin*.

Экспериментальная часть

Одним из факторов, характеризующих антибактериальные свойства наночастиц серебра, является их размер. В связи с этим нами было изучено влияние различных условий синтеза, а также концентрации ионов серебра в исходной реакционной массе на параметры наночастиц серебра.

На рисунке 2 выборочно представлены спектры экстинкции коллоидных растворов, синтезированных при различных концентрациях нитрата серебра (в водном растворе). Как можно видеть, при увеличении концентрации $AgNO_3$ с 0,0015 моль/л до 0,003 моль/л при фиксированной концентрации L-лизина (0,07 моль/л) происходит рост оптической плотности

(А), что свидетельствует об увеличении количества синтезированных наночастиц серебра. Стабильность положения максимума поглощения ($\lambda_{\text{max}} = 415$ нм) подтверждает сохранение монодисперсности и сферической формы частиц, обусловленной эффективной стабилизацией L-лизин. Таким образом, L-лизин проявляет восстановительные свойства и является хорошим стабилизатором, обеспечивающим контроль роста наночастиц и предотвращает их агрегацию при исследуемых концентрациях ионов серебра.

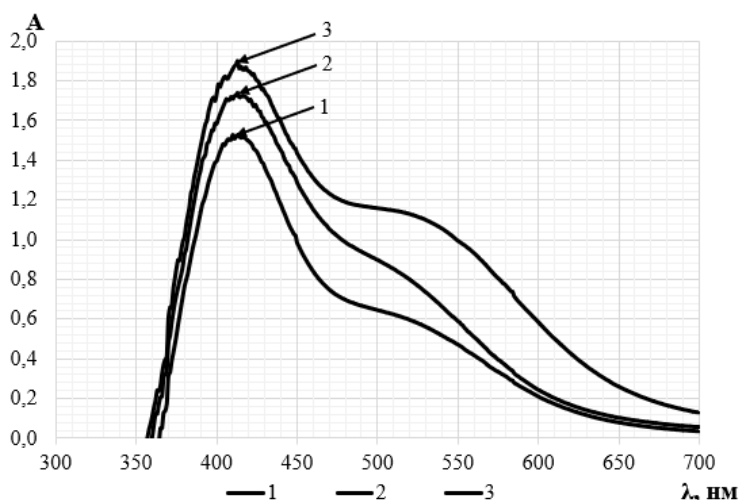


Рисунок 2 – Электронные спектры поглощения коллоидных растворов наночастиц Ag.

Исходные концентрации нитрата серебра: 1 – 0,0015; 2 – 0,002; 3 – 0,003 моль/л

СЭМ изображения на рисунке 3 подтвердили синтез сферических наночастиц серебра со средним размером (12 ± 2) нм, что согласуется с данными УФ-видимой спектроскопии ($\lambda_{\text{max}} = 415$ нм). Монодисперсность и отсутствие агрегатов свидетельствуют о высокой эффективности L-лизина как стабилизатора и восстановителя, обеспечивающего контроль морфологии за счёт координации аминогрупп с поверхностью частиц. Отсутствие дополнительных восстановителей, часто токсичных, делает синтез экологически безопасным.

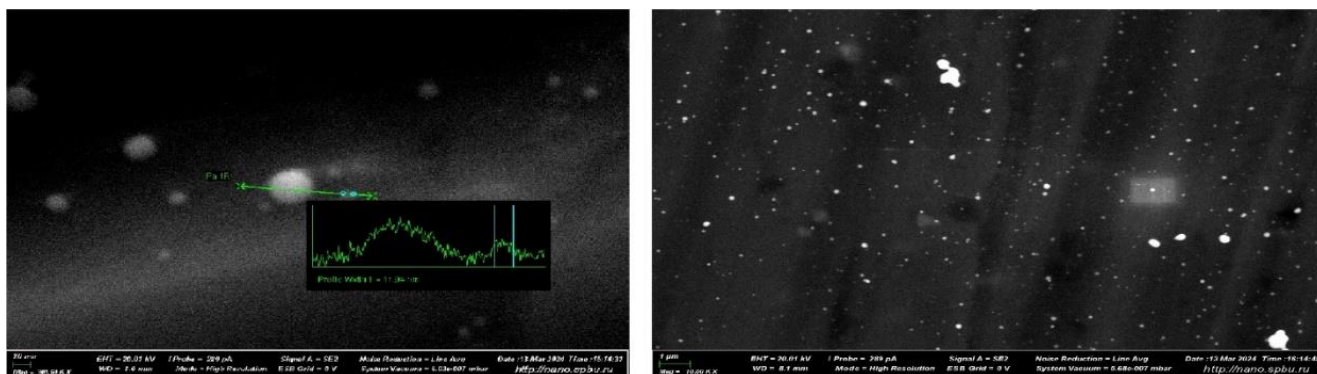


Рисунок 3 – Микрофотографии, полученных наночастиц серебра

Для более подробного изучения морфологии синтезированных наночастиц Ag был применен метод SAXS [11]. Его преимуществом является возможность исследования НЧ в растворе без предварительной подготовки образца и, как следствие, получение структурной

информации *in situ*. Этот метод позволяет оценить форму и степень агрегации НЧ, определить такие их параметры, как длина, толщина, радиус и т.п. [12]. Методом SAXS был проанализирован коллоидный раствор серебра с концентрациями реагентов: L-лизин – 0,14 моль/л; AgNO₃ – 0,0007 моль/л.

Эксперименты SAXS проводились на установке XeuSS WAXS/SAXS (Xenocs, Франция) с генератором GeniX3D ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), создающей пучок размером 300x300 мкм. Для сбора данных WAXS использовался детектор Eiger1M, расстояние образец – детектор составляло примерно 3500 мм. Для снижения фонового шума использовался метод минимальной проекции серии изображений. Переход угловой шкалы к модулю волнового вектора рассеяния $q \text{ (нм}^{-1}\text{)}$ осуществлялся с помощью измерения дифракционных максимумов рассеяния для нескольких порядков стандартного образца – бегената Ag. Схема эксперимента представлена на рисунке 4.

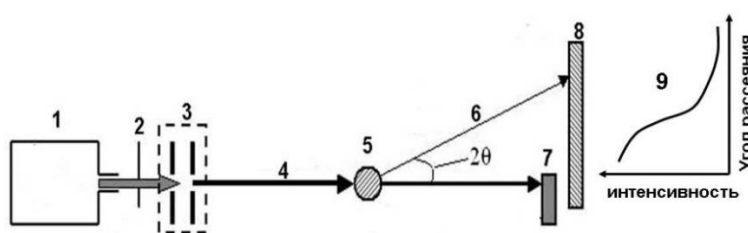


Рисунок 4 – Схема малоуглового эксперимента:

1 – источник рентгеновского излучения; 2 – узел фокусировки луча на образце;

3 – формирователь размеров рентгеновского луча – выходные щели;

4 – падающий на образец рентгеновский луч: (300 x 300) мкм; 5 – образец;

6 – рассеянное излучение; 7 – стопор прямого пучка;

8 – двумерный позиционно-чувствительный детектор; 9 – характерный вид кривой рассеяния

Предположим, что распределение частиц по массе $m(R)$ можно описать функцией распределения Шульца $f(R, R_0, \mu)$:

$$m(R, R_0, \mu) = f(R, R_0, \mu) = C \cdot x^\mu \exp(-(\mu + 1) \cdot x) \quad (1)$$

Здесь $x = R/R_0$; параметр полидисперсности μ ($\mu \geq 0$) – действительное число; постоянная C находится из условия нормировки:

$$\int_0^\infty m(R, R_0, \mu) dR = 1; \quad C = (\mu + 1)^{\mu+1} / (R_0 \Gamma(\mu + 1)) \quad (2)$$

Параметр (индекс) полидисперсности IPD определяется, как отношение стандартного отклонения STD (σ) к среднечисловому m_n значению распределения $IPD = STD/m_n = 1/(\mu+1)$, где μ ($\mu \geq 0$) – параметр в распределении Шульца.

В качестве полидисперсной модели возьмем систему невзаимодействующих частиц различных радиусов R_k , тогда связь между интенсивностью рассеяния $I(s)$ от такой многокомпонентной системы и распределением частиц по объемам можно записать в виде:

$$I(q) = \sum_k \alpha_k I_k(q) = \sum_k w_k V_k^2 I_k(q) \quad (3)$$

Весовые коэффициенты α_k и w_k в (3) связаны соотношениями: $\alpha_k = W_k V_k^2$, где $V_k = V(R_{0k})$ – объем k -й фракции. Тогда $W_k = \alpha_k / V_k^2$. Нормируя весовые вклады на их сумму: $|W| = \sum_k W_k$, получим нормированный весовой множитель $w_k = W_k / |W|$. Тогда сумма $w_k = w(R_{0k})$ даст искомое распределение по объемам:

$$D_V(R) = \sum_{k=1}^M w_k f_k(z, R_0, R). \quad (4)$$

Таким образом, мы определили $D_V(R)$ как функцию распределения однородных шаров радиуса R_k , рассеяние от каждого из которых определяется квадратом формфактора, а сами радиусы подчиняются распределению Шульца:

$$f_k(z, R_0, R) = C_k x^{z_1} \exp(-z_1 \cdot x), \quad (5)$$

где $x = R_k / R_0$; $C = z_1^{z_1} / \Gamma(z_1)$; $z_1 = z + 1 = (R_0 / \sigma)^2$; R_0 – среднее значение размера частицы; σ – стандартное отклонение; $\Gamma(z)$ – гамма-функция. Каждая компонента $I_k(q)$ в выражении (1) рассчитывается по формуле:

$$I_k(q) = \int_0^\infty f_k(z, R_0, R) V_k(R) \Phi_k^2(qR) dR, \quad (6)$$

где $V(R_i)$ – объём частиц радиуса R_i ; $\Phi_k^2(qR)$ – квадрат малоуглового формфактора однородного шара [13]:

$$\Phi_k(qR) = [3(\sin(qR) - qR \cos(qR)) / (qR)^3]^2. \quad (7)$$

В данной работе мы ограничиваемся четырех $M = 4$ или пятикомпонентным составом образца $M = 5$.

Задача минимизации целевой функции F_D имеет общий вид:

$$\min_D F_D = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M (I_{\text{exp}}(q_i) - f_k(\omega, q_i))^2. \quad (8)$$

В нашем случае: $D = \{q_k, I_k\}_{k=1}^N$, где N – число точек на экспериментальной кривой рассеяния; $I_{\text{exp},k}$ – экспериментальное значение интенсивности в точке q_k ; $I_{\text{mod}}(\omega, q_k)$ – интенсивность для модели; $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$ – вектор параметров модели; $\omega_{1,k} = w_k$ – парциальный вклад; $\omega_{2,k} = R_{0k}$ – средний радиус; $\omega_{3,k} = z_k$ – параметр в распределении; k – число параметров ($k = 1, \dots, M$). Минимизация осуществлялась методом Левенберга–Марквардта (Levenberg–Marquardt) [13], усиленной схемой с переменной метрикой [14], используемой в программе MIXTURE. Рассчитав, по формуле (5) модельную кривую с минимальной невязкой мы находим параметры для графика распределения частиц по объемам в зависимости от радиуса $D_V(R)$ согласно формуле (2).

На рисунке 5 в левом столбце показаны результаты фитирования модельных кривых (красная линия) к эксперименту, соответственно, для каждого образца, в правом столбце представлена функция распределения объемов частиц в зависимости от их радиусов D_V , штриховкой выделена компонента распределения с $\min$ радиусом, для неё указано: среднее значение R_0 с его стандартным отклонением (STD) и мода R_{Mo} (положение $\max$).

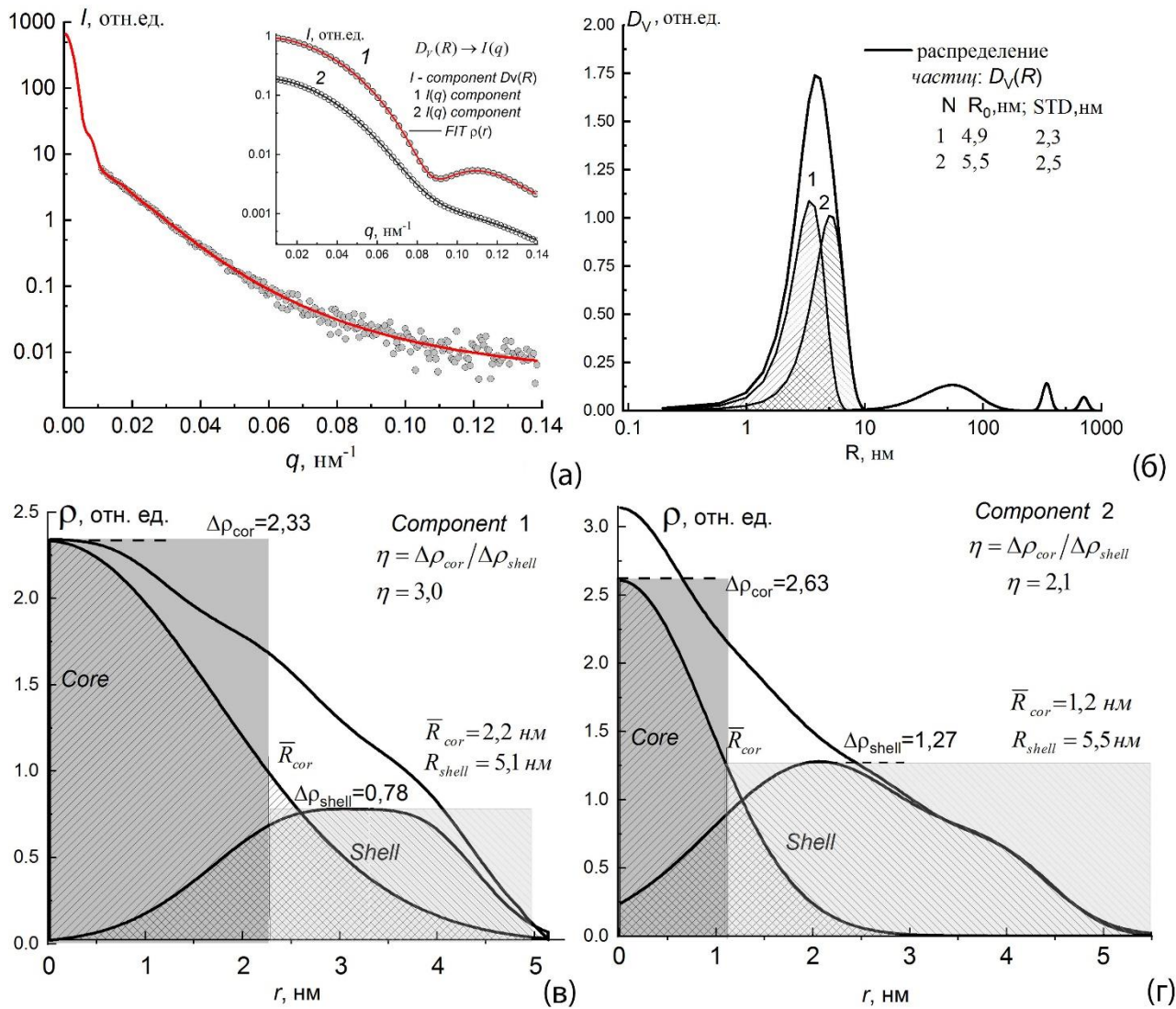


Рисунок 4 – (а) – экспериментальная кривая рассеяния (точки), красная линия – модельная кривая, полученная по распределению частиц (б) по радиусам D_V ; на вставке к (а) показаны компоненты для интенсивности от компонент D_1 и D_2 (б); (в) и (г) – рассчитанные радиальные распределения плотности для этих двух компонент и разделение на более плотное ядро и менее плотную оболочку (прямоугольный фон соответствует ступенчатому профилю модели «ядро-оболочка»)

Радиальное распределение плотности $\rho(r)$ рассчитывали как сумму ряда $\rho(r) \approx \rho_L(r) = \sum_{l=0}^L \rho_l(r)$, вычисляя парциальные плотности из парциальных амплитуд рассеяния $A_l(q)$ с помощью преобразования Ханкеля:

$$\rho_l(r) = (-1)^l \sqrt{2/\pi} \int_0^{q_{\text{max}}} q^2 A_l(q) J_l(qr) dq,$$

где $I(q) = 2\pi^2 \sum_{l=0}^L |A_l(q)|^2$; $J_l(qr)$ – функция Бесселя первого рода порядка l . Поскольку интенсивность рассеяния инвариантна относительно смены знака коэффициентов радиальной функции плотности, в качестве критерия сходимости использовали R -фактор для обеих этих функций в виде:

$$R(I_{exp}, I_{mod}^{(k)}) = \int_0^\infty [I_{exp}(q) - I_{mod}^{(k)}(q)]^2 q^4 dq / \int_0^\infty I_{exp}^2(q) q^4 dq,$$

$$R(\rho_l^{(k)}, \rho_l^{(k+1)}) = \int_0^R [\rho_l^{(k)}(r) - \rho_l^{(k+1)}(r)]^2 r^2 dr / \int_0^R [\rho_l^{(k)}(r)]^2 dr,$$

где k – число итераций.

Кривая рассеяния от раствора НЧ серебра с концентрацией $c=0,016$ м% представлена на рисунке 5а, вычисленное из неё распределение частиц по размерам представлено на рисунке 5б. Как мы видим, основной вклад в рассеяние дают две компоненты 1 и 2.

Вычисление радиуса инерции частицы из модели «ядро-оболочка» со ступенчатым профилем плотности можно получить из приближения Гинье для интенсивности рассеяния рассчитанной по формуле:

$$I_{mod}(q, R_0, R_{core}, \eta) = \langle n_e \rangle^2 \frac{\langle [R_0^3 \Phi(qR_0) + (\eta-1)R_{core}^3 \Phi(qR_{core})]^2 \rangle_\Omega}{[R_0^3 + (\eta-1)R_{core}^3]^2}. \quad (9)$$

Здесь $\Phi(qR_0)$, $\Phi(qR_{core})$ – формфактор шара с соответствующей амплитудой рассеяния для оболочки радиуса R_0 и ядра радиуса R_{core} ; $\langle n_e \rangle^2$ – квадрат среднего числа электронов, участвующих в рассеянии; $\eta = \Delta\rho_{cor} / \Delta\rho_{shell}$ – отношение рассеивающего контраста плотности ядра и оболочки. Сравнивая с приближением Гинье (Guinier) [15]:

$$I(q)|_{qR \ll 1} = (\Delta n_e)^2 \exp(-(q^2 R_g^2 / 3)) \approx (\Delta\rho)^2 V^2 (1 - (q^2 R_g^2 / 3)) \quad , \quad (10)$$

где R_g – радиус инерции частицы; $\Delta\rho$ – её рассеивающий контраст; V – объём частицы, получим:

$$I_{mod}(q)|_{qR_0 \ll 1} \approx \langle n_e \rangle^2 \left(1 - \frac{1}{5} \cdot \frac{R_0^5 + (\eta-1)R_{core}^5}{R_0^3 + (\eta-1)R_{core}^3} \cdot q^2 \right). \quad (11)$$

Следовательно, радиус инерции для двухступенчатой модели НЧ «ядро-оболочка» можно из соотношения:

$$R_g = \sqrt{\frac{3}{5} \cdot \frac{R_0^5 + (\eta-1)R_{core}^5}{R_0^3 + (\eta-1)R_{core}^3}}. \quad (12)$$

Расчет радиусов инерции по формуле (12) для ступенчатой модели ядра и оболочки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры профиля плотности и расчет радиуса инерции НЧ

(R_{cor} – радиус ядра; R_0 – радиус оболочки; $\eta = \Delta\rho_{cor} / \Delta\rho_{shell}$ – отношение рассеивающего контраста плотности ядра и оболочки)

N	R_{cor} , нм	R_0 , нм	η	R_g , нм
1	2,2	4,9	3,0	3,6
2	1,2	5,5	2,1	4,2

На рисунке 6а представлены изображения поверхности образцов Ag ~0,016 м%, на рисунке 6б –соответствующие им рассчитанные гистограммы распределения частиц по радиусам. Из гистограммы рассчитывалось две модели распределения частиц: логнормальное

распределение и кривая сглаживания гистограммы, последняя раскладывалась на гауссовы компоненты: со средним значение радиуса R (нм) каждой компоненты и её стандартным отклонением (STD) σ (нм).

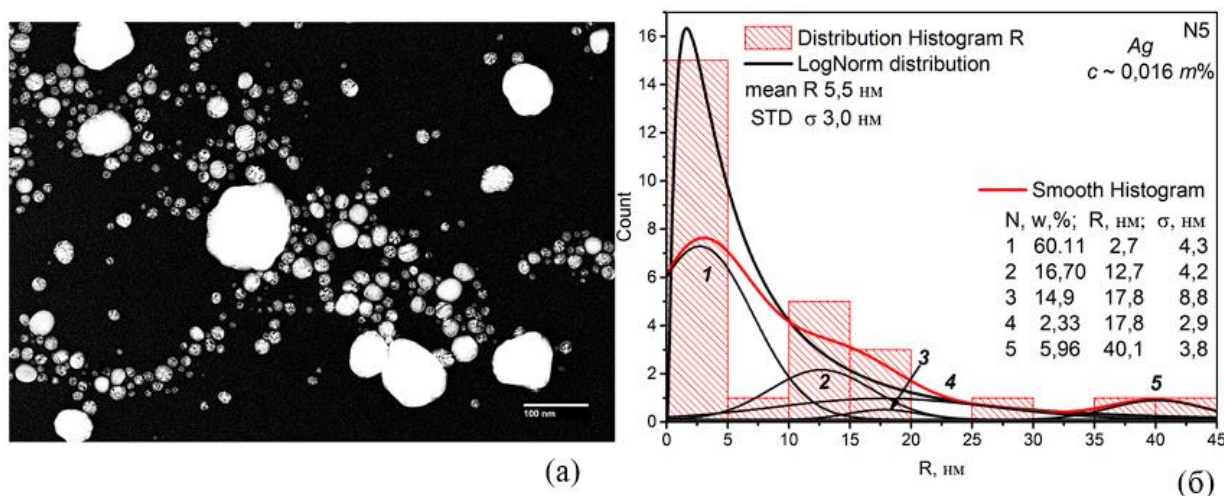


Рисунок 6 – Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), прибор JEM-2100Plus: (а) – изображение поверхности; (б) – соответствующая (а) гистограмма распределения с разложением её на $N = 5$ компонент

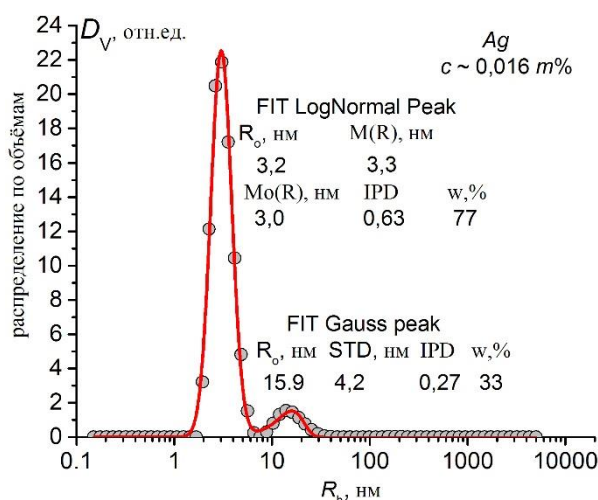


Рисунок 7 – Распределение частиц по объёмам, полученное методом ДРС

На рисунке 7 показано распределение частиц по объёмам, полученное методом ДРС. Оно содержит две фракции. Основная с весом w 77% с логнормальным распределением имеет среднее значение гидродинамического радиуса $M(R_h) = 3,3$ нм и моду $Mo(R_h) = 3,0$ нм, индекс полидисперсности IPD 0,63. Вторая фракция с весом 33% соответствует агрегатам с гауссовым распределением частиц радиуса $R_h = 15,9$ нм и IPD 0,27. Как видно из рисунка 7, в растворе преимущественно зафиксированы наночастицы диаметром 5,4 нм ($R = 2,7$ нм) (60,11 %). Наночастицы диаметром 25,4 нм составляют 16,7 %, наночастицы диаметром 35,6 нм – 17,23 %.

Методом динамического лазерного светорассеяния ДРС (DLS) было получено распределение частиц по объемам в зависимости от их гидродинамического радиуса, вычисленного из коэффициента поступательной диффузии по формуле Стокса-Эйнштейна. Эксперимент был проведен на приборе Zetasizer Pro фирмы Malvern Panalytical, угол рассеяния 173° , рабочая длина волны лазерного излучения 632,8 нм.

Результаты исследований раствора НЧ серебра ($c = 0,016$ мас. %), проведенных тремя различными методами, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сводная таблица характерных радиусов НЧ серебра

Метод	Радиус НЧ R, нм	Стандартное отклонение STD, нм	Полидисперсность IPD
МУРР/SAXS	4,9	2,3	0,46
	5,5	2,5	0,26
ДРС/DLS	3,3	2,6	0,63
ПЭМ/ТЕМ	2,7	2,7	0,30

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что наименьшее значение радиуса НЧ дает метод ПЭМ, наибольший – метод SAXS, а метод ДРС дает промежуточное значение. Такое различие между ТЕМ и SAXS говорит о существенной неоднородности плотности внутри частицы. Поскольку электроны в методе ТЕМ более сильно взаимодействуют, чем рентгеновские лучи в методе SAXS, то можно предположить, что НЧ серебра имеют структуру вида «ядро-оболочка» с плотным ядром и менее плотной оболочкой. Из проведенного расчета радиальной плотности внутри частиц следует, что в растворе, в основном, присутствуют две компоненты НЧ с приблизительно равными размерами около 5 нм, но с разным распределением плотности внутри них. В первой компоненте в объеме частицы преобладает более плотное ядро (Рис. 6в), во второй компоненте – наоборот больший объем занимает оболочка (Рис. 5г). Более рыхлая оболочка, переходящая в приповерхностный слой, создает для него более высокую шероховатость поверхности НЧ, следовательно, увеличивает площадь контакта с микроорганизмами, что повышает эффективность взаимодействия НЧ с ними.

Кристаллическая структура синтезированных наночастиц серебра определяет их физико-химические свойства, включая морфологию, распределение по размерам и наличие поверхностных дефектов. Эти параметры напрямую влияют на биологическую активность наночастиц серебра, в частности, на их антимикробные и противогрибковые свойства.

Одним из перспективных направлений применения наночастиц серебра является их использование в качестве противогрибковых агентов. Высокая удельная поверхность наночастиц способствует эффективному взаимодействию с клеточными мембранами микроорганизмов, генерация активных форм кислорода (АФК) индуцирует окислительный стресс, приводящий к гибели грибковых клеток.

В ходе исследований проведены испытания на стойкость к воздействию плесневых грибов в течение 28 суток в соответствии с ГОСТ 9.048-89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к

воздействию плесневых грибов». Для исследования был использован коллоидный раствор наночастиц серебра с концентрациями реагентов: L-лизин 0,14 моль/л; AgNO₃ 0,0007 моль/л. Исследуемый раствор объемом 1 мл помещали в центр чашки Петри на предварительно подготовленную питательную среду Чапека-Докса – распыленную суспензию спор грибов *Aspergillus terreus*. Затем чашку Петри ставили в инкубатор *Avantgarde.Line* с естественной конвекцией фирмы *Binder* (Германия), модель BD 56. Испытания проводились при температуре (29±2) °С и относительной влажности более 90% в течение 28 суток.

Эффективность фунгицидного действия коллоидного раствора серебра можно рассчитывалась по формуле:

$$\text{Эффективность} = \frac{\text{площадь контр.образца} - \text{площадь обраб.образца}}{\text{площадь контр.образца}} \cdot 100 \quad ,$$

$$\text{Эффективность} = \frac{90\% - 5\%}{90\%} \cdot 100\% \approx 94,4\% .$$

Результаты исследования коллоидного раствора на противогрибковую активность представлены на рисунке 8.

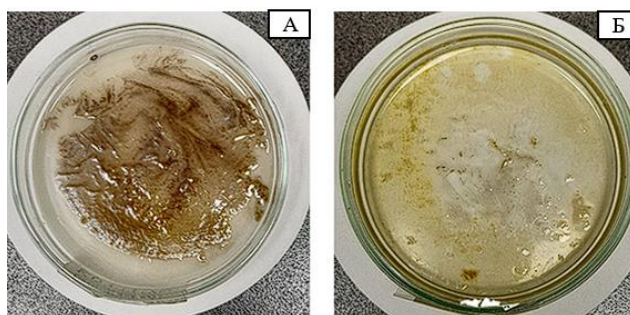


Рисунок 8 – Исследование на противогрибковую активность коллоидного раствора:
А – контрольный образец без добавления НЧ Ag; Б – 1 мл коллоидного раствора НЧС

Из рисунка 8 видно, что контрольный образец (Рис. 7А) покрыт плесенью на 90 % от общей площади, а содержащий 1 мл коллоидного раствора наночастиц серебра образец, (Рис. 7Б) – на 5 % от общей площади.

Приведенные исследования доказывают, что наночастицы серебра могут эффективно замедлять рост плесневых грибов, что подтверждает их антимикробную активность.

Заключение

В ходе исследований осуществлен экологически безопасный синтез наночастиц серебра (НЧ Ag) с использованием L-лизина в качестве биосовместимого восстановителя и стабилизатора. Применение L-лизина позволило получить монодисперсные сферические частицы со средним размером (12 ± 2) нм, что подтверждено комплексом методов исследования, включая УФ-видимую спектроскопию ($\lambda_{\text{max}} = 415 \text{ нм}$), сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и малоугловое рентгеновское рассеяние (SAXS). Анализ SAXS выявил узкое распределение частиц по размерам, а данные атомно-силовой микроскопии (ASM) подтвердили логнормальный характер распределения. Это свидетельствует о высокой

стабильности коллоидных систем при варьировании концентрации ионов серебра от 0,0015 моль/л до 0,003 моль/л.

Практическая значимость исследования подтверждена результатами испытаний на противогрибковую активность в отношении *Aspergillus terreus*. Введение коллоидного раствора НЧ Ag в питательную среду, зараженную плесневыми грибами, показало эффективность фунгицидного действия выше 90 %. Полученные результаты подтверждают возможность использования наночастиц серебра при создании антимикробных покрытий, в том числе для защиты материалов от биологического разрушения.

Работа проведена в рамках государственного проекта «Приоритет – 2030» и выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оленин, А.Ю. Получение и применение химически модифицированных наночастиц благородных металлов (обзор) / А.Ю. Оленин, Г.В. Лисичкин // Журнал прикладной химии. – 2018. – Т. 91, № 9. – С. 1219-1240.
2. Sulfanilamide and silver nanoparticles-loaded polyvinyl alcoholchitosan composite electrospun nanofibers: Synthesis and evaluation on synergism in wound healing / M. Ganesh, A.S. Aziz, U. Ubaidulla, P. Hemalatha, A. Saravanakumar, R. Ravikumar, M.M. Peng, E.Y. Choi, H.T. Jang // J. Ind. Eng. Chem. – 2016. – Vol. 39. – P. 127-135.
3. Биомедицинское применение наночастиц серебра (обзор) / Д.Т. Реджепов, А.А. Водяшкин, А.В. Сергородцева, Я.М. Станишевский // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2021. – Т. 10, № 3. – С. 176- 187.
4. Shenashen, M.A. Synthesis, Morphological control, and properties of silver nanoparticles in potential applications / M.A. Shenashen, S.A. El-Safty, E.A. Elshehy // Particle and Particle Systems Characterization – 2014. – Vol. 31, No. 3. – P. 293-316.
5. Boeva, O. Influence of the nature of IB group metals on catalytic activity in reactions of homomolecular hydrogen exchange on Cu, Ag, Au nanoparticles / O. Boeva, A. Antonov, K. Zhavoronkova // Catalysis Communications – 2021. – Vol. 148. – Art. No. 106173.
6. Hamza, M.E. Plasmonic Biosensors: Review / M.E. Hamza, M.A. Othman, M.A. Swillam // Biology. – 2022. – Vol. 11, No. 5. – Art. No. 621. – <https://doi.org/10.3390/biology11050621>.
7. Role of gold and silver nanoparticles in cancer nano-medicine / H. Chugh, D. Sood, I. Chandra, V. Tomar, G. Dhawan, R. Chandra // Artif. Cells Nanomed. Biotechnol. – 2018. – Vol. 46, No. sup 1. – P. 1210-1220.
8. Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety / L. Xu, Y.Y. Wang, J. Huang, C.Y. Chen, Z.X. Wang, H. Xie // Theranostics – 2020. – Vol. 10, No. 20. – P. 8996-9031.
9. Dwivedi, A.D. Biosynthesis of silver and gold nanoparticles using *Chenopodium album* leaf extract / A.D. Dwivedi, K. Gopal // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2010. – Vol. 369, Iss. 1-3. – P. 27-33.
10. Расмагин, С.И. Свойства наночастиц серебра в присутствии диспрозия / С.И. Расмагин, В.И. Крыштоб, И.К. Новиков // Журнал технической физики. – 2018. – № 12. – С. 1868-1872.

11. Henglein, A. Formation of colloidal silver nanoparticles: capping action of citrate / A. Henglein, M. Giersig // *Journal of Physical Chemistry B.* – 1999. – Vol. 103. – P. 9533-9539.
12. Фейгин, Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние / Л.А. Фейгин, Д.И. Свергун. – Москва: Наука, 1986. – 280 с.
13. Dennis, J.E. Nonlinear least squares and equations / J.E. Dennis // *The state of the art in numerical analysis : proceedings of the Conference on the State of the Art in Numerical Analysis held at the University of York, April 12th-15th, 1976 / organized by the Institute of Mathematics and its Applications ; edited by D. Jacobs.* – London ; New York : Academic Press, 1977. – P. 269-312.
14. Dennis, J.E. An adaptive nonlinear least-squares algorithm / J.E. Dennis, D.M. Gay, R.E. Welsch // *ACM Transactions on Mathematical Software.* – 1981. – Vol. 7, No. 3. – P. 348 – 368.
15. Glatter, G. Small angle x-ray scattering / O. Glatter, O. Kratky. – London ; New York : Academic Press, 1982. – 515 p.

REFERENCES

1. Olenin, A.Yu. Production and application of chemically modified nanoparticles of noble metals (review) / A.Yu. Olenin, G.V. Lisichkin // *Journal of Applied Chemistry.* – 2018. – Vol. 91, No. 9. – P. 1219-1240.
2. Sulfanilamide and silver nanoparticles-loaded polyvinyl alcoholchitosan composite electrospun nanofibers: Synthesis and evaluation on synergism in wound healing / M. Ganesh, A.S. Aziz, U. Ubaidulla, P. Hemalatha, A. Saravanakumar, R. Ravikumar, M.M. Peng, E.Y. Choi, H.T. Jang // *J. Ind. Eng. Chem.* – 2016. – Vol. 39. – P. 127-135.
3. Biomedical application of silver nanoparticles (review) / D.T. Redzhepov, A.A. Vodyashkin, A.V. Sergorodtseva, Ya.M. Stanishevsky // *Development and registration of drugs.* – 2021. – Vol. 10, No. 3. – P. 176-187.
4. Shenashen, M.A. Synthesis, Morphological control, and properties of silver nanoparticles in potential applications / M.A. Shenashen, S.A. El-Safty, E.A. Elshehy // *Particle and Particle Systems Characterization* – 2014. – Vol. 31, No. 3. – P. 293-316.
5. Boeva, O. Influence of the nature of IB group metals on catalytic activity in reactions of homomolecular hydrogen exchange on Cu, Ag, Au nanoparticles / O. Boeva, A. Antonov, K. Zhavoronkova // *Catalysis Communications* – 2021. – Vol. 148. – Art. No. 106173.
6. Hamza, M.E. Plasmonic Biosensors: Review / M.E. Hamza, M.A. Othman, M.A. Swillam // *Biology.* – 2022. – Vol. 11, No. 5. – Art. No. 621. – <https://doi.org/10.3390/biology11050621>.
7. Role of gold and silver nanoparticles in cancer nano-medicine / H. Chugh, D. Sood, I. Chandra, V. Tomar, G. Dhawan, R. Chandra // *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.* – 2018. – Vol. 46, No. sup 1. – P. 1210-1220.
8. Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety / L. Xu, Y.Y. Wang, J. Huang, C.Y. Chen, Z.X. Wang, H. Xie // *Theranostics* – 2020. – Vol. 10, No. 20. – P. 8996-9031.
9. Dwivedi, A.D. Biosynthesis of silver and gold nanoparticles using *Chenopodium album* leaf extract / A.D. Dwivedi, K. Gopal // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2010. – Vol. 369, Iss. 1-3. – P. 27-33.

10. Rasmagin, S.I. Properties of silver nanoparticles in the presence of dysprosium / S.I. Rasmagin, V.I. Kryshtob, I.K. Novikov // Journal of Technical Physics. – 2018. – No. 12. – P. 1868-1872.
11. Henglein, A. Formation of colloidal silver nanoparticles: capping action of citrate / A. Henglein, M. Giersig // Journal of Physical Chemistry B. – 1999. – Vol. 103. – P. 9533-9539.
12. Feigin, L.A. X-ray and neutron small-angle scattering / L.A. Feigin, D.I. Overthorpe. – Moscow: Nauka, 1986. – 280 p.
13. Dennis, J.E. Nonlinear least squares and equations / J.E. Dennis // The state of the art in numerical analysis : proceedings of the Conference on the State of the Art in Numerical Analysis held at the University of York, April 12th-15th, 1976 / organized by the Institute of Mathematics and its Applications ; edited by D. Jacobs. – London ; New York : Academic Press, 1977. – P. 269-312.
14. Dennis, J.E. An adaptive nonlinear least-squares algorithm / J.E. Dennis, D.M. Gay, R.E. Welsch // ACM Transactions on Mathematical Software. – 1981. – Vol. 7, No. 3. – P. 348 – 368.
15. Glatter, G. Small angle x-ray scattering / O. Glatter, O. Kratky. – London ; New York : Academic Press, 1982. – 515 p.

СИНТЕЗ СТАБИЛЬНЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СРЕДЫ

THE INFLUENCE OF pH ON THE SYNTHESIS OF STABLE COLLOIDAL SOLUTIONS OF
COPPER (I) OXIDE NANOPARTICLES

Шарапова А.А., магистрант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Sharapova A.A., Master's student, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Буринская А.А., кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Burinskaya A.A., PhD in Technical Sciences, Docent, Senior Research Fellow, Professor, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация. В работе исследован процесс синтеза наночастиц оксида меди (I) (Cu_2O) методом восстановления ионов меди аскорбиновой кислотой в присутствии полиэтиленгликоля (ПЭГ-1500) в качестве стабилизатора. Установлено, что pH является ключевым фактором, влияющим на концентрацию и размер наночастиц. Результаты электронных спектров поглощения подтверждают формирование наночастиц с характерным плазмонным резонансом в области 300 – 350 нм. В работе предложены оптимальные условия синтеза стабильных коллоидных растворов Cu_2O .

Ключевые слова: оксид меди (I), pH среды, полиэтиленгликоль, аскорбиновая кислота, фотокатализатор.

Abstract. This paper investigates the synthesis of copper(I) oxide (Cu_2O) nanoparticles by reducing copper ions with ascorbic acid in the presence of polyethylene glycol (PEG) as a stabilizer. It has been found that pH is a key factor influencing both the concentration and the size of the nanoparticles. The electronic absorption spectra confirm the formation of nanoparticles exhibiting a characteristic surface plasmon resonance in the 300–350 nm range. The obtained data make it possible to recommend optimal conditions for the synthesis of stable Cu_2O colloidal solutions, which hold promise for photocatalytic applications.

Keywords: copper(I) oxide, pH medium, polyethylene glycol, ascorbic acid, photocatalyst.

В условиях нарастающей антропогенной нагрузки на экосистему одной из ключевых проблем остается загрязнение окружающей среды органическими соединениями. Традиционные методы обезвреживания таких загрязнителей часто оказываются либо недостаточно эффективными, либо требуют значительных экономических затрат на реагенты и энергию. В настоящее время перспективным направлением становится использование

фотокатализаторов, среди которых особое место занимают наночастицы оксида меди (I) (Cu_2O) благодаря своей высокой эффективности и относительно низкой стоимости [1-4].

Наночастицы оксида меди (I) обладают рядом усиленных физических и химических свойств, в том числе выраженными фотокаталитическими свойствами. При облучении видимым ультрафиолетовым светом наночастицы Cu_2O способны генерировать электронно-дырочные пары, которые инициируют окислительно-восстановительные реакции на поверхности фотокатализатора. В результате происходит разрушение органических загрязнителей до простейших соединений (CO_2 , H_2O и др.). Высокая удельная поверхность наночастиц способствует повышенной эффективности данных процессов [5-7].

Синтез наночастиц оксида меди (I) можно разделить на три основные категории: физические, химические и биогенные методы. Физические методы включают в себя процессы измельчения и диспергирования крупных частиц меди или ее соединений до наноразмеров с помощью высокоэнергетических мельниц, ультразвуковой обработки, электрических взрывов и др. Химические методы включают соосаждение, химическое восстановление, синтез в микроэмульсиях и др., позволяющие более точно контролировать размер и морфологию наночастиц. Биогенные методы используют способность микроорганизмов или растительных экстрактов восстанавливать и стабилизировать металлические соединения, что делает синтез экологически более безопасным и энергетически менее затратным [8-13].

В данной работе исследуется синтез стабильных коллоидных растворов наночастиц оксида меди (I) с использованием аскорбиновой кислоты в качестве восстановителя, данный синтез является экологически безопасным, экономически выгодным и обеспечивает возможность модифицировать материалы для придания им требуемых функциональных свойств.

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность синтеза коллоидных растворов наночастиц, является значение pH реакционной среды. Кислотно-щелочной баланс влияет на степень ионизации функциональных групп стабилизатора, протекание окислительно-восстановительных реакций, а также на равновесие между различными формами ионов металлов в растворе. Поддержание требуемого диапазона pH является важным условием для получения наночастиц с заданными морфологическими и физико-химическими характеристиками.

В настоящей работе в качестве стабилизатора используется полиэтиленгликоль (ПЭГ-1500) в концентрации 0,1%, в качестве прекурсора – сульфат меди (0,8 мМ), в качестве восстановителя – аскорбиновая кислота (0,064 М).

На рисунке 1 представлены электронные спектры поглощения синтезированных коллоидных растворов. Уровень pH растворов варьировался в диапазоне от 4 до 12 для оценки его влияния на процесс формирования и стабилизации наночастиц. В ходе реакции цвет коллоидных растворов менялся от бесцветного до желтого, тёмно-янтарного с экстинкцией при длине волны $\lambda \approx 300\text{--}350$ нм, что соответствует поверхностному плазмонному резонансу наночастиц Cu_2O . Кривые 1, 7, 8 и 9, соответствующие pH 4, 10, 11 и 12, имеют наиболее интенсивный пик поглощения, указывающий на высокую концентрацию наночастиц в коллоидном растворе. Кривая 4 (pH 7) также демонстрирует выраженный пик. Однако, он

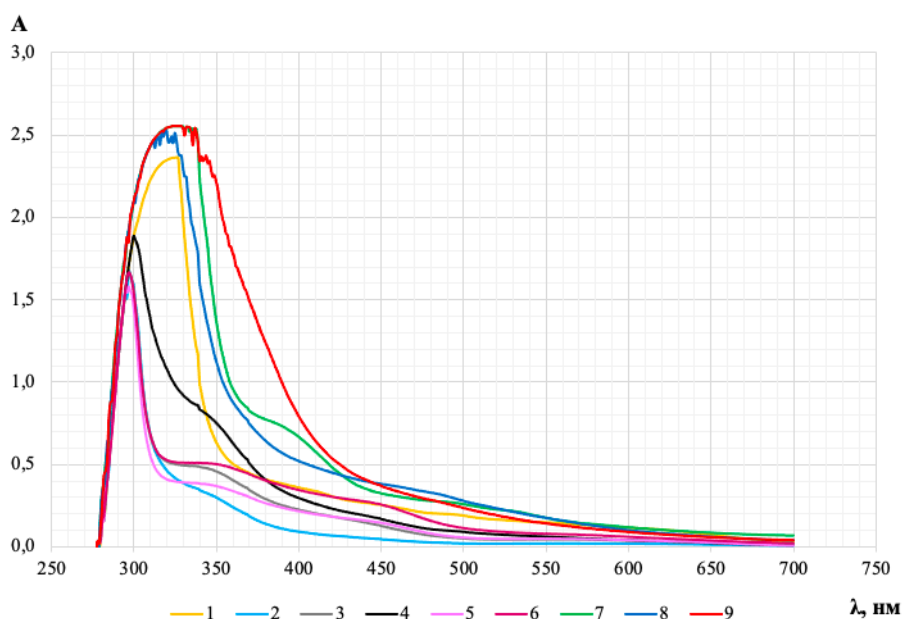


Рисунок 1 – Электронные спектры поглощения коллоидных растворов наночастиц Cu_2O синтезируемые при разном уровне pH: 1 – pH 4; 2 – pH 5; 3 – pH 6; 4 – pH 7; 5 – pH 8; 6 – pH 9; 7 – pH 10; 8 – pH 11; 9 – pH 12

несколько ниже, что свидетельствует о меньшем количестве синтезированных наночастиц. Кривые 2, 3, 5 и 6 (pH 5, 6, 8 и 9) имеют относительно низкие пики, что может свидетельствовать об относительно небольшой концентрации наночастиц Cu_2O в этих условиях.

Таким образом, результаты спектральных исследований свидетельствуют о том, что в кислой и сильно щелочной средах наблюдается ярко выраженный максимум поглощения в области 300 – 350 нм, указывающий о большой концентрации наночастиц в растворах. Следовательно, наиболее благоприятными условиями для формирования высокой концентрации наночастиц Cu_2O оказываются кислая (pH 4) и щелочная (pH 10-12) среды, в то время как при нейтральных и близких к ней значениях pH реакции синтеза и стабилизации протекают менее эффективно. Полученные растворы сохраняют стабильность 6 месяцев и больше при использовании ПЭГ-1500.

Для изучения морфологии и размера наночастиц проводили модификацию углеродного волокна полученными коллоидными растворами наночастиц Cu_2O . Исследование осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), позволяющем получать микрофотографии с высоким разрешением. На рисунке 2 представлены микрофотографии углеродного волокна, модифицированного наночастицами. Микроскопическое исследование наночастиц оксида меди (Cu_2O) позволило детально изучить их морфологию и размеры. В рамках исследования использовались сканирующий электронный микроскоп *JEOL JSM– 6390 LA* (СЭМ) и образцы, модифицированные с помощью коллоидных растворов наночастиц. Полученные результаты показали, что синтезированные наночастицы имеют сложную зависимость морфологии и размера от условий среды.

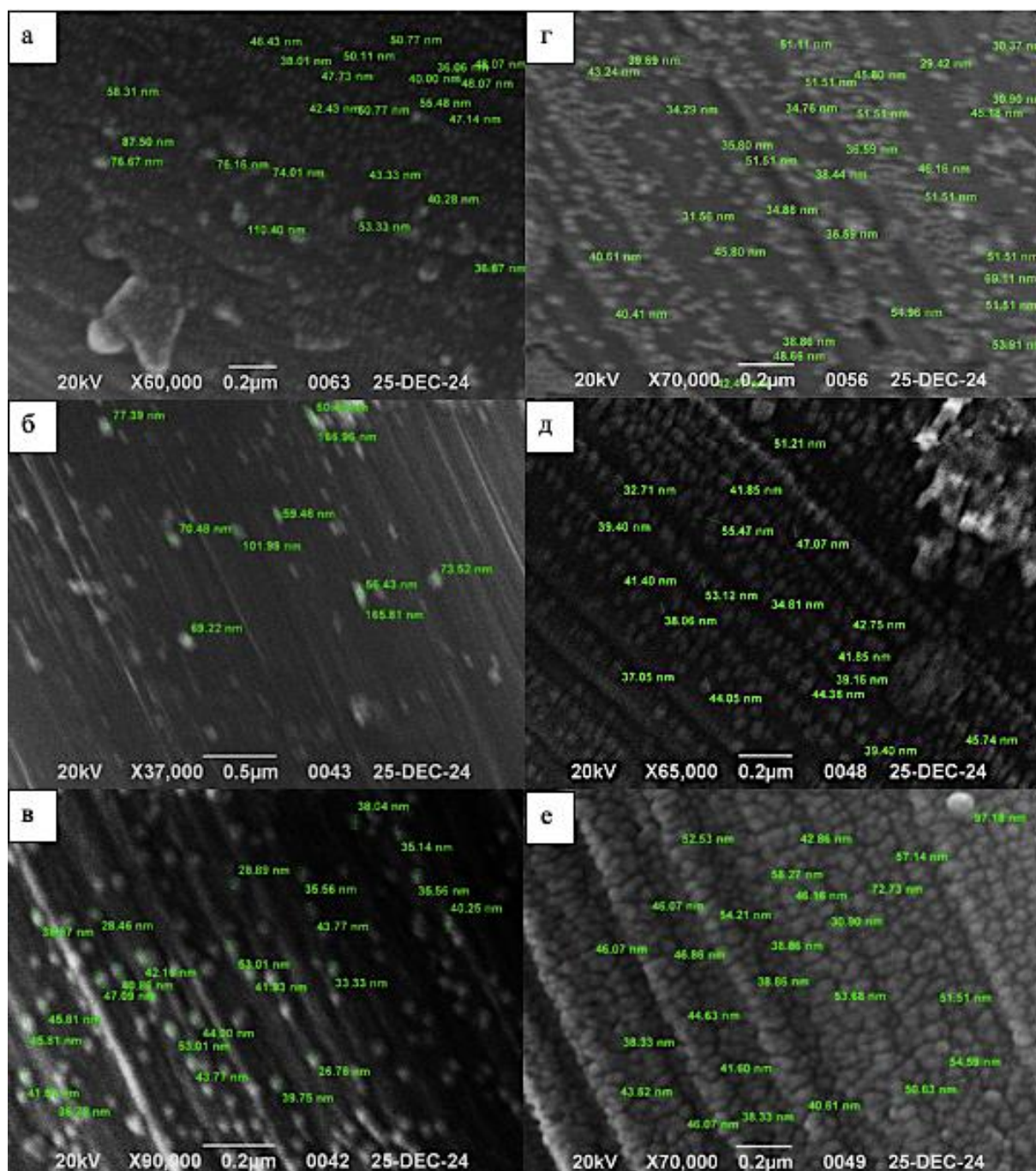


Рисунок 2 – Микрофотографии углеродного волокна, модифицированного коллоидными растворами наночастиц Cu_2O при разном уровне pH: а – pH 4; б – pH 5; в – pH 7; г – pH 10; д – pH 11; е – pH 12

На микрофотографии образца (Рис. 2а) наблюдаются наночастицы сферической формы с размерами от 30 до 50 нм. Морфология частиц характеризуется относительно однородным распределением по поверхности углеродного волокна (синтез при pH 4).

При pH 5 наночастицы вытягиваются и приобретают эллипсоидную форму, их длина 70 - 150 нм. Микрофотографии фиксируют неравномерное распределение частиц по поверхности углеродного волокна и относительно ограниченное количество.

Образцы, полученные при pH 7, демонстрируют наночастицы диаметром 15 - 45 нм сферической формы и равномерно распределенные по поверхности, но их концентрация

значительно меньше, что коррелирует со спектральными кривыми. Микрофотографии указывают на отсутствие локальных скоплений.

При pH 10 наблюдается повышение концентрации наночастиц на поверхности волокна, при этом их размер варьируется в пределах 30 - 50 нм, а форма имеет слегка вытянутый характер. На микрофотографиях фиксируется начальная стадия упорядочения наночастиц вдоль волокна, однако формирование регулярных рядов пока не завершено. Такой характер размещения может указывать на изменение механизма адсорбции и постепенное переходное формирование структурированных массивов.

При pH 11 наночастицы приобретают цилиндрическую форму с размерами 30 - 50 нм и демонстрируют чёткую упорядоченность вдоль волокна, образуя характерные ряды. Подобная морфология может указывать на усиление направленного роста и более равномерное распределение частиц на субстрате в условиях повышенной щелочности.

При pH 12 формируется более сложная морфология наночастиц, которые приобретают изотропную форму размерами 30 - 55 нм. Их концентрация на волокне существенно возрастает, в результате чего поверхность субстрата практически полностью покрывается наночастицами. Подобное поведение может свидетельствовать об усиленных адсорбционных взаимодействиях, обеспечивающих равномерное распределение коллоидных частиц на волокне.

Полученные результаты подтверждают, что pH среды выступает в качестве ключевого параметра, определяющего морфологию, размер и количество наночастиц Cu_2O . При нейтральном значении pH 7 синтезируются наночастицы минимальных размеров, сохраняющие сферическую форму и демонстрирующие высокую степень дисперсности, что указывает на равномерный и контролируемый рост. В кислых и сильно щелочных средах наночастицы изменяют форму на эллипсоидную, цилиндрическую, изотропную и подвержены более выраженному упорядочению, что может быть связано с изменением механизма нуклеации, скорости роста и особенностями адсорбционных взаимодействий в данных диапазонах pH.

Таким образом, выбор значения pH при синтезе наночастиц Cu_2O напрямую зависит от требований, предъявляемых к конечному продукту и условиям дальнейшего использования. Например, в случае применения наночастиц в каталитических или биомедицинских целях предпочтительнее синтез при нейтральном pH, обеспечивающем наименьший размер. При создании защитных покрытий, функциональных пленок или фильтров необходима иная форма и упорядоченное размещение наночастиц, целесообразно применять кислую или сильно щелочную среду, позволяющую целенаправленно регулировать морфологию и структурную организацию наночастиц Cu_2O .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Size-dependent conductivity-type inversion in Cu_2O nanoparticles / B. Balamurugan, I. Aruna, B.R. Mehta, S.M. Shivaprasad // *Physical Review B*. – 2004. – No. 69. – P. 69-73.
2. Cerrato, E. Photocatalytic reductive and oxidative ability study of pristine ZnO and CeO_2 - ZnO heterojunction impregnated with Cu_2O / E. Cerrato, P. Calza, M.C. Paganini // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. – 2022. – No. 427. – Art. No. 113775.

3. In situ electrodeposition of a $\text{Cu}_2\text{O}/\text{SnO}_2$ periodical heterostructure film for photosensor applications / G. Cui, C. Xiao, P. Zhang, M. Zhang // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2016. – No. 18. – P. 10918-10923.
4. Yadav, V.S.K. Electrochemical Studies for CO_2 Reduction Using Synthesized CO_3O_4 (Anode) and Cu_2O (Cathode) as Electrocatalysts / V.S.K. Yadav, M.K. Purkait // *Energy Fuels*. – 2015. – No. 29. – P. 6670-6677.
5. Ag/AgCl/ZnO nano-networks: preparation, characterization, mechanism and photocatalytic activity / A. Meng, J. Xing, Z. Li, Q. Wei, Q. Li. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. – 2016. – No. 411. – P. 290-298.
6. Cu_2O nanoparticles sensitized ZnO nanorod arrays: electrochemical synthesis and photocatalytic properties / Y. Wang, G. She, H. Xu, Y. Liu, L. Mu, W. Shi // *Materials Letters*. – 2012. – No. 67. – P. 110-112.
7. A Review on Cu_2O - based composites in photocatalysis: synthesis, modification, and applications / Q. Su, Ch. Zuo, M. Liu, X. Tai // *Molecules*. – 2023. – No. 14. – Art. No. 5576.
8. Geetha, B. Priyadarshini mechanical milling of copper oxide nanoparticles / B. Geetha // *Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization, ICCAP 2021, December 7-8, 2021, Chennai, India*. – DOI: 10.4108/eai.7-12-2021.2314972.
9. Формирование оксидных наноструктур меди методом лазерной абляции в жидких средах / Н.Н. Тарасенко, С.Т. Пашаян, В.М. Анищик, А.В. Буцень, В. Корнев, Н.В. Тарасенко // *Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 15-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 26-29 сент. 2023 г. / Белорус, гос. ун-т ; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]*. – Минск: БГУ, 2023. – С. 449-451.
10. Лукашин, А.В. Химические методы синтеза наночастиц / А.В. Лукашин, А.А. Елисеев. – Москва: МГУ, 2007. – 41 с.
11. Akarken, G. Hydrothermal synthesis of CuO nanoparticles: tailoring morphology and particle size variations for enhanced properties / G. Akarken, U. Cengiz, T.E. Bektaş // *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. – 2024. – No. 10. – P. 329-336.
12. Солдатенко, Е.М. Химические способы получения наночастиц меди / Е.М. Солдатенко, С.Ю. Доронин, Р.К. Чернова // *Бутлеровские сообщения*. – 2014. – Т. 37, №1. – С. 103-113.
13. Biogenic synthesis of copper oxide nanoparticles from aloe vera: antibacterial activity, molecular docking, and photocatalytic dye degradation / S. Jabeen, V.U. Siddiqui, Sh. Bala, N. Mishra, A. Mishra, R.a Lawrence, P. Bansal, A.R. Khan, T. Khan // *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. – 2024. – No. 9. – P. 30190-30204.

REFERENCES

1. Size-dependent conductivity-type inversion in Cu_2O nanoparticles / B. Balamurugan, I. Aruna, B.R. Mehta, S.M. Shivaprasad // *Physical Review B*. – 2004. – No. 69. – P. 69-73.

2. Cerrato, E. Photocatalytic reductive and oxidative ability study of pristine ZnO and CeO₂ - ZnO heterojunction impregnated with Cu₂O / E. Cerrato, P. Calza, M.C. Paganini // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. – 2022. – No. 427. – Art. No. 113775.
3. In situ electrodeposition of a Cu₂O/SnO₂ periodical heterostructure film for photosensor applications / G. Cui, C. Xiao, P. Zhang, M. Zhang // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2016. – No. 18. – P. 10918-10923.
4. Yadav, V.S.K. Electrochemical Studies for CO₂ Reduction Using Synthesized CO₃O₄ (Anode) and Cu₂O (Cathode) as Electrocatalysts / V.S.K. Yadav, M.K. Purkait // *Energy Fuels*. – 2015. – No. 29. – P. 6670-6677.
5. Ag/AgCl/ZnO nano-networks: preparation, characterization, mechanism and photocatalytic activity / A. Meng, J. Xing, Z. Li, Q. Wei, Q. Li, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. – 2016. – No. 411. – P. 290-298.
6. Cu₂O nanoparticles sensitized ZnO nanorod arrays: electrochemical synthesis and photocatalytic properties / Y. Wang, G. She, H. Xu, Y. Liu, L. Mu, W. Shi // *Materials Letters*. – 2012. – No. 67. – P. 110-112.
7. A Review on Cu₂O– based composites in photocatalysis: synthesis, modification, and applications / Q. Su, Ch. Zuo, M. Liu, X. Tai // *Molecules*. – 2023. – No. 14. – Art. No. 5576.
8. Geetha, B. Priyadarshini mechanical milling of copper oxide nanoparticles / B. Geetha // *Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization, ICCAP 2021, December 7-8, 2021, Chennai, India*. – DOI: 10.4108/eai.7-12-2021.2314972.
9. Formation of copper oxide nanostructures by laser ablation in liquid media / N. N. Tarasenko, S. T. Pashayan, V. M. Anishchik, A. V. Butsen, V. Kornev, N. V. Tarasenko // *Interaction of radiation with solids: Proc. of the 15th Int. Conf., Minsk, Belarus, September 26-29, 2023 / Belarusian State University; editorial board: V. V. Uglov (editor-in-chief) [et al.]*. – Minsk: BSU, 2023. – P. 449-451.
10. Lukashin, A.V. Chemical methods of synthesis of nanoparticles / A.V. Lukashin, A.A. Eliseev. - Moscow: Moscow State University, 2007. - 41 p.
11. Akarken, G. Hydrothermal synthesis of CuO nanoparticles: tailoring morphology and particle size variations for enhanced properties / G. Akarken, U. Cengiz, T.E. Bektaş // *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. – 2024. – No. 10. – P. 329-336.
12. Soldatenko, E.M. Chemical methods for obtaining copper nanoparticles / E.M. Soldatenko, S.Yu. Doronin, R.K. Chernova // *Butlerov communications*. – 2014. – V. 37, No. 1. – P. 103-113.
13. Biogenic synthesis of copper oxide nanoparticles from aloe vera: antibacterial activity, molecular docking, and photocatalytic dye degradation / S. Jabeen, V.U. Siddiqui, Sh. Bala, N. Mishra, A. Mishra, R.a Lawrence, P. Bansal, A.R. Khan, T. Khan // *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. – 2024. – No. 9. – P. 30190-30204.

СРАВНЕНИЕ АРХИТЕКТУР НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ

COMPARISON OF NEURAL NETWORK ARCHITECTURES FOR TEXT DATA ANALYSIS

Роднин А.В., аспирант, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия
Rodnin A.V., Post graduate student, Vologda State University, Vologda, Russia

Горбунов В.А., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия
Gorbunov V.F., DrSc in Physics and Mathematics, professor, professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Аннотация. Данная статья представляет сравнительный анализ архитектур нейросетей для обработки текстовых данных. Рассматриваются особенности работы различных моделей (RNN, CNN, трансформеры) и их алгоритмы обучения, а также эффективность в извлечении семантической информации из больших текстовых корпусов. Основной акцент делается на выявлении преимуществ и недостатков каждой архитектуры для оптимизации задач анализа текста.

Ключевые слова: нейросети, архитектуры нейросетей, анализ текстовых данных.

Abstract. The article presents a comparative analysis of neural network architectures for processing text data. The features of various models (RNN, CNN, transformers) and their learning algorithms are considered, as well as their effectiveness in extracting semantic information from large text corpora. The main focus is on identifying the advantages and disadvantages of each architecture to optimize text analysis tasks.

Keywords: neural networks, neural network architectures, text data analysis.

В образовательной сфере объем и разнообразие информационных источников постоянно растут, учебные пособия, научные статьи, книги и новости требуют оперативного анализа и обработки. Создание тестовых материалов, лабораторных работ и мини пособий зачастую сопряжено с большими трудозатратами, что затрудняет обеспечение качественного и своевременного образовательного контента. Автоматизация этих процессов становится особенно актуальной, поскольку традиционные методы ручной подготовки не справляются с возросшей нагрузкой [2].

Нейросетевые модели, способные выполнять задачи классификации, извлечения информации, анализа тональности и генерации текстов, представляют собой мощный инструмент для решения подобных задач. Их применение позволяет ускорить разработку тестовых заданий, лабораторных работ и кратких обучающих материалов, обеспечивая при этом высокую точность и адаптивность создаваемых образовательных ресурсов.

Цель данной работы заключается в проведении сравнительного анализа различных архитектур нейросетей, используемых для обработки текстовых данных, с акцентом на выявление их сильных и слабых сторон. Результаты исследования позволят определить оптимальные подходы для реализации систем анализа текстовой информации в условиях постоянно растущего информационного потока.

Современные нейросети стали мощным инструментом для работы с текстовой информацией, обеспечивая более глубокий анализ данных по сравнению с традиционными методами. В отличие от статистических алгоритмов, которые обрабатывают слова изолированно, нейросетевые модели способны распознавать контекст, выявлять взаимосвязь понятий и учитывать смысловую структуру предложений [1]. Это делает их особенно эффективными при работе с большими объемами текстов, таких как учебные материалы, статьи и книги.

Благодаря этим возможностям нейросети успешно применяются в задачах классификации текстов, извлечения ключевой информации и даже генерации осмысленных ответов на вопросы. В образовательной сфере такие технологии могут сыграть важную роль в автоматизации создания тестов, резюмировании длинных документов или адаптировании материалов под уровень подготовки учащихся. Однако разные нейросетевые архитектуры решают эти задачи по-разному, обладая своими преимуществами и ограничениями.

Для эффективного анализа и сравнения различных архитектур нейросетей, применяемых к обработке текстовых данных, необходимо учитывать несколько ключевых критериев. Во-первых, важна точность и способность модели к обобщению – насколько она хорошо справляется с классификацией, извлечением информации и пониманием сложных зависимостей в тексте. Это особенно критично в образовательных задачах, где необходимо корректное выявление тем, ключевых идей и контекстных связей в учебных материалах.

Во-вторых, значимыми характеристиками являются вычислительные затраты и время обучения [1]. Разные архитектуры требуют различного количества ресурсов: одни модели могут быть быстрее и легче в обучении, но менее точными, тогда как другие обеспечивают высокую точность за счет значительных вычислительных мощностей. Это особенно важно при обработке больших объемов текстовых данных, таких как книги или статьи.

Кроме того, модели различаются по способности работать с длинными последовательностями. В образовательных приложениях важно, чтобы нейросеть могла учитывать глобальный контекст документа, а не ограничивалась анализом отдельных фрагментов. Современные трансформерные модели решают эту проблему с помощью специальных механизмов, позволяющих эффективно обрабатывать длинные тексты.

Также важным критерием является гибкость и возможность дообучения, поскольку модели должны адаптироваться под конкретные образовательные задачи, такие как анализ тональности текстов, генерация тестов или ответы на вопросы. И, наконец, немаловажным остается уровень интерпретируемости модели – возможность объяснить, почему она пришла к тем или иным выводам. Это играет ключевую роль в образовательных и научных приложениях, где важна прозрачность результатов.

Эти критерии позволяют объективно сравнить различные архитектуры нейросетей и определить их эффективность в задачах анализа текстовых данных. Рассмотрим, как они проявляются на практике при использовании популярных типов нейросетей.

Простые нейронные сети, или многослойные персептроны (MLP), представляют собой один из самых базовых типов нейросетевых архитектур. В таких моделях данные проходят от входного слоя к выходному через один или несколько скрытых слоев, где происходит обработка информации [1]. MLP используют функции активации для преобразования данных, что позволяет моделям выявлять нелинейные зависимости и улучшать точность предсказаний при решении различных задач.

Преимущества таких сетей включают их простоту в реализации и сравнительно низкие вычислительные затраты, что делает их удобными для небольших задач с ограниченным объемом данных. Они могут эффективно работать при решении задач классификации, например, для анализа текстов с ограниченным количеством категорий или при использовании с небольшими объемами данных, такими как классификация коротких предложений или идентификация ключевых слов.

Однако ограничения MLP становятся очевидными при анализе текстов, где важен порядок слов и контекст. Модели MLP не учитывают последовательность входных данных, что критично для понимания сложных текстов или извлечения информации из длинных документов. Например, для анализа текста, где важно понять, как одно слово связано с другими в пределах предложения или даже абзаца, многослойный персептрон не способен эффективно обрабатывать такие зависимости. Поэтому для более сложных задач анализа текстов, таких как извлечение смысла из длинных фрагментов текста, такие сети оказываются недостаточными.

Рекуррентные нейронные сети (RNN, LSTM, GRU) были разработаны специально для работы с последовательными данными, такими как текст. В отличие от многослойных персептронов, они обладают циклическими связями, которые позволяют учитывать предыдущую информацию при обработке текущего элемента последовательности. Это делает их особенно полезными для задач анализа текстов, где важен порядок слов и контекст [2].

Основное преимущество RNN заключается в способности запоминать предыдущие элементы последовательности, что делает их подходящими для обработки предложений и абзацев. Однако стандартные RNN страдают от проблемы исчезающего градиента, из-за чего они слабо справляются с запоминанием длинных зависимостей в тексте.

Для решения этой проблемы были разработаны усовершенствованные версии RNN — LSTM (Long Short-Term Memory) и GRU (Gated Recurrent Unit). Они используют специальные механизмы (гейты), которые помогают эффективно хранить и передавать информацию на более дальние расстояния в тексте [3]. Это делает их полезными для задач, где требуется анализировать взаимосвязь слов в длинных документах, например, при обработке диалогов или при автоматическом резюмировании текста.

Несмотря на улучшения, ограничения таких моделей остаются. Они требуют значительных вычислительных ресурсов, особенно при обработке очень длинных текстов, и обучаются медленнее по сравнению с более современными архитектурами. Кроме того, даже LSTM и GRU имеют ограничения по длине контекста, который они могут эффективно

учитывать. В связи с этим на смену рекуррентным сетям в задачах анализа больших объемов текстовых данных пришли трансформеры, которые обеспечивают лучшее понимание контекста на глобальном уровне.

Сверточные нейронные сети (CNN) для текста применяются для выявления локальных зависимостей в текстовых данных. Первоначально разработанные для обработки изображений, они оказались эффективными и в анализе текстов благодаря способности извлекать ключевые признаки (n-граммы, фразы, шаблоны словосочетаний) с помощью сверточных фильтров [4].

Основной принцип работы CNN в обработке текста заключается в том, что специальные сверточные фильтры сканируют последовательности слов, выявляя характерные паттерны, например, фразы определенной длины, сочетания слов или важные лексические конструкции. Затем с помощью операций пулинга (pooling) сеть выбирает наиболее значимые признаки, что снижает размерность данных и увеличивает вычислительную эффективность.

Ключевое преимущество сверточных нейросетей – их высокая производительность при анализе локальных структур текста. Они работают быстрее, чем рекуррентные сети, и могут быть полезны в задачах, где важно выявление ключевых фраз, классификация текстов или анализ тональности.

Однако ограничения CNN связаны с их неспособностью учитывать глобальный контекст. Они хорошо определяют локальные зависимости, но могут упускать смысловые связи между удаленными словами и предложениями. Это делает их менее подходящими для обработки длинных текстов, где критически важно понимать взаимоотношения слов в разных частях документа. Именно поэтому сверточные сети часто используются в комбинации с другими архитектурами, например, с рекуррентными сетями или трансформерами, чтобы учесть как локальные, так и глобальные зависимости в тексте.

И, наконец, трансформеры и их производные (BERT, GPT, T5 и др.). Они стали революционным решением в обработке текстовых данных благодаря механизму self-attention (самовнимание), который позволяет учитывать контекст слов в тексте вне зависимости от их позиции [5]. В отличие от рекуррентных сетей, трансформеры анализируют весь текст одновременно, выявляя глубокие связи между словами и предложениями.

Одним из ключевых преимуществ трансформеров является их способность работать с длинными последовательностями текста, сохраняя понимание глобального контекста. Они успешно решают широкий спектр задач: от классификации текстов и выделения ключевой информации до генерации осмысленных ответов на вопросы.

Среди популярных моделей на основе трансформеров можно выделить:

- BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) – модель, ориентированная на анализ текста и извлечение информации. Она хорошо справляется с задачами классификации, поиска релевантных фрагментов и анализа смысловых связей.

- GPT (Generative Pre-trained Transformer) – генеративная модель, которая используется для создания связного текста, ответов на вопросы и диалоговых систем.

- T5 (Text-to-Text Transfer Transformer) – универсальная модель, которая преобразует любую задачу обработки естественного языка в формат «текст в текст» и успешно применяется для перевода, суммаризации и генерации текстов.

Несмотря на высокую точность и масштабируемость, трансформеры имеют существенные ограничения. Их обучение требует огромных вычислительных ресурсов, особенно для крупных моделей с миллиардами параметров. Это делает их труднодоступными для индивидуального обучения с нуля, однако использование предобученных моделей и их дообучение на специфических задачах позволяет эффективно применять трансформеры даже в образовательных проектах.

Благодаря своей универсальности и точности, трансформеры стали стандартом в современных задачах анализа текстов и широко применяются для создания интеллектуальных систем обработки информации, включая автоматическую генерацию учебных материалов, анализ студенческих работ и построение диалоговых помощников для обучения.

На основе рассмотренных архитектур нейронных сетей, трансформеры и их производные представляются наиболее эффективными для обработки текстовых данных. Это связано с следующими признаками:

1. Учет глобального контекста: Трансформеры используют механизм самовнимания (self-attention), позволяющий анализировать весь текст целиком и выявлять глубокие смысловые связи между словами и предложениями. Это особенно важно для понимания сложных языковых конструкций и длинных документов.

2. Высокая точность в задачах НЛП: Модели на основе трансформеров демонстрируют превосходные результаты в различных задачах обработки естественного языка, включая классификацию текстов, извлечение информации и генерацию связного текста.

3. Гибкость и масштабируемость: Трансформеры легко адаптируются к различным задачам и могут быть дообучены на специфических данных, что повышает их универсальность и применимость в разных областях.

В данной статье проведен сравнительный анализ различных архитектур нейросетей, применяемых для обработки текстовых данных. Было рассмотрено, как простые многослойные перцептроны, рекуррентные сети, сверточные модели и трансформеры справляются с задачами классификации, извлечения информации и генерации текстов.

Анализ показал, что трансформеры обладают наибольшей эффективностью благодаря механизму самовнимания, позволяющему учитывать глобальный контекст. Они демонстрируют высокую точность, хорошо масштабируются и подходят для большинства задач анализа текстов, включая обработку длинных документов. Однако их применение связано с высокими вычислительными затратами, что делает такие модели менее доступными для небольших проектов без специализированного оборудования.

При выборе архитектуры важно учитывать компромисс между вычислительной эффективностью, точностью и способностью обрабатывать длинные последовательности. Например, CNN можно использовать для быстрого анализа локальных признаков текста, RNN – для работы с последовательными данными, а BERT и GPT – для сложных задач понимания и генерации текста.

Полученные результаты и рекомендации помогут исследователям и разработчикам в области НЛП принять обоснованное решение при выборе нейросетевой архитектуры для конкретных задач, таких как анализ научных публикаций, создание образовательного контента или генерация ответов на вопросы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бережнов, Н.И. Совершенствование механизмов внимания для архитектуры трансформер в задачах повышения качества изображений / Н.И. Бережнов, А.А. Сирота // Компьютерная оптика. – 2024. – №5. – С. 726-734.
2. Алчинов, В.И. А55 Основы нейросетевого искусственного интеллекта. Краткий вводный курс : учеб.-метод. пособие / В.И. Алчинов, А.И. Иванов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2024. – 68 с.
3. Козлов, С.В. Анализ LSTM и GRU моделей для построения прогнозов временных рядов / С.В. Козлов, С.А. Седенков // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, №7. – С. 43-50.
4. Гайнетдинов, А.Ф. Исследование влияния трансформеров на улучшение генерации изображений / А.Ф. Гайнетдинов // Universum: технические науки. – 2024. – №4 (121). – С. 44-49.
5. Бобков, И.А. Моделирование неопределенности при помощи нейронных сетей / И.А. Бобков, А.А. Бурдина, А.А. Нехрест-Бобкова // Ars Administrandi. – 2023. – Т. 15, №1. – С. 45-59.

REFERENCES

1. Berezhnov, N.I. Improving attention mechanisms for the transformer architecture in image quality enhancement problems / N.I. Berezhnov, A.A. Sirota // Computer Optics. – 2024. – No. 5. – P. 726-734.
2. Alchinov, V.I. A55 Fundamentals of neural network artificial intelligence. A brief introductory course: textbook-method. manual / V.I. Alchinov, A.I. Ivanov. – Penza: Publishing house of PSU, 2024. – 68 p.
3. Kozlov, S.V. Analysis of LSTM and GRU models for constructing time series forecasts / S.V. Kozlov, S.A. Sedenkov // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Vol. 12, No. 7. – P. 43-50.
4. Gainetdinov, A.F. Study of the influence of transformers on improving image generation / A.F. Gainetdinov // Universum: technical sciences. – 2024. – No. 4 (121). – P. 44-49.
5. Bobkov, I.A. Modeling uncertainty using neural networks / I.A. Bobkov, A.A. Burdina, A.A. Nekhrest-Bobkova // Ars Administrandi. – 2023. – Vol. 15, No. 1. – P. 45-59.

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЛУЧАТЕЛЕЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫХ УСЛУГ ИЗ ЧИСЛА МАЛОМОБИЛЬНЫХ
ГРУПП НАСЕЛЕНИЯ**

THE DEVELOPMENT OF A HORIZONTAL SCALING ARCHITECTURE FOR A WEB-
BASED INTERACTIVE ONLINE WHITEBOARD SERVICE

Горбунов В.А., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Gorbunov V.F., DrSc in Physics and Mathematics, professor, professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Кочкин Д.В., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Kochkin D.V., PhD in technical science, Docent, Associate Professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Панкратов Д.В., студент 4-го курса Института Математики, Естественных и Компьютерных Наук, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Pankratov D.V., 4th year student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, FSBEI HE «Vologda State University», Vologda, Russia

Аннотация. В статье рассматривается разработка интеллектуальной системы видеонаблюдения, предназначенной для обнаружения получателей государственных услуг из числа маломобильных групп населения. Предложенный подход основан на применении современных технологий компьютерного зрения и машинного обучения, что позволяет повысить эффективность оказания социальной помощи и оптимизировать взаимодействие между гражданами и государственными учреждениями. Система способна автоматически выявлять людей с ограниченной мобильностью в общественных местах, таких как центры предоставления государственных услуг, и обеспечивать их своевременную поддержку.

Ключевые слова: интеллектуальная система, видеонаблюдение, маломобильные группы населения, государственные услуги, компьютерное зрение, машинное обучение, автоматизация, социальная поддержка.

Abstract. The article discusses the development of an intelligent video surveillance system designed to identify recipients of state services among low-mobility population groups. The proposed approach is based on the use of modern computer vision and machine learning technologies, which improves the efficiency of social assistance delivery and optimizes interaction between citizens and government institutions. The system can automatically detect people with limited mobility in public places, such as state service centers, and ensure their timely support.

Keywords: intelligent system, video surveillance, low-mobility population groups, state services, computer vision, machine learning, automation, social support.

Введение

Актуальность проекта инновации обусловлена требованиями по постоянному совершенствованию качества предоставления государственных услуг (ГУ) на основе применения нейросетевой системы видеонаблюдения [1, 2] в ходе работы клиентских служб Отделений Фонда пенсионного и социального страхования Российской Федерации (РФ) по Вологодской области (ОСФР по Вологодской области). Реализации проекта обеспечит рост качества обслуживания клиентов, относящихся к маломобильным группам населения.

Целью данной работы является разработка и внедрение интеллектуальной системы видеонаблюдения на основе нейросетевых технологий для автоматического обнаружения получателей государственных услуг из числа маломобильных групп населения [3-5].

Постановка задачи

Основная задача в разработке ИС заключается в корректном распознавании всех людей, относящихся к числу маломобильным группам населения (люди на колясках, на ходунках и костылях).

Для решения данной задачи необходимо:

1. Анализ предметной области: Исследование текущих методов обнаружения МГН в общественных местах, анализ существующих решений на основе компьютерного зрения и машинного обучения [6].
2. Разработка архитектуры системы: Проектирование модульной структуры системы, выбор оптимальных алгоритмов детекции объектов (YOLO) и методов предобработки данных.
3. Сбор и подготовка данных: Создание датасета на основе видеозаписей с камер наблюдения, аннотация данных с метками для обучения модели.
4. Программная реализация MVP-приложения: Разработка прототипа системы с использованием Python, OpenCV, Ultralytics (YOLO), PIL [7].
5. Тестирование и оценка производительности: Проведение тестирования на реальных данных для оценки точности распознавания, скорости обработки кадров и устойчивости модели к переобучению.
6. Оптимизация модели: Улучшение точности модели путем корректировки архитектуры нейронной сети, увеличения объема обучающего датасета и применения методов регуляризации (Dropout).

Архитектура системы

Система состоит из нескольких взаимосвязанных компонентов, каждый из которых выполняет строго определенную функцию (Рис. 1) [8, 9].

1. Видеокамеры наблюдения
 - Источник видеопотока в формате RTSP (Real-Time Streaming Protocol).
 - Камеры поддерживают разрешение Full HD (1920x1080) и выше, что обеспечивает высокую детализацию изображения.
 - Данные передаются через локальную сеть в модуль предобработки данных.
2. Модуль предобработки данных
 - Функционал:
 - Нормализация изображений (коррекция яркости, контраста, цветового баланса).

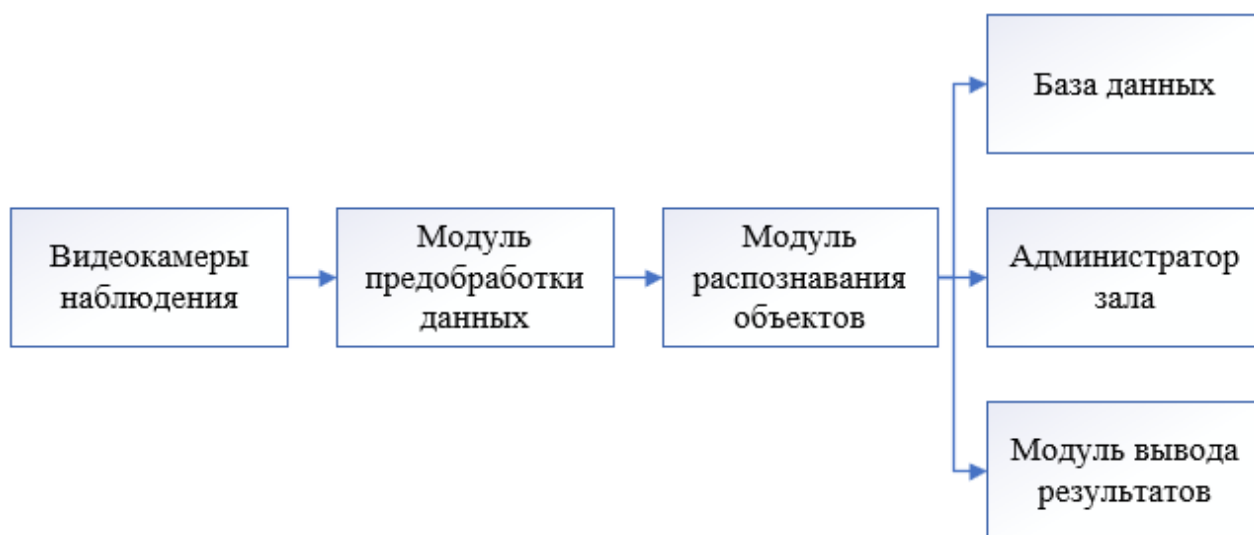


Рисунок 1 – Схема взаимодействия модулей

- Преобразование кадров в градации серого для снижения вычислительной нагрузки.
- Выбор ключевых кадров для анализа.
- Используемые библиотеки: OpenCV, NumPy.

3. Модуль распознавания объектов

Алгоритм: YOLOv8m, который обеспечивает хороший баланс между точностью и производительностью.

Обучение модели:

– Процесс обучения проводился на платформе Google Colab, что позволило использовать вычислительные мощности GPU NVIDIA Tesla T4 для ускорения обучения.

– Датасет состоял из более чем 4000 аннотированных изображений, собранных на основе видеозаписей с камер наблюдения клиентских служб Отделений Фонда пенсионного и социального страхования РФ по Вологодской области.

– Аннотация данных выполнялась с использованием инструментов LabelImg и CVAT, что обеспечило высокое качество разметки.

– Для увеличения разнообразия обучающего набора применялись методы аугментации данных, включая:

1. Поворот и отражение изображений.
2. Изменение масштаба и обрезка.
3. Корректировку яркости, контраста и насыщенности.

4. Модуль вывода результатов

Функционал:

– Визуализация результатов детекции на экране администратора (прямоугольники вокруг обнаруженных объектов, текстовые сообщения).

– Генерация уведомлений для администратора зала (push-уведомления).

5. База данных

СУБД: PostgreSQL.

Структура данных:

– Таблица detections: хранит информацию о времени, месте и количестве обнаруженных МГН.

– Таблица logs: журнал событий (время отправки уведомлений администратору).

Интеграция: Данные записываются в базу через API на основе Flask.

Тестирование

Тестирование системы проводилось в два этапа:

1. Синтетические данные: Модель тестировалась на предварительно аннотированных изображениях, чтобы оценить базовую точность детекции и классификации объектов.

2. Реальные данные: Система тестировалась на новых видеозаписях, полученных из клиентских служб Отделений Фонда пенсионного и социального страхования РФ по Вологодской области.

Анализ графиков метрик и потерь (Рис. 2):

На графиках box_loss, cls_loss и dfl_loss (потери для координат ограничивающих рамок, классификации и распределения длин) наблюдаются положительные тенденции:

Значения потерь как на тренировочном, так и на валидационном наборах данных демонстрируют снижение, что подтверждает успешное обучение модели и ее способность обобщать данные.

Разрыв между значениями потерь на тренировочной и валидационной выборках минимален, что указывает на отсутствие переобучения.

Графики precision (точности) и recall (полноты) сбалансированы, что свидетельствует о том, что модель не генерирует чрезмерное количество ложных положительных (FP) или ложных отрицательных (FN) результатов.

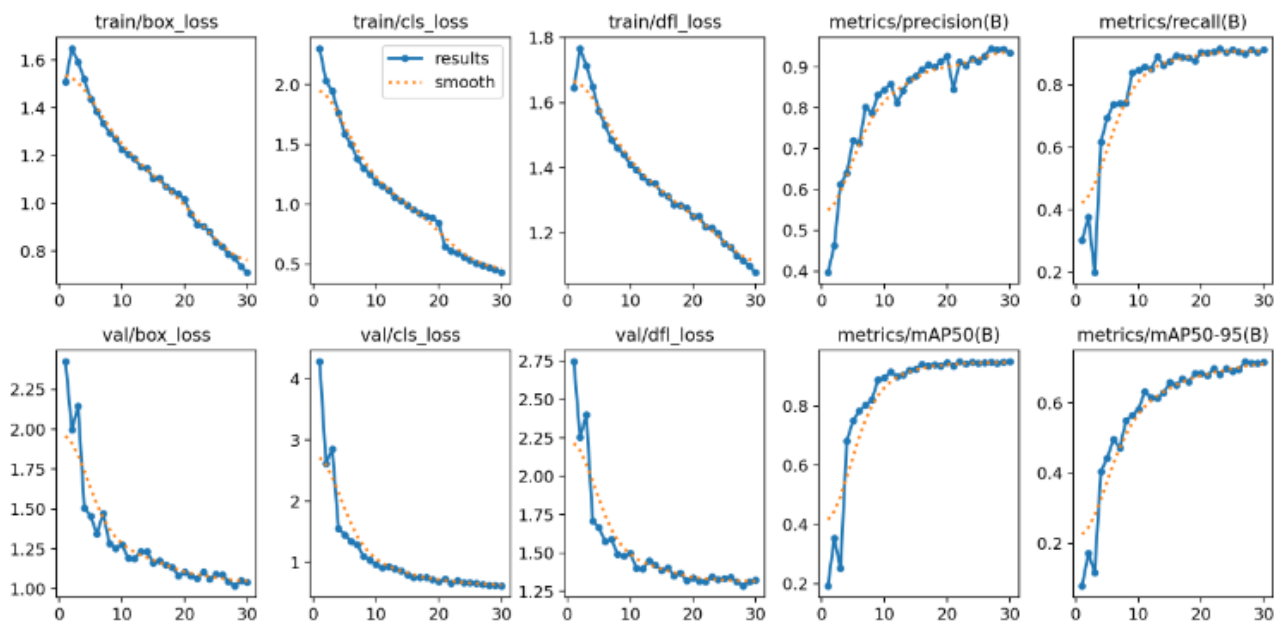


Рисунок 2 – Метрики и потери

Результаты

Полученные значения $\text{precision} = 0.95$ и $\text{recall} = 0.85$ на тренировочном наборе данных демонстрируют высокую эффективность модели в решении задачи детекции маломобильных групп населения (МГН).

Значение точности 0.95 указывает на то, что модель крайне редко допускает ложные положительные срабатывания (FP), то есть практически все предсказанные объекты отображаются верно. Это особенно важно в контексте задачи, так как минимизация ошибок такого рода снижает вероятность ненужного вмешательства персонала.

Значение полноты 0.85 подтверждает способность системы обнаруживать целевые объекты даже при изменении условий съемки или сложных сценариях (например, при различной освещенности или ракурсах камеры).

Заключение

Разработанная интеллектуальная система видеонаблюдения успешно решает задачу автоматического обнаружения маломобильных групп населения в клиентских службах. Высокие показатели точности и полноты свидетельствуют о надежности модели и ее способности минимизировать ошибки при детекции целевых объектов. Система обеспечивает своевременное информирование администраторов, что позволяет оперативно оказывать поддержку людям с ограниченной мобильностью. Внедрение системы способствует повышению качества обслуживания и оптимизации работы персонала в государственных учреждениях. Проект демонстрирует высокую социальную значимость и потенциал для масштабирования на другие регионы России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярышев, С.Н. Технологии глубокого обучения и нейронных сетей в задачах видеоанализа / С.Н. Ярышев, В.А. Рыжова. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2022. – 82 с.
2. Принципы построения самоорганизующихся информационно-телекоммуникационных систем / А.А. Суконщиков, А.Н. Швецов, И.А. Андрианов, Д.В. Кочкин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 1(100). – С. 56-67. – DOI 10.23859/1994-0637-2021-1-100-4.
3. Тихановский, Г.С. Исследование возможностей применения алгоритмов глубокого обучения и компьютерного зрения в задаче классификации грибов и ягод / Г.С. Тихановский, Д.В. Кочкин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 4(22). – С. 41-46.
4. Махонин, М.Н. разработка системы распознавания товаров на базе нейронных сетей / М.Н. Махонин, Д.В. Кочкин // Школа практических инноваций - инженерному бизнесу региона : Материалы Всероссийской научно-практической конференции памяти профессора Александра Николаевича Шичкова, Вологда, 19 января 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2024. – С. 177-182.
5. Махонин, М.Н. Детектор товаров на базе нейронной сети / М.Н. Махонин, Д.В. Кочкин // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес

(ИНФОС-2024) : материалы Пятнадцатой Международной научно-технической конференции, Вологда, 27–28 июня 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2024. – С. 22-25.

6. Гудфеллоу, И. Глубокое обучение / И. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвиль. – Москва: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.

7. Бейелер, М. OpenCV с помощью Python. Готовые решения для компьютерного зрения / М. Бейелер. – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 222 с.

8. Модели и методы построения нейро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах / А.А. Суконщиков, И.А. Андрианов, С.В. Дианов [и др.]. – Курск : Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2021. – 152 с.

9. Селянин, Н.С. Влияние использования автоматического ИИ-диагностического модуля на эффективность работы сервисных центров / Н.С. Селянин, Д.В. Кочкин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2024. – № 4(26). – С. 37-40.

10. Поузброк, А. Deep Learning for Computer Vision with Python / А. Поузброк. – 2017. – 1340 с.

REFERENCES

1. Yaryshev, S.N. Deep Learning and Neural Network Technologies in Video Analysis Tasks / S.N. Yaryshev, V.A. Ryzhova. – St.-Petersburg: ITMO University, 2022. – 82 p.

2. Principles of Building Self-Organizing Information and Telecommunication Systems / A.A. Sukonshchikov, A.N. Shvetsov, I.A. Andrianov, D.V. Kochkin // Bulletin of the Cherepovets State University. – 2021. – No. 1(100). – P. 56-67. – DOI 10.23859/1994-0637-2021-1-100-4.

3. Tikhonovsky, G. S. Research on the Possibilities of Applying Deep Learning and Computer Vision Algorithms in the Task of Classifying Mushrooms and Berries / G.S. Tikhonovsky, D.V. Kochkin // Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences. – 2023. – No. 4(22). – P. 41-46.

4. Makhonin, M.N. Development of a Product Recognition System Based on Neural Networks / M.N. Makhonin, D.V. Kochkin // School of Practical Innovations - For the Engineering Business of the Region: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference in Memory of Professor Alexander Nikolaevich Shichkov, Vologda, January 19, 2024. – Vologda: Vologda State University, 2024. – P. 177-182.

5. Makhonin, M.N. Product Detector Based on a Neural Network / M.N. Makhonin, D.V. Kochkin // Intelligent Information Technologies and Intelligent Business (INFOS-2024): Proceedings of the Fifteenth International Scientific and Technical Conference, Vologda, June 27–28, 2024. – Vologda: Vologda State University, 2024. – P. 22-25.

6. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Moscow: DMK Press, 2018. – 652 p.

7. Beyeler, M. OpenCV with Python. Ready-Made Solutions for Computer Vision / M. Beyeler. – Moscow: DMK Press, 2017. – 222 p.

8. Models and Methods for Building Neuro-Fuzzy Intelligent Agents in Information and Telecommunication Systems / A.A. Sukonshchikov, I.A. Andrianov, S.V. Dianov [et al.]. – Kursk: Closed Joint-Stock Company "University Book", 2021. – 152 p.
9. Seljanin, N.S. The Impact of Using an Automatic AI Diagnostic Module on the Efficiency of Service Centers / N.S. Seljanin, D.V. Kochkin // Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences. – 2024. – No. 4(26). – P. 37-40.
10. Rosebrock, A. Deep Learning for Computer Vision with Python / A. Rosebrock. – 2017. – 1340 p.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ В ВЕБ-СЕРВИСЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ ОНЛАЙН-ДОСКИ

THE DEVELOPMENT OF A HORIZONTAL SCALING ARCHITECTURE FOR A WEB-
BASED INTERACTIVE ONLINE WHITEBOARD SERVICE

Горбунов В.А., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Gorbunov V.F., DrSc in Physics and Mathematics, professor, professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Кочкин Д.В., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Kochkin D.V., PhD in technical science, Docent, Associate Professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Самойлов М.А., студент 4-го курса Института Математики, Естественных и Компьютерных Наук, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Samoylov M.A., 4th year student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, FSBEI HE «Vologda State University», Vologda, Russia

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема проектирования архитектуры горизонтального масштабирования для веб-сервиса интерактивной онлайн-доски. Разработка включает использование современных подходов и технологий, таких как микросервисная модель, Spring Boot Framework, WebSocket, RabbitMQ, Redis, Docker, Nginx и MongoDB. Целью работы является создание масштабируемого и отказоустойчивого решения. В статье анализируются преимущества и недостатки выбранных технологий, а также их вклад в обеспечение высокой производительности и надёжности веб-сервиса. Полученные результаты могут быть полезны для разработки аналогичных систем, требующих высокой степени автоматизации и масштабируемости.

Ключевые слова: микросервисы, RabbitMQ, REST API, Docker, балансировка нагрузки, горизонтальное масштабирование.

Abstract. The present paper sets out the problem of designing a horizontal scaling architecture for a web-based interactive online whiteboard service. The development employs contemporary approaches and technologies, including the microservice model, the Spring Boot Framework, WebSocket, RabbitMQ, Redis, Docker, Nginx and MongoDB. The objective of the paper is to create a scalable and fault-tolerant solution. The study methodically evaluates the merits and drawbacks of the chosen technologies, and their collective impact on the web service's performance and reliability. The results obtained can be useful for the development of similar systems that require a high degree of automation and scalability.

Keywords: microservices, RabbitMQ, REST API, Docker, load balancing, horizontal scaling.

Введение

Рост популярности удалённой работы и обучения требует инструментов для совместной работы в реальном времени. Интерактивные онлайн-доски, такие как Miro или Jamboard, обеспечивают визуальную коммуникацию, однако их архитектура часто не адаптирована для специфических требований, таких как высокая нагрузка или интеграция с внутренними системами. Основная проблема заключается в обеспечении горизонтального масштабирования, позволяющего справляться с увеличением числа пользователей без потери производительности [1, 2].

Целью данной работы является разработка архитектуры веб-сервиса интерактивной онлайн-доски, способной масштабироваться горизонтально. Для этого предложено сочетание микросервисной модели, брокера сообщений RabbitMQ, распределённого кэша Redis и балансировщика нагрузки Nginx.

Постановка задачи

Основная задача в разработке архитектуры горизонтального масштабирования заключается в обеспечении бесперебойной работы пользователей в реальном времени даже при больших нагрузках.

Для решения данной задачи необходимо:

1. Разделить систему на независимые модули (клиент, сервер, кэш, брокер сообщений, база данных).
2. Использовать WebSocket для двусторонней связи в реальном времени между клиентом и сервером.
3. Применить Docker для развёртывания реплик серверной части.
4. Интегрировать балансировщик нагрузки Nginx.

Архитектура системы.

Система состоит из нескольких модулей, каждый из которых выполняет определённые функции и взаимодействует с другими модулями через чётко определённые интерфейсы. Ниже приведены описание основных модулей и схема их взаимосвязи (рисунок 1):

Frontend – реализован на React и Excalidraw, обеспечивает взаимодействие с пользователем.

Backend – микросервисы на Spring Boot, обрабатывающие запросы через REST API и WebSocket.

Nginx – балансировщик нагрузки, распределяющий запросы между репликами Backend.

Redis – распределённое хранилище для кэширования изменений на досках.

MongoDB – основная база данных для хранения информации о пользователях и досках.

RabbitMQ – брокер сообщений для синхронизации данных между репликами.

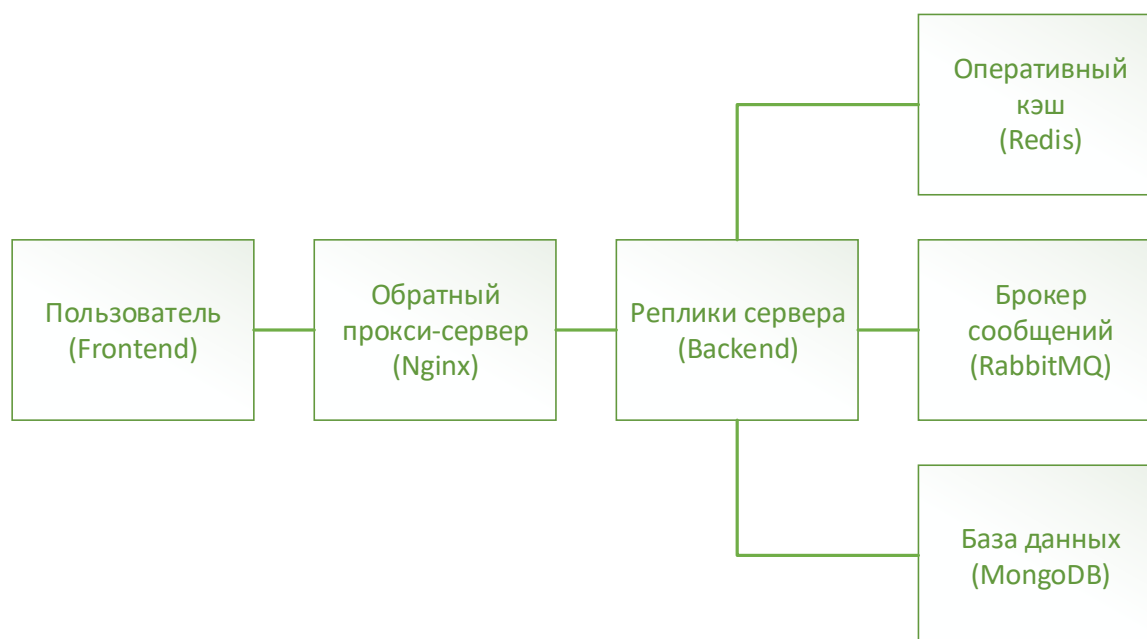


Рисунок 1 – Схема взаимосвязей модулей

Для масштабирования модуль Backend развёртывается в виде нескольких реплик, управляемых Docker. Конфигурация Docker Compose (Табл. 1) включает:

- 1) 3 реплики Backend;
- 2) MongoDB, Redis и RabbitMQ в отдельных контейнерах;
- 3) Nginx для распределения запросов.

Таблица 1 – Конфигурация Docker Compose

Сервис	Образ	Порт	Назначение
Backend	backend-app	8080:8080	Обработка запросов
Nginx	nginx:latest	5173:80	Балансировка нагрузки
RabbitMQ	rabbitmq:3-management	5672:5672	Обмен сообщениями
Redis	redis:latest	6379:6379	Кэширование данных
MongoDB	mongo:latest	27017:27017	Хранение данных

Разработанная архитектура базируется на комбинации современных шаблонов проектирования и технологий, обеспечивающих масштабируемость, отказоустойчивость и высокую производительность системы.

1. Микросервисная архитектура

Система разделена на независимые компоненты: Frontend, Backend, Redis, RabbitMQ и MongoDB. Каждый модуль развёртывается и масштабируется автономно [3, 4], что позволяет: оптимизировать ресурсы. Например, увеличить количество реплик Backend при росте нагрузки, не затрагивая другие компоненты; упростить поддержку, так как обновление одного сервиса не требует остановки всей системы; повысить отказоустойчивость, поскольку сбой в одном модуле не приводит к остановке работы остальных.

Единственным недостатком данной архитектуры являются накладные расходы, вызванные обменом данными между сервисами через REST API.

2. Паттерн «Издатель-Подписчик»

Для синхронизации изменений между репликами Backend используется брокер сообщений RabbitMQ. Принцип работы заключается в определении издателя (активная реплика Backend), который отправляет событие об изменении в очередь RabbitMQ, и подписчиков (все реплики), которые получают сообщение и обновляют локальный кэш в Redis. Это обеспечивает: асинхронную обработку, что снижает задержки при высокой нагрузке; согласованность данных, благодаря чему все реплики получают и обеспечивают актуальное состояние доски.

Выбор RabbitMQ обусловлен поддержкой Spring Boot, высокой пропускной способностью и надёжностью доставки сообщений [5, 6].

Из-за отсутствия настройки подтверждённой доставки имеется риск потери сообщений, однако в применяемой системе важнее мгновенная синхронизация изменений, чем гарантированность доставки сообщений.

3. Распределённый кэш Redis

Redis используется для хранения текущих изменений на досках в памяти, что позволяет: снизить нагрузку на MongoDB, так как частые операции чтения и записи выполняются через Redis, а в MongoDB данные компонуется и записываются через определённые интервалы времени; ускорить отклик, так как Redis является резидентной СУБД.

Кэш организован по принципу ключ-значение, где ключом является идентификатор доски, а значением – сериализованный JSON с изменениями.

Следствием использования резидентной базы данных является риск потери части данных вследствие аварии. Однако риски обоснованы снижением задержки при операции чтения и нагрузки на основную базу данных при записи, также они минимизируются благодаря короткому интервалу времени между переносом данных.

4. Балансировка нагрузки через Nginx

Nginx выполняет две ключевые роли: распределение HTTP-запросов: Используется алгоритм Round Robin для равномерного распределения нагрузки между репликами Backend; управление WebSocket-соединениями: Nginx перенаправляет долгоживущие подключения на одну реплику, чтобы избежать разрывов сессий.

Конфигурация Nginx включает оптимизацию буферов и таймаутов, что повышает стабильность при пиковых нагрузках.

Несмотря на преимущества, балансировщик нагрузки является единой точкой отказа системы, поэтому требует глубокого понимания сетевых процессов для обеспечения его работоспособности.

5. Шаблон «Репозиторий»

Для работы с MongoDB применён паттерн «Репозиторий», который абстрагирует доступ к данным: репозитории инкапсулируют CRUD-операции, а сервисный слой использует их для бизнес-логики, что упрощает тестирование и замену источника данных.

Из недостатков применения данного шаблона можно отнести возможную избыточность кода и сложность реализации комплексных запросов. Однако этот подход обеспечивает изоляцию бизнес-логики, и, как следствие, гибкость, поскольку переход на другую СУБД потребует изменения только репозитория, а не всей системы [7].

6. Внедрение зависимости

Spring Boot Framework автоматически управляет зависимостями между компонентами: через контекст приложения создаются и связываются бины (объекты, управляемые Spring) [8]. К преимуществам данного подхода можно отнести упрощение замены зависимостей. Например, настоящие объекты заменяются на mock-объекты в unit-тестах.

Данная технология может вызывать сложность настройки при большом количестве связей и скрывать зависимости, однако её применение обусловлено сокращением времени разработки за счёт использования автоматической конфигурации.

7. Связь клиента и сервера через WebSocket

WebSocket используется для обеспечения двусторонней связи между клиентом и сервером, что критически важно для мгновенной синхронизации изменений на интерактивной доске. Принцип работы включает установление постоянного соединения без повторных HTTP-запросов и распространение событий при различных изменениях.

Преимуществом данного протокола является низкая задержка даже при частых обновлениях, обусловленная отсутствием накладных расходов на установку соединения для каждого события. К недостатку WebSocket можно отнести высокое потребление ресурсов (каждое соединение требует долговременного выделения памяти). Данная технология используется из-за эффективности работы в реальном времени [9].

Тестирование

Для оценки производительности системы проведено нагрузочное тестирование с использованием Apache JMeter. Тестирование имитировало сценарий одновременной работы пользователей, выполняющих операции рисования, добавления элементов и синхронизации изменений [10, 11]. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты нагрузочного тестирования

Конфигурация	Среднее время ответа сервера (мс)	Доля ошибок в обработке запросов (%)	Среднее количество отправляемых запросов в секунду
Одна реплика backend	6714	4,59	408
Три реплики backend	7234	0	612

Анализ данных показывает, что увеличение числа реплик Backend с 1 до 3 снизило долю ошибок до нуля за счёт распределения нагрузки, однако среднее время ответа возросло на 28%. Это связано с накладными расходами на синхронизацию данных между репликами через RabbitMQ и Redis. При этом пропускная способность системы (количество запросов в секунду) увеличилась на 50%, что подтверждает эффективность горизонтального масштабирования.

Важно отметить, что тестирование проводилось на локальном компьютере, где ресурсы процессора и памяти были разделены между сервисами приложения и инструментом тестирования. Это привело к конкуренции за ресурсы и ограничило многопоточную обработку. В промышленном развёртывании с выделенными серверами для Backend, Redis и RabbitMQ ожидается снижение времени ответа и рост количества обрабатываемых запросов.

Таким образом, результаты тестирования подтверждают, что архитектура способна масштабироваться горизонтально, обеспечивая отказоустойчивость и стабильную работу при высокой нагрузке.

Результаты

Разработанная архитектура продемонстрировала значительные результаты в увеличении производительности, поддержки масштабируемости и отказоустойчивости. Основные достижения и решённые проблемы приведены ниже.

1. Высокая производительность:

а) Использование Redis для кэширования текущих изменений снизило задержку при операциях чтения/записи.

б) Балансировка нагрузки (Nginx) и горизонтальное масштабирование позволили обрабатывать большее количество запросов в секунду.

2. Масштабируемость:

а) Микросервисная модель и Docker обеспечивают лёгкое добавление реплик Backend.

б) RabbitMQ гарантирует синхронизацию данных между репликами без конфликтов версий.

3. Отказоустойчивость:

а) При падении одной реплики Backend система продолжает работать за счёт автоматического перенаправления запросов через Nginx.

б) Redis минимизирует потерю данных при кратковременных сбоях.

4. Синхронизация в реальном времени:

Комбинация WebSocket и RabbitMQ обеспечивают низкую задержку синхронизации, что критически важно для совместной работы пользователей.

5. Высокая нагрузка на базу данных:

MongoDB становилась узким местом при частых запросах.

Redis взял на себя операции с краткосрочными данными, снизив нагрузку на MongoDB.

6. Рассогласованность данных между репликами:

Изменения на одной реплике не отражались на других.

RabbitMQ (паттерн «Издатель-Подписчик») синхронизировал данные через асинхронные сообщения.

7. Медленный отклик при росте пользователей:

Один сервер Backend не справлялся с нагрузкой.

Горизонтальное масштабирование и Nginx распределили запросы между репликами.

8. Уязвимость к сбоям:

Единый сервер Backend создавал риск полного отказа.

Репликация Backend и Health Checks в Nginx повысили отказоустойчивость.

Заключение

Разработанная архитектура демонстрирует высокую эффективность в условиях горизонтального масштабирования. Сочетание микросервисов, RabbitMQ и Redis, а также различных архитектурных и проектных шаблонов обеспечивает отказоустойчивость и производительность при нагрузке до 1000 элементов на доску. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию использования памяти в Redis с крупными досками, внедрение алгоритмов сжатия данных для WebSocket для снижения сетевой нагрузки и уменьшение накладных расходов при синхронизации через RabbitMQ за счёт пакетной обработки сообщений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаулер, М. Паттерны корпоративных приложений / М. Фаулер. – Москва: Диалектика-Вильямс, 2020. – 544 с.
2. Кочкин, Д.В. Проектирование и конструирование программного обеспечения : учебное пособие / Д.В. Кочкин, А.Н. Швецов. – Вологда : Вологод, 2023. – 127 с.
3. Ньюмен, С. Создание микросервисов / С. Ньюмен. – Санкт-Петербург: Питер, 2016. – 304 с.
4. Принципы построения самоорганизующихся информационно-телекоммуникационных систем / А.А. Суконщиков, А.Н. Швецов, И.А. Андрианов, Д.В. Кочкин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 1(100). – С. 56-67. – DOI 10.23859/1994-0637-2021-1-100-4.
5. Бартель, Й. Начало работы с AMQP и RabbitMQ / Й. Бартель // Журнал разработки программ. – 2009. – URL: <https://www.infoq.com/articles/AMQP-RabbitMQ>.
6. Интеллектуальные информационно-телекоммуникационные системы / А.Н. Швецов, А.А. Суконщиков, И.А. Андрианов [и др.]. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2023. – 127 с.
7. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Д. Влиссидес. – Санкт-Петербург: Питер, 2016. – 368 с.
8. Уоллс, К. Spring в действии / К. Уоллс. – Москва: ДМК Пресс, 2022. – 544 с.
9. Wang, V. The Definitive Guide to HTML5 WebSocket / V. Wang, F. Salim, P. Moskovits. – New York: Apress, 2013. – 227 p.
10. Development of a forecasting agent based on a fuzzy neural Petri net for predicting abnormal situations in automation systems / A.A. Sukonschikov, A.N. Shvetsov, I.A. Andrianov [et al.] // AIP Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 29-30 апреля 2021 года. – Vol. 2402. – Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. – P. 50025. – DOI 10.1063/5.0071782.
11. Краснов, А.А. Разработка системы тестов для тестирования веб-приложения / А.А. Краснов, Д.В. Кочкин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2024. – № 3(25). – С. 43-48.

REFERENCES

1. Fowler, M. Patterns of enterprise applications / M. Fowler. – Moscow: Dialectics-Williams, 2020. – 544 p.

2. Kochkin, D.V. Software design and construction: a tutorial / D.V. Kochkin, A.N. Shvetsov. – Vologda: Vologod, 2023. – 127 p.
3. Newman, S. Creating microservices / S. Newman. – St. Petersburg : Piter, 2016. – 304 p.
4. Principles of constructing self-organizing information and telecommunication systems / A.A. Sukonschikov, A.N. Shvetsov, I.A. Andrianov, D.V. Kochkin // Bulletin of Cherepovets State University. – 2021. – No. 1 (100). – P. 56-67. – DOI 10.23859/1994-0637-2021-1-100-4.
5. Bartel, J. Getting Started with AMQP and RabbitMQ / J. Bartel // Journal of Software Development. – 2009. – URL: <https://www.infoq.com/articles/AMQP-RabbitMQ>.
6. Intelligent Information and Telecommunication Systems / A.N. Shvetsov, A.A. Sukonschikov, I. A. Andrianov [et al.]. – Vologda: Vologda State University, 2023. – 127 p.
7. Object-Oriented Design Techniques. Design Patterns / E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, D. Vlissides. – St. Petersburg: Piter, 2016. – 368 p.
8. Walls, K. Spring in Action / K. Walls. – Moscow: DMK Press, 2022. – 544 p.
9. Wang, V. The Definitive Guide to HTML5 WebSocket / V. Wang, F. Salim, P. Moskovits. – New York: Apress, 2013. – 227 p.
10. Development of a forecasting agent based on a fuzzy neural Petri net for predicting abnormal situations in automation systems / A.A. Sukonschikov, A.N. Shvetsov, I.A. Andrianov [et al.] // AIP Conference Proceedings, Krasnoyarsk, April 29-30, 2021. – Vol. 2402. – Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. – P. 50025. – DOI 10.1063/5.0071782.
11. Krasnov, A.A. Development of a test system for testing a web application / A.A. Krasnov, D.V. Kochkin // Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences. – 2024. – No. 3(25). – P. 43-48.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ API ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ

DEVELOPMENT OF AN API ARCHITECTURE FOR STATIC APPLICATION SECURITY ANALYSIS

Горбунов В.А., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Gorbunov V.F., DrSc in Physics and Mathematics, professor, professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Кочкин Д.В., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Kochkin D.V., PhD in technical science, Docent, Associate Professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Сорокин Д.О., студент 4-го курса Института Математики, Естественных и Компьютерных Наук, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия

Sorokin D. O., 4th year student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, FSBEI HE «Vologda State University», Vologda, Russia

Аннотация. В статье рассматривается проблема проектирования архитектуры API для SAST-системы. Были использованы современные подходы и технологии, такие как микросервисная модель, Docker, Kafka, REST API, MVC, Spring Boot Framework, Nginx, SpotBugs для создания масштабируемого и отказоустойчивого решения. В статье также рассмотрены преимущества и недостатки выбранных технологий, а также их роль в обеспечении высокой производительности и надёжности SAST-системы. Результаты работы могут быть применены для разработки аналогичных систем, требующих высокой степени автоматизации и масштабируемости.

Ключевые слова: SAST, микросервисы, Kafka, REST API, Docker, балансировка нагрузки, кибербезопасность, CVE.

Abstract. The article considers the problem of designing an API architecture for a SAST system. Modern approaches and technologies such as the microservice model, Docker, Kafka, REST API, MVC, Spring Boot Framework, Nginx, SpotBugs were used to create a scalable and fault-tolerant solution. The article also discusses the advantages and disadvantages of the selected technologies, as well as their role in ensuring high performance and reliability of the SAST system. The results of the work can be applied to the development of similar systems that require a high degree of automation and scalability.

Keywords: SAST, microservices, Kafka, REST API, Docker, load balancing, cybersecurity, CVE.

Введение

В современном мире, где киберугрозы становятся всё более изощрёнными, обеспечение безопасности программного обеспечения является критически важным [1, 2]. SAST (Static Application Security Testing — статическое тестирование безопасности приложений) — это метод анализа исходного кода на наличие уязвимостей без выполнения программы. Статический анализ безопасности приложений позволяет выявлять уязвимости на этапе разработки, что значительно снижает риски эксплуатации небезопасного кода. SAST применяется в различных областях, включая разработку веб-приложений, мобильных приложений и embedded-систем.

Актуальность данной темы обусловлена растущим спросом на инструменты, которые могут интегрироваться в процессы непрерывной интеграции и доставки (CI/CD). Перспективы развития SAST связаны с автоматизацией анализа, улучшением точности обнаружения уязвимостей и снижением числа ложных срабатываний [3].

Постановка задачи

Основной задачей является разработка архитектуры API для SAST, которая обеспечит масштабируемость, гибкость и высокую производительность системы. Архитектура должна поддерживать анализ больших объёмов кода и быть легко интегрируемой в существующие процессы разработки. Для достижения этих целей необходимо решить следующие задачи: разделить систему на независимые компоненты, которые могут работать параллельно; обеспечить взаимодействие между компонентами через REST API и асинхронные сообщения; реализовать возможность горизонтального масштабирования системы за счёт использования Docker и балансировки нагрузки, чтобы обеспечить большое количество пользователей, одновременно работающих с системой; обеспечить возможность простой непрерывной поддержки системы; обеспечить интерфейс для взаимодействия с системой через веб-интерфейс.

Разработка архитектуры.

Для того чтобы определиться с архитектурой, необходимо понять, кто и как будет взаимодействовать с системой [4]. Для решения этой задачи на рисунке 1 приведена Use Case диаграмма. Используя Use Case диаграмму, можно чётко обосновать необходимость микросервисной архитектуры для SAST проекта. Она позволяет разделить систему на независимые компоненты, каждый из которых отвечает за определённую функциональность. Это особенно важно для SAST, где требуется высокая масштабируемость, гибкость и отказоустойчивость.

Приведём некоторые достоинства микросервисной модели [6]: возможна непрерывная доставка и развертывание крупных, сложных приложений; сервисы развертываются независимо друг от друга; сервисы масштабируются независимо друг от друга. Отсюда выходит, что микросервисная архитектура хорошо подходит для решения наших задач [7, 8].

После того, как мы установили, что архитектура системы SAST строится на основе микросервисной модели, которая обеспечивает гибкость и масштабируемость, перечислим основные компоненты системы:

1. UI (Пользовательский интерфейс): Веб-интерфейс для взаимодействия с системой. Пользователь может загружать проект, настраивать параметры анализа и просматривать результаты.

2. Менеджер: Основной компонент, который управляет процессом анализа. Менеджер принимает запросы от UI. Управляет базой данных приложения, отправляет запросы на анализ проектов.

3. Мастер: Координатор, который управляет работой агентов. Мастер отслеживает состояние агентов, распределяет задачи и обеспечивает балансировку нагрузки.

4. Агенты: Компоненты, которые выполняют непосредственно анализ кода. Каждый агент работает независимо и может быть запущен в отдельном Docker-контейнере.

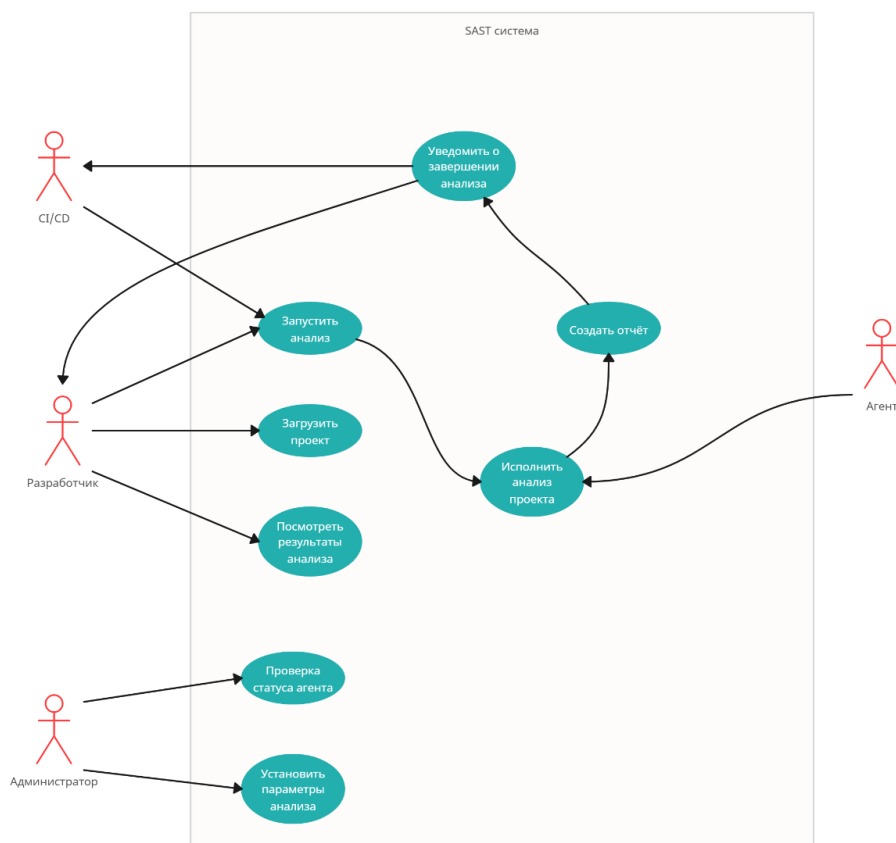


Рисунок 1 – Use Case диаграмма системы

На рисунке 2 представлена общая схема архитектуры приложения.

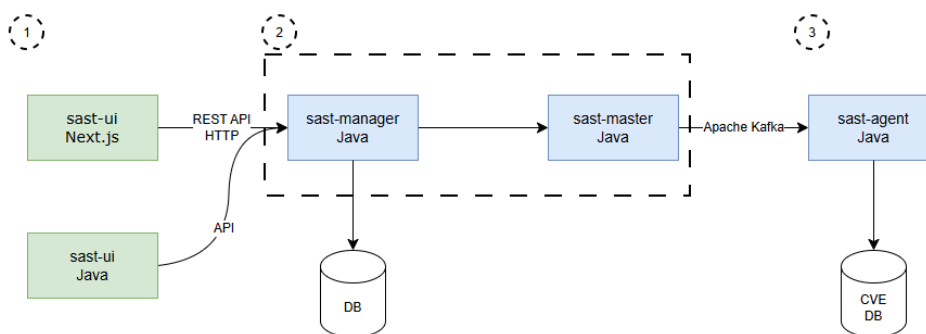


Рисунок 2 – Архитектура приложения

Пользовательский интерфейс (1) состоит из двух частей: 1) UI для пользователей сервиса; 2) UI для администрирования сервиса. UI общается с менеджером посредством протокола HTTP с использованием архитектурного стиля REST API.

На схеме мастер и менеджер (2) разделяются, но на практике решено было их объединить по следующим причинам: 1) упрощение архитектуры с точки зрения разработки; 2) снижение накладных расходов на общение между модулями; 3) упрощение балансировки нагрузки; 4) экономия ресурсов на содержание двух отдельных сервисов.

Мастер общается с агентом посредством распределённого программного брокера асинхронных сообщений Apache Kafka. Поскольку агент в данной системе является потенциально узким местом из-за долгого процесса анализа, то асинхронность Kafka пойдёт только на пользу [9].

Горизонтальное масштабирование легко осуществить с помощью docker, создавая множество экземпляров и установив балансировщик нагрузки nginx. Такой подход позволяет повысить отказоустойчивость системы с минимальными усилиями и потерями в производительности. На рис. 3 изображена схема горизонтального масштабирования системы.

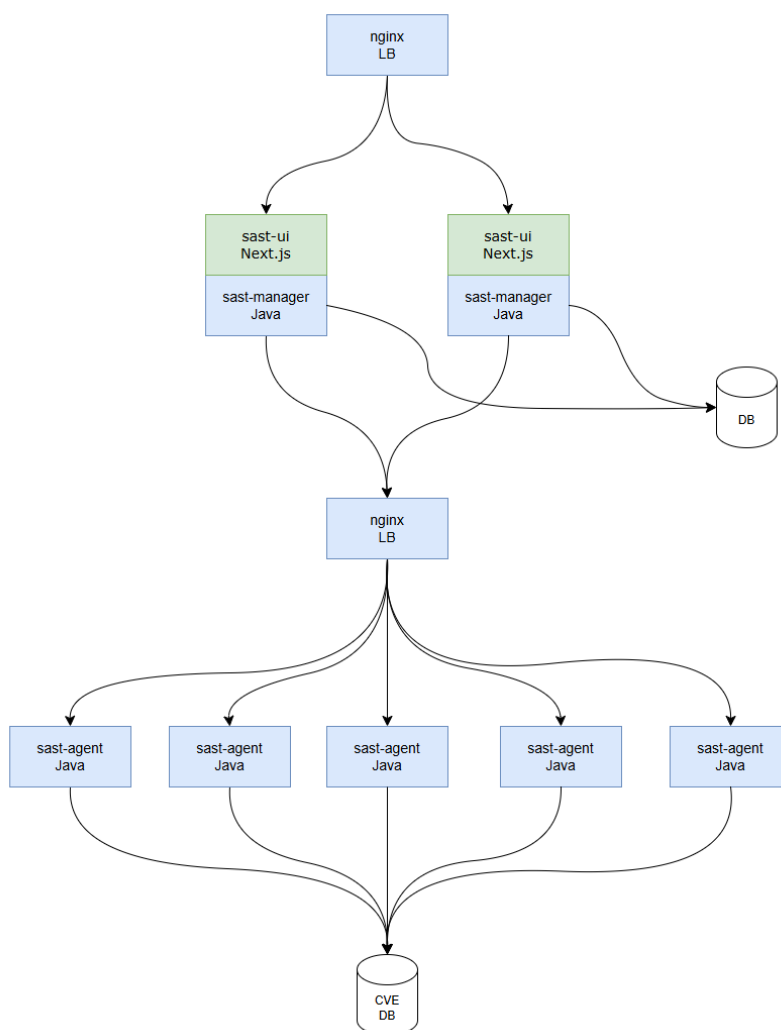


Рисунок 3 – Схема горизонтального масштабирования

Для обеспечения гибкости, масштабируемости и простой поддержки в процессе эксплуатации хорошо подходит шаблон проектирования MVC (Model – View – Controller), поскольку: 1) каждый компонент может разрабатываться и масштабироваться независимо. Например, можно изменить способ генерации отчётов (View), не затрагивая бизнес-логику (Model); 2) бизнес-логика (Model) может тестироваться отдельно от представления (View) и контроллеров (Controller). Общая UML-диаграмма для шаблона приведена на рисунке 4.

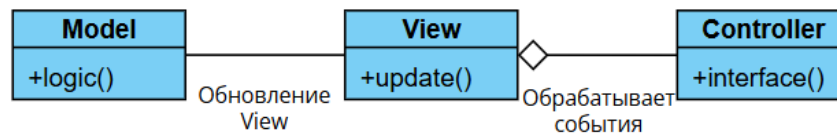


Рисунок 4 – UML-диаграмма MVC



Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма анализа проекта

Для реализации шаблона следует использовать Spring Boot Framework. Он имеет “из коробки” богатый инструментарий и позволяет сосредоточиться на написании кода [10] за счёт механизма автоматической конфигурации, ускоряющей процесс разработки.

На рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма анализа проекта. В данном алгоритме для анализа проекта используется сторонняя библиотека SpotBugs – инструмент статического

анализа кода для Java, который помогает выявлять потенциальные ошибки и уязвимости в коде. Выбор пал на него, так как у SpotBugs достаточно большое и активное сообщество, хорошее качество анализа, а также возможность создания собственного стиля для отчётов об ошибках. Единственным крупным недостатком этой библиотеки является то, что она рассчитана лишь на Java, поэтому для анализа кода на иных языках программирования придётся использовать иные библиотеки.

Заключение

Разработанная архитектура API для SAST обеспечивает высокую производительность, масштабируемость и удобство интеграции в процессы разработки. Использование микросервисной модели, Docker и Kafka позволяет гибко настраивать систему под конкретные задачи и масштабировать её в зависимости от объёмов анализируемого кода.

Внедрение подобной системы в процессы разработки позволит значительно повысить уровень безопасности программного обеспечения, снизить риски эксплуатации уязвимостей и ускорить процесс анализа кода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Building self-organizing information and telecommunications systems / A.A. Sukonschikov, A.N. Shvetsov, I.A. Andrianov, D.V. Kochkin // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября – 04 октября 2020 года. Vol. 1679. – Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32013. – DOI 10.1088/1742-6596/1679/3/032013.
2. Распределенные интеллектуальные информационные системы и среды / А.Н. Швецов, А.А. Суконщиков, Д.В. Кочкин [и др.] ; Под редакцией А.Н. Швецова и А.А. Суконщикова. – Курск : Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2017. – 197 с.
3. Кочкин, Д.В. Проектирование и конструирование программного обеспечения : учебное пособие / Д.В. Кочкин, А.Н. Швецов. – Вологда : Вологод, 2023. – 127 с.
4. Кочкин, Д.В. Информационные сети и телекоммуникации / Д.В. Кочкин, А.А. Суконщиков. Том часть 1. – Курск : Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2016. – 233 с.
5. Краснов, А.А. Разработка системы тестов для тестирования веб-приложения / А.А. Краснов, Д.В. Кочкин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2024. – № 3(25). – С. 43-48.
6. Ричардсон, К. Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга / К. Ричардсон. – Санкт-Петербург: Питер, 2019. – 544 с.
7. Модели и методы построения нейро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах / А.А. Суконщиков, И.А. Андрианов, С.В. Дианов [и др.]. – Курск : Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2021. – 152 с.

8. Интеллектуальные информационно-телекоммуникационные системы / А.Н. Швецов, А.А. Суконщиков, И.А. Андрианов [и др.]. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2023. – 127 с.

9. Скотт, Д. Kafka в действии / Д. Скотт, В. Гамов, Д. Клейн. – Москва: ДМК Пресс, 2022. – 310 с.

10. Уоллс, К. Spring в действии / К. Уоллс. – 6-е изд./ пер. с англ. А. Н. Киселева. – Москва: ДМК Пресс, 2022. – 544 с.

REFERENCES

1. Building self-organizing information and telecommunications systems / A.A. Sukonschikov, A.N. Shvetsov, I.A. Andrianov, D.V. Kochkin // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, September 25 – October 04, 2020. Vol. 1679. – Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32013. – DOI 10.1088/1742-6596/1679/3/032013.

2. Distributed intelligent information systems and environments / A.N. Shvetsov, A.A. Sukonschikov, D.V. Kochkin [et al.]; Edited by A.N. Shvetsov and A.A. Sukonschikov. – Kursk: Closed Joint-Stock Company "University Book", 2017. – 197 p.

3. Kochkin, D.V. Software Design and Construction : a tutorial / D.V. Kochkin, A.N. Shvetsov. – Vologda : Vologod, 2023. – 127 p.

4. Kochkin, D.V. Information Networks and Telecommunications / D.V. Kochkin, A.A. Sukonschikov. Volume Part 1. – Kursk : Closed Joint-Stock Company "University Book", 2016. – 233 p.

5. Krasnov, A.A. Development of a Test System for Testing a Web Application / A.A. Krasnov, D.V. Kochkin // Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences. – 2024. – No. 3(25). – P. 43-48.

6. Richardson, K. Microservices. Development and Refactoring Patterns / K. Richardson. – St. Petersburg: Piter, 2019. – 544 p.

7. Models and Methods for Building Neuro-Fuzzy Intelligent Agents in Information and Telecommunication Systems / A.A. Sukonschikov, I.A. Andrianov, S.V. Dianov [et al.]. – Kursk: Closed Joint-Stock Company "University Book", 2021. – 152 p.

8. Intelligent Information and Telecommunication Systems / A.N. Shvetsov, A.A. Sukonschikov, I.A. Andrianov [et al.]. – Vologda: Vologda State University, 2023. – 127 p.

9. Scott, D. Kafka in Action / D. Scott, V. Gamow, D. Klein. – Moscow: DMK Press, 2022. – 310 p.

10. Walls, K. Spring in Action / K. Walls. – 6th ed. / trans. from English by A. N. Kiseleva. – Moscow: DMK Press, 2022. – 544 p.

АРХИТЕКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕМОНТАМИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ARCHITECTURE OF A MULTI-AGENT INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR REPAIRS OF HEATING EQUIPMENT

Макаровский М.А., аспирант, ФГБОУ ВО "Вологодский государственный университет", Вологда, Россия **Makarovsky M.A.**, Postgraduate student, Vologda State University, Vologda, Russia

Швецов А.Н., доктор технических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО "Вологодский государственный университет", Вологда, Россия **Shvetcov A.N.**, DrSc in Technical Sciences, Professor, Professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Аннотация. В статье проведен анализ различных видов ремонтов оборудования АСУТП. Предложена трехуровневая интеллектуальная система, предназначенная для прогнозирования сроков обслуживания автоматизированного оборудования. Рассмотрены принципы функционирования городской газовой котельной, а также структура и взаимодействие уровней предложенной системы. В рамках исследования разработана мнемосхема для диспетчерского контроля ключевого оборудования котельной с использованием программного обеспечения MasterSCADA 4D. Для решения задач прогнозирования профилактики и ремонта применен мультиагентный подход.

Ключевые слова: архитектура, ремонт, АСУТП, SCADA-система, мультиагентный подход.

Abstract. The article analyzes various types of repairs for process control system (PCS) equipment. A three-level intelligent system is proposed, designed to predict maintenance schedules for automated equipment. The principles of operation of an urban gas boiler house are examined, along with the structure and interaction of the proposed system's levels. As part of the study, a mimic diagram was developed for dispatcher monitoring of key boiler house equipment using MasterSCADA 4D software. A multi-agent approach was applied to solve predictive maintenance and repair tasks.

Keywords: architecture, repair, automated control system, SCADA system, multi-agent approach.

Использование оборудования в системах промышленной автоматизации сопровождается влиянием множества факторов, приводящих к изменению его технического состояния и, в конечном итоге, к выходу из строя. Важной особенностью этих факторов является их случайный (стохастический) характер. Наиболее значимое воздействие на скорость износа оборудования оказывают: геометрические параметры, механические свойства

материалов и технологические нагрузки. Помимо них, следует учитывать соблюдение режимов технологического процесса, качество обслуживания и ремонта, уровень вибрации, температурные условия и другие факторы. Случайная природа этих воздействий обуславливает непредсказуемое изменение состояния устройств, их компонентов и механизмов, а также времени безотказной работы [1].

При проведении исследований в области ремонта оборудования промышленной автоматизации, необходимо выделить его основные стратегии: аварийно-восстановительный ремонт, планово-предупредительный ремонт, ремонт по техническому состоянию [2].

Аварийно-восстановительный ремонт представляет собой распространенный подход к обслуживанию промышленного оборудования, основанный на устранении последствий уже произошедших отказов. Хотя эта стратегия отличается простотой реализации и позволяет эксплуатировать технику до полного исчерпания ресурса, она обладает значительными недостатками. Основной проблемой являются неизбежные длительные простои оборудования, влекущие за собой существенные финансовые потери и высокие затраты на восстановительные работы. Как правило, такой метод применяется для второстепенного оборудования, выход которого из строя не парализует основные производственные процессы и не вызывает остановки всего технологического цикла.

Стратегия планово-предупредительного ремонта представляет собой системный подход к обслуживанию оборудования, основанный на регулярном выполнении профилактических работ согласно установленному графику. Периодичность обслуживания определяется индивидуально для каждого вида техники с учетом ее характеристик, условий эксплуатации и данных о предыдущих ремонтах. Такой метод позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные неисправности, предотвращая их развитие и минимизируя вероятность непредвиденных простоев. Однако он не гарантирует полного исключения отказов, что требует сохранения резервного фонда для аварийных ситуаций. В рамках стратегии предусмотрены три вида ремонтных работ (текущий, средний и капитальный), а также обязательный учет необходимых трудовых и материальных ресурсов для проведения профилактических мероприятий.

Стратегия ремонта по техническому состоянию представляет собой интеллектуальный подход к обслуживанию оборудования, при котором решение о проведении ремонтных работ принимается на основе данных диагностического мониторинга. Суть метода заключается в постоянном контроле ключевых рабочих параметров (вибрации, температуры, давления и других характеристик) с помощью современных датчиков и систем анализа. При достижении критических значений показателей выполняется плановый ремонт. Это позволяет снизить вероятность аварийных ситуаций, увеличить надежность работы и продлить срок службы оборудования.

Внедрение стратегии обслуживания по техническому состоянию позволяет достичь значительной экономической эффективности благодаря переходу на предиктивную модель управления.

Для повышения надёжности и оптимизации ремонтных процессов предлагается внедрение трехуровневой интеллектуальной системы. Ключевыми функциями системы станут: автономная работа оборудования, оснащение персонала дистанционным управлением

и мониторингом технологических процессов, а также прогнозирование времени до отказа теплотехнического оборудования путём анализа статистических данных.

Уровень мультиагентной системы

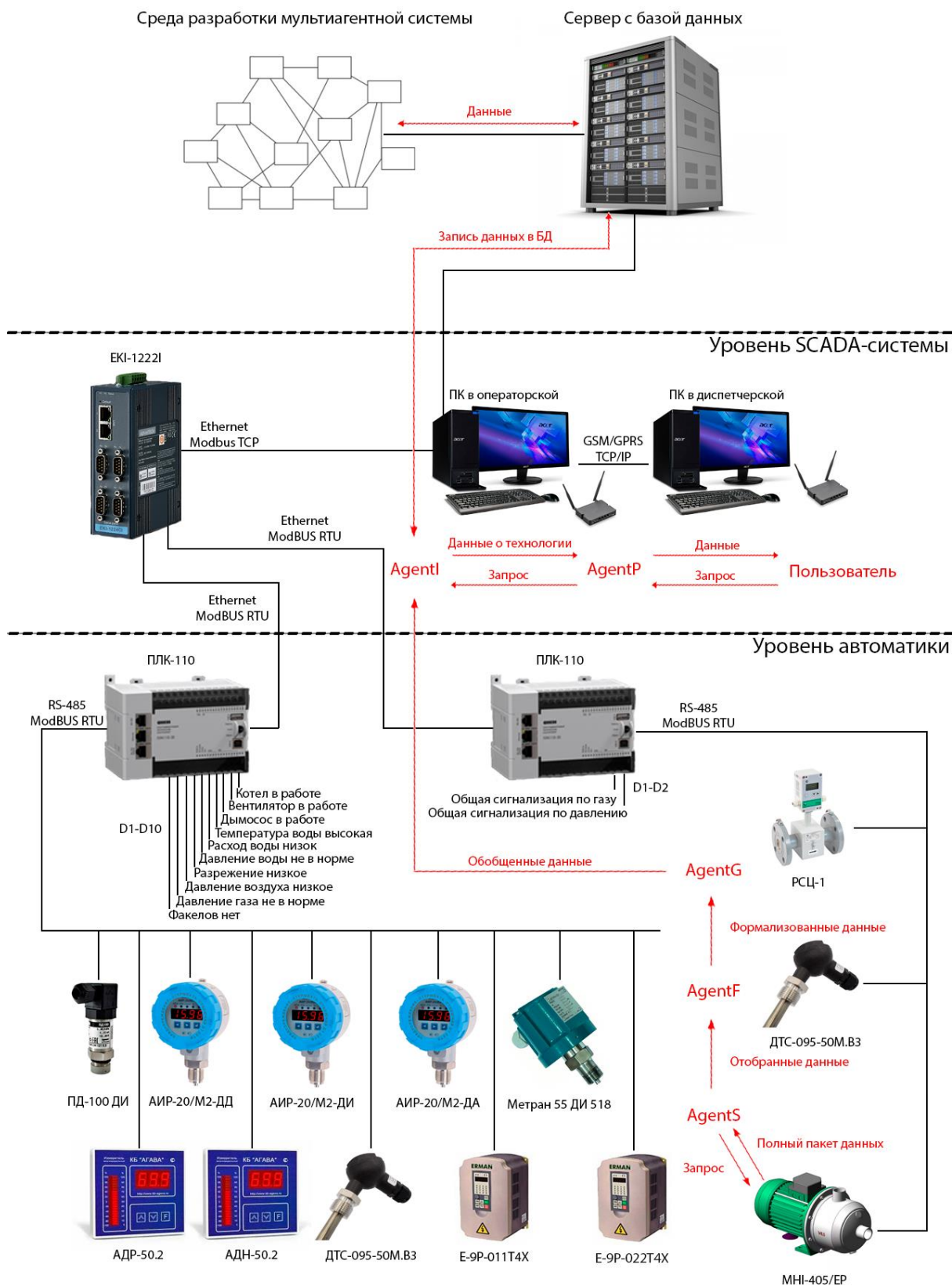


Рисунок 1 – Трёхуровневая архитектура интеллектуальной системы

Архитектура трёхуровневой интеллектуальной системы изображена на рисунке 1.

Нижний уровень системы реализован на базе стандартных средств автоматики. Без системы управления невозможно обеспечить безопасное и экономически целесообразное протекание технологических процессов. На данном уровне решаются задачи автоматического регулирования ключевых параметров: поддерживаются расчетные значения давления и температуры воды во всех контурах и на всех стадиях производства, контролируются расход воды и её уровень в резервуарах, а также другие критически важные технологические показатели [3].

К оборудованию нижнего уровня относятся: первичные контрольно-измерительные приборы, датчики-преобразователи, преобразователи частоты, электрические насосы, программируемые логические контроллеры и интерфейсы обмена данными.

Средний уровень архитектуры системы реализован на основе SCADA-решения, которое обеспечивает оперативный мониторинг и диспетчерское управление технологическими процессами в режиме реального времени параллельно с автоматическим регулированием. К ключевым функциональным возможностям данного уровня относятся: организация надежного обмена данными между оборудованием, наглядная визуализация технологических параметров, сбор и архивирование производственных данных, а также оперативное оповещение персонала об аварийных ситуациях.

К оборудованию среднего уровня относятся: персональные компьютеры, коммутаторы, модемы и роутеры.

Процесс генерации тепловой энергии в газовых котельных установках осуществляется по следующей технологической схеме. Вода из городского водопровода поступает в накопительные баки котельной, после чего направляется в водоподогреватель, где нагревается за счет теплообмена с сетевой водой и используется для технологических нужд. Одновременно в деаэрационных фильтрах происходит удаление растворенных газов из подпиточной воды, что предотвращает коррозионное разрушение металлических элементов системы. Деаэратор также выполняет функцию аккумуляции химически подготовленной воды, которая затем обогащается солевым раствором. Подпиточная станция компенсирует потери воды в системе, подавая дополнительный объем очищенной воды в сетевые магистрали. Циркуляционные насосы обеспечивают движение теплоносителя через водогрейные котлы и распределительную сеть. Параллельно природный газ поступает из городской газораспределительной сети в газорегуляторный пункт котельной, где его давление снижается до рабочих параметров перед подачей к горелочным устройствам. В топочной камере котла происходит смешение газа с воздухом, нагнетаемым вентиляторами, и последующее сгорание топливовоздушной смеси. Выделяющееся при этом тепло передается теплоносителю, который под давлением циркулирует по отопительным контурам, отдавая тепловую энергию потребителям. Охлажденный теплоноситель возвращается по обратным трубопроводам в котел для повторного нагрева, замыкая таким образом технологический цикл. Продукты сгорания, представляющие опасность для здоровья персонала, удаляются из системы дымососами через дымовую трубу [4].

Отображение параметров работы котельной осуществляется при помощи человеко-машинного интерфейса. Мнемосхема позволяет отслеживать состояние всего оборудования,

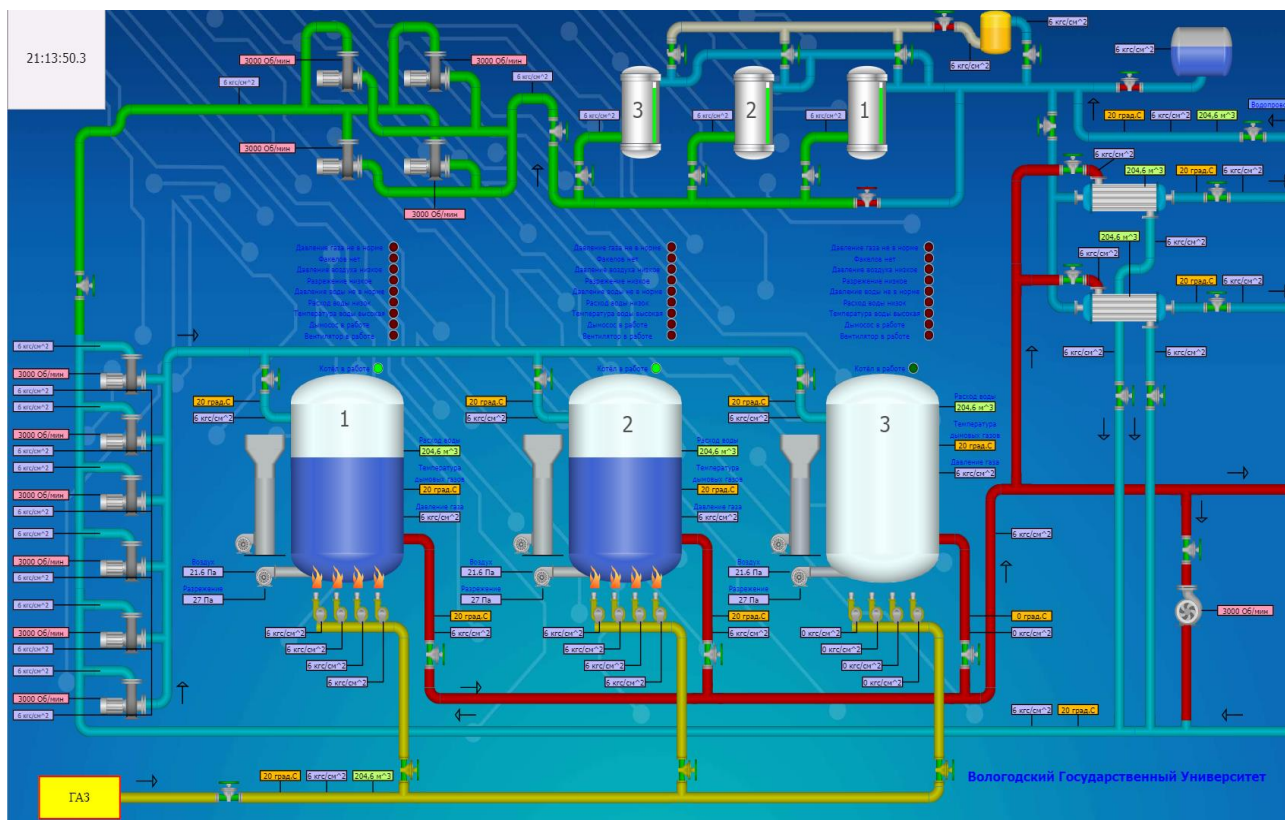


Рисунок 2 – Мнемосхема

давление, температуру теплоносителя на всех контурах, скорость вращения насосов, вентиляторов и дымососов [5].

В программном обеспечении MasterSCADA 4D разработана характерная для оборудования котельных мнемосхема, изображенная на рисунке 2.

Верхний уровень представляет мультиагентная система (МАС), основанная на многоагентном подходе, который является одним из перспективных направлений исследования сложных систем, позволяющий эффективно получать информацию о состоянии оборудования АСУТП [6].

Классический искусственный интеллект, используемый в экспертных системах, предполагает единого агента, обладающего всеми необходимыми ресурсами, функциональными возможностями и полным знанием предметной области для решения задачи. Однако некоторые задачи сложно или неэффективно решать в рамках одного агента, что привело к развитию распределенного ИИ и мультиагентных систем.

В МАС каждый агент обладает лишь ограниченными знаниями и решает только часть общей задачи, поэтому для решения сложных проблем необходимо их взаимодействие. Это обеспечивается специальной платформой, которая координирует асинхронную работу агентов, позволяя им обмениваться данными и согласованно достигать цели [7].

Предложенная архитектура мультиагентной системы на рисунке 3 реализует комплексный процесс сбора данных и их аналитической обработки с целью извлечения полезных знаний.

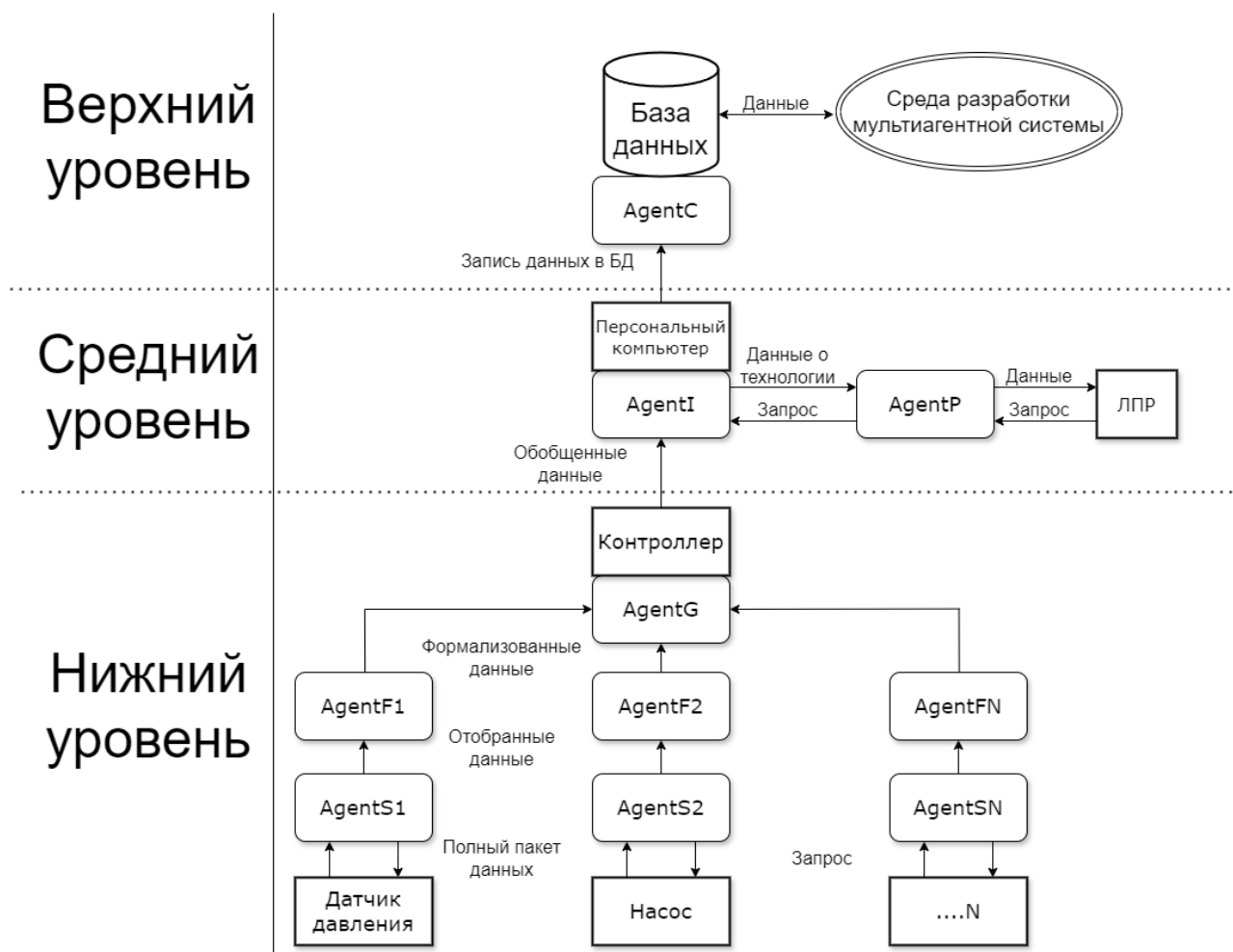


Рисунок 3 – Агентно-функциональная схема

Разработанная МАС включает несколько ключевых компонентов:

- организационные единицы, содержащие агентов и управляемые ими объекты;
- набор решаемых задач;
- среду функционирования системы;
- сеть взаимосвязей между агентами;
- совокупность возможных действий агентов [8].

Разработанная мультиагентная система имеет многоуровневую архитектуру, где каждый уровень представлен специализированными агентами с четко определенными функциями:

- AgentS (сенсорные агенты) - взаимодействуют с конкретными датчиками, осуществляют первичный сбор и фильтрацию данных по заданным критериям;
- AgentF (агенты форматирования) - приводят разнородные данные к единому стандартизированному виду;
- AgentG (агенты агрегации) - выполняют обобщение и консолидацию информации;
- AgentI (интерфейсные агенты) - организуют взаимодействие с пользовательскими данными и интерфейсами;
- AgentP (протокольные агенты) - определяют общие методы работы и стандарты данных для всей системы;

– AgentC (аналитические агенты) - проводят комплексный анализ собранной информации.

Каждый агентный тип представлен множеством экземпляров ($Agent_i$, где $i=1...n$), что обеспечивает масштабируемость и отказоустойчивость системы. Такая архитектура позволяет эффективно распределять вычислительную нагрузку и специализировать обработку данных на каждом этапе.

Для повышения эффективности управления технологическим процессом в мультиагентную систему интегрируются интеллектуальные алгоритмы и методы, реализованные непосредственно в программном коде агентов.

Основной целью представленного исследования была разработка трёхуровневой архитектуры интеллектуальной системы для прогнозирования профилактических и ремонтных работ котельного оборудования, которая позволит существенно сократить время и ресурсы, направленные на восстановление привычного рабочего режима после аварийной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаровский, М.А. Разработка SCADA-системы для котельного оборудования / М.А. Макаровский // XV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых. – Вологда, 2021. – С. 149-152.
2. Боровков, В.М. Теплотехническое оборудование : учеб. пособие / В.М. Боровков, А.А. Калютник, В.В. Сергеев. – Москва, 2015. – 192 с.
3. Бакаев, В.Н. Моделирование систем : учеб. пособие / В.Н. Бакаев. – Вологда, 2013. – 159 с.
4. Швецов, А.Н. Применение SCADA-системы для управления теплотехническим оборудованием / А.Н. Швецов, М.А. Макаровский // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – Вологда, 2023. – №2 (20). – С. 39-43.
5. Интеллектуальные системы автоматизации технологии: официальный сайт. – Москва, 2024. – URL: <https://www.insat.ru> (дата обращения: 03.03.2024).
6. Дианов, С.В. Синтез агент-ориентированных моделей для поддержки принятия решений по управлению промышленным предприятием / С.В. Дианов, А.Н. Швецов // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте. – Вологда, 2022. – С. 208-212.
7. Ситуационные интеллектуальные системы поддержки принятия решений / А.Н. Швецов, А.А. Суконщиков, Д.В. Кочкин, И.А. Андрианов // Университетская книга. – Курск, 2018. – 251 с.
8. Кузнецов, А. В. Краткий обзор многоагентных моделей / А.В. Кузнецов // Управление большими системами. – Воронеж, 2018. – Т. 71. – С. 6-44.

REFERENCES

1. Makarovsky, M.A. Development of a SCADA system for boiler equipment / M.A. Makarovsky // XV Annual scientific session of graduate students and young scientists. Vologda, 2021. – С. 149-152.

2. Borovkov, V.M. Heat engineering equipment : textbook. manual / V.M. Borovkov, A.A. Kalyutik, V.V. Sergeev. – Moscow, 2015. – 192 p.
3. Bakaev, V.N. Modeling of systems : textbook. the manual / V.N. Bakaev. – Vologda, 2013. – 159 p.
4. Shvetsov, A.N. The use of SCADA systems for control of thermal engineering equipment / A.N. Shvetsov, M.A. Makarovskiy // Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences. Vologda, 2023. – No. 2 (20). – P. 39-43.
5. Intelligent automation technology systems: official website. – Moscow, 2024. – URL: <https://www.insat.ru> (date of application: 03.03.2024).
6. Dianov, S.V. Synthesis of agent-oriented models for decision support in industrial enterprise management / S.V. Dianov, A.N. Shvetsov // Automation and energy saving in mechanical engineering, power engineering and transport. – Vologda, 2022. – P. 208-212.
7. Situational intelligent decision support systems / A.N. Shvetsov, A.A. Sukonshchikov, D.V. Kochkin, I.A. Andrianov // University Book. – Kursk, 2018. – 251 p.
8. Kuznetsov, A.V. A brief overview of multi-agent models / A.V. Kuznetsov // Management of large systems. – Voronezh, 2018. – Vol. 71. – P. 6-44.

АНАЛИЗ НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

ANALYSIS OF NEURAL SYSTEMS WITH FUZZY LOGIC

Чекавинский А.А., магистрант, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия **Chekavinskiy A.A.**, Master's student, Vologda State University, Vologda, Russia

Виноградова А.П., магистрант, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия **Vinogradova A.P.**, Master's student, Vologda State University, Vologda, Russia

Софронов А.Д., магистрант, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия **Sofronov A.D.**, Master's student, Vologda State University, Vologda, Russia

Десятова А.А., магистрант, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Вологда, Россия **Desyatova A.A.**, Master's student, Vologda State University, Vologda, Russia

Аннотация. В данной статье рассматривается эффективность применения нечетких нейронных сетей в сравнении с классическими системами на четкой и нечеткой логике. Исследование направлено на анализ практической целесообразности внедрения гибридных нейро-нечетких моделей в управление производственными процессами. В работе использована компьютерная модель системы автоматического управления, включающая методы четкого, нечеткого и нейро-нечеткого управления. В качестве базовой модели рассмотрена архитектура ANFIS, демонстрирующая принципы адаптивного нечеткого вывода. Результаты показали, что нейро-нечеткие системы обеспечивают сопоставимую точность регулирования с традиционными методами, но при этом обладают меньшей степенью ошибки и меньшей скоростью адаптации. Практическая значимость исследования заключается в обосновании выбора нейро-нечетких систем для автоматизации сложных технологических процессов.

Ключевые слова: нечеткие нейронные сети, нейро-нечеткие системы, ANFIS, гибридные системы, автоматическое управление, нечеткая логика, искусственные нейронные сети.

Abstract. The article examines the efficiency of fuzzy neural networks (FNN) compared to conventional systems based on crisp and fuzzy logic. The study focuses on the practical feasibility of implementing hybrid neuro-fuzzy models in industrial process control. A computer simulation of an automatic control system was used, incorporating crisp, fuzzy, and neuro-fuzzy control methods. The ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System) architecture was analyzed as a key model, demonstrating adaptive fuzzy inference principles. The results indicate that neuro-fuzzy systems provide comparable control accuracy to traditional methods while exhibiting lower error

rates and slower adaptation speeds. The practical significance of the research lies in justifying the choice of neuro-fuzzy systems for automating complex technological processes.

Keywords: fuzzy neural networks, neuro-fuzzy systems, ANFIS, hybrid systems, automatic control, fuzzy logic, artificial neural networks.

Нечеткие нейронные сети – это системы, которые комбинируют методы искусственных нейронных сетей и систем на нечеткой логике [1].

В данной работе рассмотрена проблема эффективности использования нечетких нейронных сетей по сравнению с четкой и нечеткой логикой. Исследование имеет значимость для решения компаний о внедрении нейронных сетей с нечеткой логикой на производство.

Цель исследования – сравнить эффект от внедрения нечетких нейронных систем с качеством работы четких и нечетких систем управления процессами.

Для достижения этой цели были поставлены задачи:

1. Изучить принцип работы нейронных систем с нечеткой логикой.
2. Исследовать и сравнить на практике эффекты от применения нечетких нейронных систем с эффектом четкого и нечеткого управления в рабочих процессах.

Для исследования была использована компьютерная модель системы автоматического управления с применением четкого, нечеткого управлений и нейро-нечеткой логики.

Принцип функционирования нейро-нечеткой модели в задачах автоматического управления может быть проиллюстрирован на примере наиболее распространённой модели ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System). ANFIS – адаптивная сеть нечеткого вывода – реализует нечёткую систему Такаги-Сугено и представляет собой пятислойную нейронную сеть прямого распространения сигнала.

Первый слой – определение нечетких термов входных параметров. Выходы узлов этого слоя представляют собой значения функции принадлежности при конкретных значениях входов.

Второй слой – определение посылок нечетких правил. Данный слой – неадаптивный. Каждый узел этого слоя соответствует одному нечеткому правилу. Узел второго слоя соединен с теми узлами первого слоя, которые формируют предпосылки соответствующего правила.

Третий слой – нормализация степеней выполнения правил. Неадаптивные узлы этого слоя рассчитывают относительный вес выполнения нечеткого правила.

Четвертый слой – определение вклада каждого правила в выход сети. Узел четвертого слоя рассчитывает вклад нечетких правил в выход сети.

Пятый слой – формирование управляющего сигнала.

Выбор нейро-нечетких моделей осуществляется в зависимости от класса решаемых задач. Так, для интеллектуального управления наибольшее применение получили модели ANFIS, FALCON, GARIC, NEFCON, FUN [2].

Нейронные системы с нечеткой логикой успешно внедрены в области управления технологического производства, автоматического управления транспортом, медицинской диагностике, технической диагностике, экономическом прогнозировании, распознавании объектов. Спектр приложений с применением нечеткой логики очень широкий – от

видеокамер и бытовых стиральных машин до средств наведения ракет ПВО и управления боевыми вертолетами. Практический опыт разработки систем нечеткого логического вывода свидетельствует, что сроки и стоимость их проектирования значительно меньше, чем при использовании традиционного математического аппарата, при этом обеспечивается требуемый уровень прозрачности и точности моделей [3].

Многие современные задачи управления просто не могут быть решены стандартными методами из-за увеличивающейся сложности вычисления в традиционных математических моделях. В настоящее время эффективным средством моделирования и исследования сложных систем, например, различных технологических процессов, управления робототехническими системами и беспилотными машинами, являются искусственные нейронные сети (ИНС), сети Петри и их расширения [4].

Гибридная сеть представляет собой многослойную сеть без обратной связи, в которой используются обычные сигналы, веса, функции принадлежности, а суммирование проходит на основе Т-нормы, значения весов данной сети представляют вещественные числа из отрезка от $[0,1]$. Идея, на которой построены гибридные сети, заключается в использовании имеющихся входных данных для определения параметров функции принадлежности, которые соответствуют системе нечеткого вывода.

Для нахождения параметров функций принадлежности используют обучение нейронных сетей [5]. На рисунке 1 представлены результаты моделирования при помощи ANFIS нейронных моделей с четкой логикой, нечеткой логикой и стандартной системы регулирования.

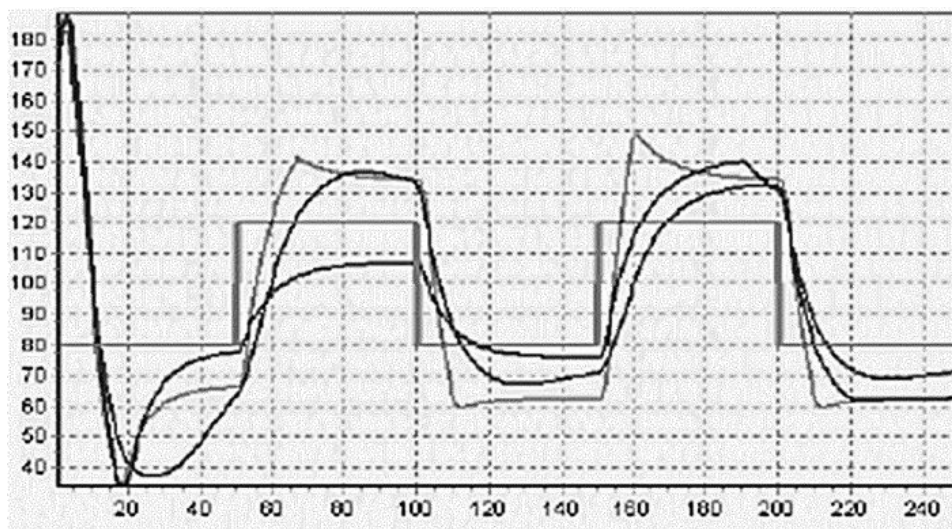


Рисунок 6 – Результаты автоматического регулирования

Проведенные исследования показали, что применение нечетких нейронных систем показывает приблизительно одинаковые результаты с четким и нечетким управлениями по отклонению от заданного сигнала и скорости регулирования. Степень ошибки, как и скорость регулирования, при использовании нейро-нечеткой системы ниже, чем у других систем.

На основании проведенного исследования приходим к выводу, что внедрение нечетких нейронных систем для управления производственными процессами может заменить

традиционные принципы управления с незначительной разницей точности и качества регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети : учебное пособие / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – 2-е изд., стер. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2012. – 284 с.
2. Андриевская, Н.В. Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления / Н.В. Андриевская, А.С. Резников, А.А. Черняев // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11 (7). – С. 1445-1449. – URL : <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35784> (дата обращения: 25.03.2025).
3. Полковская, М.Н. Нечеткая логика и нейронные сети : учебное пособие / М.Н. Полковская // ИрГАУ. – 2023. – 116 с. – URL : http://195.206.39.221/fulltext/i_033659.pdf (дата обращения: 26.03.2025).
4. Горбунов, В.А. Использование нейро-нечетких сетей Петри в моделировании различных производственных процессов / В.А. Горбунов, Д.Ю. Крюкова, А.А. Суконщиков // *Вестник Череповецкого государственного университета*. – 2024. – №3 (120). – С. 19-33. – URL : <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-3-120-2> (дата обращения: 25.03.2025).
5. Ханевский, А.А. Сравнение результатов моделирования нейро-нечеткой сети / А.А. Ханевский // *Научный журнал* : [сайт]. – 2019. – URL : <https://scientificmagazine.ru/images/PDF/2019/35/sravnenie-rezultatov.pdf> (дата обращения: 26.03.2025).

REFERENCES

1. Borisov, V.V. Fuzzy models and networks: a tutorial / V.V. Borisov, V.V. Kruglov, A.S. Fedolov. – 2nd ed., reprinted. – Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom, 2012. – 284 p.
2. Andrievskaya, N.V. Features of the application of neuro-fuzzy models for the problems of synthesis of automatic control systems / N.V. Andrievskaya, A.S. Reznikov, A.A. Chernyaev // *Fundamental research*. – 2014. – No. 11 (7). – P. 1445-1449. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35784> (date of access: 03/25/2025).
3. Polkovskaya, M.N. Fuzzy logic and neural networks: a tutorial / M.N. Polkovskaya // IrSAU. – 2023. – 116 p. – URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_033659.pdf (accessed: 03/26/2025).
4. Gorbunov, V.A. Using neuro-fuzzy Petri networks in modeling various production processes / V.A. Gorbunov, D.Yu. Kryukova, A.A. Sukonshchikov // *Bulletin of Cherepovets State University*. – 2024. – No. 3 (120). – P. 19-33. – URL: <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-3-120-2> (accessed: 03/25/2025).
5. Khanevsky, A.A. Comparison of the results of modeling a neuro-fuzzy network / A.A. Khanevsky // *Scientific journal*: [site]. – 2019. – URL: <https://scientificmagazine.ru/images/PDF/2019/35/sravnenie-rezultatov.pdf> (date of access: 03/26/2025).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE AND SOFTWARE MODULES DESIGNED
FOR ENGINEERING CALCULATIONS AND PHYSICAL PROCESS MODELING**

Мамонтов О.В., студент магистратуры, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Mamontov O.V., Master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Ягодкин А.С., кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой информационных технологий, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Yagodkin A.S., PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Department of Information Technology, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ существующего программного обеспечения и программных модулей, предназначенных для выполнения инженерных расчетов и моделирования физических процессов. Для сравнения применяется метод многокритериального сравнения альтернатив. В качестве критериев сравнения выбраны функциональные возможности расчетов, возможность автоматизации и расширения, а также совместимость с другими программами. В рамках такого подхода выяснилось, что оптимальной является гибридная CAD/CAE-система Autodesk Inventor.

Ключевые слова: многокритериальный метод сравнения, программное обеспечение, программные модули, выполнение инженерных расчетов, моделирование физических процессов.

Abstract. The article provides a comparative analysis of existing software and software modules designed to perform engineering calculations and model physical processes. The method of multi-criteria comparison of alternatives is used for comparison. The criteria for comparison are the functionality of calculations, the possibility of automation and expansion, as well as compatibility with other programs. Within the framework of this approach, it was found that the hybrid CAD/CAE system Autodesk Inventor is optimal.

Keywords: multi-criteria comparison method, software, software modules, performing engineering calculations, modeling of physical processes.

Введение

Программное обеспечение и программные модули, предназначенные для инженерных расчетов и моделирования физических процессов, являются неотъемлемой частью проектирования и оптимизации конструкций в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, авиакосмическая промышленность, энергетика. Такие системы позволяют инженерам выполнять точные расчеты прочности, динамики, теплопередачи и других физических процессов, что существенно ускоряет процесс проектирования и повышает качество продукции. Также они решают задачи повышения надежности, эффективности и снижения себестоимости, что достигается с помощью мощных и высокоточных программных решений, включающие как CAD-системы (системы компьютерного проектирования), так и CAE-системы (системы компьютерного анализа). Особую роль данные системы играют в России, где в последние годы возрастает потребность в выработке собственных инженерных решений. Вследствие санкционного давления и ограниченного импорта высокотехнологичных продуктов, разработка и использование высококачественного инженерного ПО становится не только вопросом производительности, но и вопросом национальной безопасности. [1].

В последнее время активно разрабатываются и улучшаются решения, которые объединяют функциональность CAD и CAE, обеспечивая комплексный подход к проектированию и расчетам. Такие системы позволяют проводить динамические и нелинейные анализы, а также учитывать множество факторов в реальном времени. Данные системы должны поддерживать автоматизацию процессов и возможность интеграции с различными форматами и программами. При этом программное обеспечение должно соответствовать высоким требованиям к совместимости с другими программами, которые активно применяются в отечественной промышленности [2], надежности и возможности масштабирования, что особенно важно для пользователей в России, где большое внимание уделяется стоимости и доступности технической поддержки.

Цель данной работы – выбрать оптимальный для выполнения инженерных расчетов и моделирования физических процессов вариант программного обеспечения и программных модулей. Для достижения поставленной цели будем применять системный подход [3] и рассматривать подходящие существующие решения и модули, используя многокритериальные методы сравнения. Это позволит решить проблему с учетом ее комплексности.

Обзор программного обеспечения и модулей

Рассмотрим существующие варианты программного обеспечения и модулей, предназначенных для выполнения инженерных расчетов и моделирования физических процессов.

1) Одно из самых мощных и универсальных программных решений для решения инженерных и физических задач в самых различных отраслях – это ANSYS Multiphysics. Геометрические модели могут быть созданы как внутри ANSYS, так и импортированы из внешних CAD-систем. В основе движка лежит метод конечных элементов (FEM), который используется для анализа напряжений, теплопередачи, вибраций, динамики и других физических явлений. Также поддерживаются методы конечных объемов. ANSYS Meshing Engine обеспечивает точность и высокое качество сеток, что критически важно для точности расчетов [4].

ANSYS Multiphysics представляет собой полнофункциональную систему для решения инженерных задач:

- Структурный анализ (включая линейный и нелинейный анализ напряжений, деформаций, усталости, вибраций, устойчивости);
- Тепловой анализ (моделирование теплопередачи, включая стационарные и нестационарные процессы);
- Анализ гидродинамики, аэродинамики, теплообмена и процессов, связанных с движением жидкости и газа;
- Электромагнитный анализ (моделирование электромагнитных полей, включая статические и динамические процессы);
- Мультифизический анализ (сочетание нескольких типов физических процессов);
- Тестирование на усталость;
- Топологическая оптимизация формы.

К плюсам ANSYS Multiphysics можно отнести высокую точность расчетов и проверку результатов, что обеспечивает необходимую надежность. Высокая вычислительная эффективность, включая возможности работы на суперкомпьютерах для обработки больших моделей, обеспечивает высокую производительность. Система обеспечивает широкий спектр функциональности, от структурного анализа до многофизического моделирования.

К минусам можно отнести высокую стоимость лицензии, сложность освоения программного обеспечения и отсутствие ассоциативной связи с CAD.

2) Далее рассмотрим программный модуль SOLIDWORKS Simulation, разработанный для системы SOLIDWORKS CAD. Он предназначен для выполнения инженерных расчетов в рамках единой среды проектирования, что делает его особенно удобным для конструкторов и инженеров на этапах разработки изделий.

SOLIDWORKS Simulation представляет собой модуль гибридной CAD/CAE-системы для решения различных инженерных задач:

- Линейный статический анализ конструкций (деформации, напряжения, перемещения);
- Модальный анализ (вычисление собственных частот и форм колебаний);
- Тепловой анализ (стационарный и нестационарный);

- Нелинейный анализ (контакт, пластичность, большие перемещения);
- Динамический анализ;
- Тестирование на усталость;
- Топологическая оптимизация формы [5].

К плюсам SOLIDWORKS Simulation можно отнести наличие ассоциативной связи с CAD, а также наличие сценариев по параметрам модели и поддержка макросов.

К минусам можно отнести высокую стоимость лицензии, ограниченные функциональные возможности, а именно отсутствие многофизического моделирования и высокоточной аэродинамики. Также среди минусов можно отметить низкую точность анализа и ручную доработку расчетной сетки, при сложной геометрии.

3) APM FEM – это система прочностного анализа, для работы в интерфейсе российской CAD-системы КОМПАС-3D. Модуль входит в состав комплекса APM WinMachine – отечественного программного обеспечения, предназначенного для выполнения инженерных расчетов, проектирования и моделирования физических процессов. Программа ориентирована на применение в машиностроении, приборостроении, строительстве и смежных отраслях.

APM FEM представляет собой модуль для CAD-системы и позволяет выполнять:

- Статический расчет;
- Расчет собственных частот (резонанса) и форм колебаний;
- Топологическую оптимизацию;
- Расчет задачи стационарной теплопроводности;
- Расчет нестационарной теплопроводности (в комплектации PROF);
- Расчет задачи термоупругости (при совместном выполнении статического и теплового расчетов);
- Нелинейный расчет, а именно учет физической и геометрической, а также общей нелинейности (в комплектации PROF);
- Топологическую оптимизацию [6].

К плюсам APM FEM можно отнести стоимость лицензии, тесную интеграцию с ГОСТ и СНиП, а также наличие документации и техподдержки полностью на русском языке. Система работает напрямую с геометрической моделью КОМПАС-3D, не используя сторонние форматы, что снижает вероятность появления ошибок.

К минусам относятся ограниченные функциональные возможности, а именно отсутствие многофизического моделирования и высокоточной аэродинамики. Также среди минусов можно отметить низкую точность моделирования, слабую поддержку автоматизации (скрипты, макросы) и ограниченные возможности адаптации под конкретные задачи.

4) Последней рассмотрим Autodesk Inventor. Это мощная профессиональная система, которая предназначена для машиностроения и промышленного дизайна, с интегрированной средой для инженерного анализа компонентов и сборок. Также одним из ключевых преимуществ Inventor является наличие модуля инженерного анализа — Inventor Nastran, который позволяет проводить расчёты прочности и других физических процессов прямо в CAD-среде [7].

Autodesk Inventor представляет собой гибридную CAD/CAE-систему для решения различных инженерных задач:

- Линейный статический анализ конструкций;
- Нелинейный анализ (материалы, контакты, геометрия);
- Модальный анализ — собственные частоты и формы колебаний;
- Анализ теплопередачи (стационарный и нестационарный);
- Анализ вибраций и динамики;
- Тестирование на усталость;
- Контактный анализ (включая трение, зазоры и зацепления);
- Комбинированные многофизические задачи (например, термомеханика);
- Топологическую оптимизацию.

К плюсам Autodesk Inventor можно отнести наличие ассоциативной связи с CAD, а также наличие сценариев по параметрам модели и поддержка макросов, также самую низкую стоимость лицензии среди подобных западных систем.

К минусам можно отнести, ограниченные функциональные возможности, в сравнении с ANSYS Multiphysics. Также среди минусов можно отметить низкую точность анализа и ручную доработку расчетной сетки, при сложной геометрии.

Сравнительный анализ

Для принятия решения по выбору оптимального программного обеспечения и программных модулей из перечисленных выше вариантов вводится прогрессивная шкала по нескольким критериям [8]. В качестве критериев для сравнения были выбраны:

- функциональные возможности расчетов;
- возможность автоматизации и расширения;
- совместимость с другими программами.

Сравнение критериев проводилось вербально на основании опроса пользователей систем выполнения инженерных расчетов и моделирования физических процессов. Коэффициенты их сравнительной значимости b_{ij} определялись по прогрессивной шкале отношений (3:5:7) [9]. Причем самым значимым был выбран такой критерий, как возможность автоматизации и расширения, затем функциональные возможности расчетов и, наконец, совместимость с другими программами (см. круговую диаграмму на Рис. 1). По выбранным коэффициентам рассчитывался вектор матрицы сравнения ρ_i по формуле [9-11]:

$$\rho_i = \sqrt[k]{\prod_{l=1}^k b_{il}}, \quad (1)$$

где $k = 3$ – количество системно обоснованных критериев.

Затем на основании собранной информации о программном обеспечении и программных модулях, с учетом их достоинств и недостатков по прогрессивной шкале формировались коэффициенты попарного сравнения альтернатив a_{ij} по каждому критерию отдельно [9-11]. По последним составлялась матрица:

$$\omega_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{m=1}^n a_{ijm}}, \quad (2)$$

где $n = 4$ – число систем; j – порядковый номер системы; i – порядковый номер критерия сравнения.

Для нормировки использовалось соотношение:

$$\omega_{ijn} = \frac{\omega_{ij}}{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}}, \quad (3)$$

Сравнительный анализ проводился по индикатору сравнения для каждой системы:

$$\Omega_j = \sum_i \rho_i \omega_{ijn}. \quad (4)$$

Для выполнения расчетов по формулам многокритериального метода сравнения альтернатив (1) – (4) была составлена программа, результаты работы которой представлены на рисунке 1.

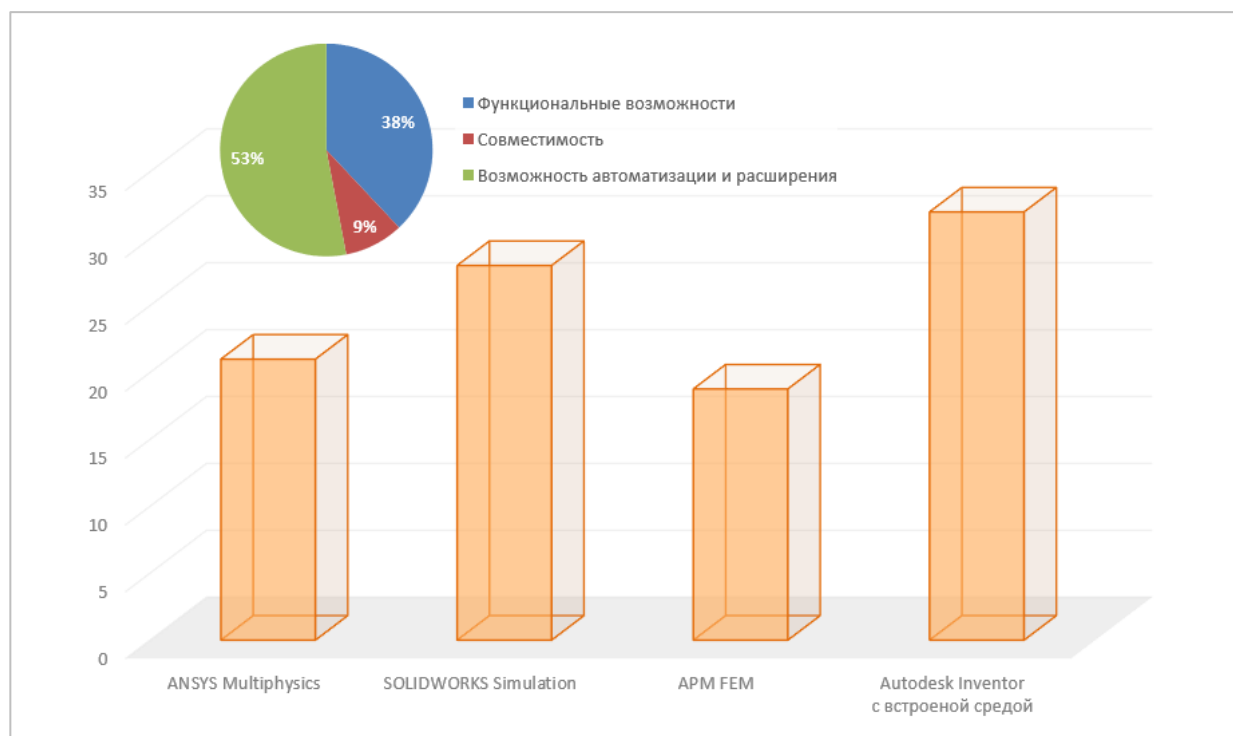


Рисунок 1 – Результаты сравнения программного обеспечения и программных модулей многокритериальным методом

Итоги сравнения альтернатив программного обеспечения по выбранным критериям показали (см. гистограмму на Рис. 1), что наиболее перспективной для проведения инженерных расчетов и моделирования физических процессов является гибридная CAD/CAE-система Autodesk Inventor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паночевный, П.Н. Применение CAD/CAM/CAE технологий в современном машиностроении / П.Н. Паночевный, В.Р. Некрасов // Научно-практические исследования. 2018. – № 3 (12). – С. 128-132.
2. Возможности отечественных систем инженерного анализа (CAE) / В.В. Шелофаст, В.С. Прокопов, В. В. Шелофаст, С.М. Розинский // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта

(CAD/CAM/PDM - 2016) : труды XVI-ой международной молодёжной конференции, Москва, 17-19 октября 2016 года. – Москва: ООО "Аналитик", 2016. – С. 19-23.

3. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.

4. Точный обмен данными для мультифизического моделирования / Официальный сайт компании «Ansys». – URL: <https://www.ansys.com/products/system-coupling> (Дата обращения 08.04.2025 г.).

5. SOLIDWORKS Simulation / Официальный сайт компании «SOLIDWORKS». – URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-simulation> (Дата обращения 08.04.2025 г.).

6. Система прочностного анализа APM FEM для КОМПАС-3D / Официальный сайт компании «АПИМ». – URL: <https://apm.ru/apm-fem> (Дата обращения 08.04.2025 г.).

7. Autodesk Inventor: программное обеспечение для 3D-моделирования для дизайнеров и инженеров / Официальный сайт компании «Autodesk». – URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1&term=1-YEAR&tab=subscription> (Дата обращения 08.04.2025 г.).

8. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

9. Системный подход к проблеме обоснования модернизации лесозаготовительных машин / П.И. Попиков, Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, В.С. Полянин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 2, ч. 2 (13-2). – С. 296-300.

10. Кузнецов, Д.С. Применение метода анализа иерархий для обоснования выбора наиболее эффективного корчевателя / Д.С. Кузнецов, Е.В. Поздняков, Н.Ю. Евсикова // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 1, № 1 (26). – С. 91-95.

11. Оценка эффективности механизмов корчевательных машин методом сравнения альтернатив Саати / И.М. Бартенев, Е.В. Поздняков, А.К. Поздняков, М.В. Шавков // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 1, № 1 (23). – С. 91-95.

REFERENCES

1. Panochevny, P.N. Application of CAD/CAM/CAE technologies in modern mechanical engineering / P.N. Panochevny, V.R. Nekrasov // Scientific and practical research. 2018. – No. 3 (12). – P. 128-132.

2. Capabilities of domestic engineering analysis systems (CAE) / V.V. Shelofast, VS. Prokopov, V.V. Shelofast, S.M. Rozinsky // Systems of design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product (CAD / CAM / PDM - 2016): proceedings of the XVI-th international youth conference, Moscow, October 17-19, 2016. – Moscow: ООО "Analytic", 2016. – P. 19-23.

3. Theoretical foundations of system analysis / V.I. Novosel'tsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by V.I. Novosel'tsev. – Moscow: Mayor, 2006. – 592 p.

4. Accurate data exchange for multiphysical modeling / Official website of the company "Ansys". – URL: <https://www.ansys.com/products/system-coupling> (Accessed on 04/08/2025).

5. SOLIDWORKS Simulation / Official website of the company "SOLIDWORKS". – URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-simulation> (Accessed on 04/08/2025).
6. APM FEM strength analysis system for KOMPAS-3D / Official website of the company "APM". – URL: <https://apm.ru/apm-fem> (Accessed on 04/08/2025).
7. Autodesk Inventor: 3D modeling software for designers and engineers / Official website of the company "Autodesk". – URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1&term=1-YEAR&tab=subscription> (Accessed on 04/08/2025).
8. Saati, T. Decision Making. The Analytic Hierarchy Processing Method / T. Saati; trans. from English by R.G. Vachnadze. – Moscow: Radio i svyaz, 1993. – 278 p.
9. A systems approach to the problem of justifying the modernization of logging machines / P.I. Popikov, N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, V.S. Polyanin // Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice. – 2015. – No. 2, part 2 (13-2). – P. 296-300.
10. Kuznetsov, D.S. Application of the hierarchy process analysis method to justify the choice of the most effective uprooter / D.S. Kuznetsov, E.V. Pozdnyakov, N.Yu. Evsikova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Vol. 1, No. 1 (26). – P. 91-95.
11. Evaluation of the efficiency of uprooting machine mechanisms using the Saati alternatives comparison method / I.M. Bartenev, E.V. Pozdnyakov, A.K. Pozdnyakov, M.V. Shavkov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2018. – Vol. 1, No. 1 (23). – P. 91-95.

**ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ,
ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАРОК РЕАГЕНТОВ**

**APPLICATION OF THERMAL, PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESS MODELING SETUP
TO DETERMINE THE EFFICIENCY OF EXISTING REAGENTS**

Федорова О.А., преподаватель СПО, **Fedorova O.A.**, College teacher, Voronezh
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Савенко Е.С., преподаватель СПО, ФГБОУ **Savenko E.S.**, College teacher, Voronezh State
ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Проведен анализ компоновки и принципов работы установки моделирования тепловых, физических и химических процессов в системах внешнего контура охлаждения атомных электростанций. Установка позволяет оценить эксплуатационную эффективность различных марок реагентов, которые препятствуют образованию осадков на поверхности оросителя и хлопьев кальцита в воде бассейна градирни. Представлена технологическая схема устройства и рассмотрены основные этапы организации процесса сравнительного испытания реагентов. На основе новых требований безопасности и эффективности работы установки предложены пути её модернизации.

Ключевые слова: атомные электростанции, установка моделирования процессов, модель градирни, панель контроля и управления процессами, блок подогрева оборотной воды.

Abstract. The analysis of the layout and operating principles of the installation for modeling thermal, physical and chemical processes in the external cooling circuit systems of nuclear power plants is carried out. The installation allows to estimate the operational efficiency of various brands of reagents that prevent the formation of deposits on the surface of the sprinkler and calcite flakes in the water of the cooling tower pool. The technological scheme of the device is presented and the main stages of organizing the process of comparative testing of reagents are considered. Based on the new requirements for the safety and efficiency of the installation, ways of its modernization are proposed.

Key words: nuclear power plants, process modeling installation, cooling tower model, process control and management panel, circulating water heating unit.

Введение

Моделирование водно-химического режима системы внешнего контура охлаждения на экспериментальной установке позволяет изучать многофакторные процессы с высокой точностью при соблюдении идентичности физических и химических процессов. Несмотря на

то, что данная установка в настоящее время удовлетворяет базовым требованиям, развитие технологий и изменения в нормативных документах требуют обновления системы с целью повышения её надежности и безопасности. В соответствии с отраслевым планом мероприятий по поддержанию и улучшению эксплуатационной безопасности башенных испарительных градирен, необходимо провести модернизацию установки, которая позволит обеспечить соответствие современным стандартам и требованиям.

Техническое описание и принцип действия установки моделирования тепловых и химических процессов внешнего контура охлаждения АЭС

Для предложения возможных путей решения задачи необходимо разобраться в структуре и принципах работы установки. Это позволит определить элементы, модернизация которых будет наиболее целесообразна, как с точки зрения эффективности, так и безопасности. Установка включает в себя отдельные агрегаты, соединенные гидравлическими и электрическими сетями. В ее состав входят несколько основных компонентов: модель градирни (ГТ); блок подогрева оборотной воды (БПВ) и панель управления и контроля технологического процесса (ПКУ).

К сетям относятся: трубопроводная система, состоящая из магистралей подпиточной воды, воды продувки, воды компенсации воды уноса упариванием и каплеуносом, магистралей оборотной воды и быстрого залива, магистралей слива воды продувки в канализацию; электрическая сеть; беспроводная сеть.

Модель градирни устанавливается снаружи, вне помещения, для обеспечения оптимальной производительности в условиях, приближенных к реальным. Блок подогрева и панель управления всеми процессами установки устанавливается в соответствующем защищенном помещении. Это должно обеспечить эффективный текущий контроль со стороны оператора и облегчить корректировки, которые могут потребоваться.

Для удобства сборки и разборки оборудования, а также для выполнения различных рабочих операций во время испытательных циклов и технического обслуживания, в комплекте с МГ должны быть предусмотрены прочные леса с платформами и лестницами. Для работы в зимнее время наружные трубы имеют систему обогрева с использованием термокабеля и термоскотча.

Сигналы с датчиков рН, ЭП транслируются в режиме реального времени и сохраняются в памяти контроллера. Ожидаемое время цикла испытания типа реагента от одной до двух недель. Для определения наступления времени окончания цикла испытания каждые 5 дней снимаются параметры изменения веса пластмассового купона. При достижении значимых величин изменений его веса принимается решение об окончании испытаний. Между циклами испытаний производится промывка МК, БПВ и труб, техническое обслуживание их узлов с восстановлением начальных характеристик. Ороситель в каждом цикле устанавливается новый.

Реагент для применения в испытательном цикле разбавляется в соотношении 1:1000 от товарной концентрации. Это позволяет обеспечивать дозировки 1-50 мг/литр реагента на подпиточную воду. Расход оборотной воды $Q_{ОВ}$ постоянно поддерживается на величине 3000 л/час, и контролируется импульсным расходомером, по сигналам с которого изменяется

производительность насоса H_1 магистрали оборотной воды частотным преобразователем. Через магистраль продувки из бассейна градирни ежедневно удаляется вода из верхних слоёв с задаваемым расходом $Q_{пр}$. Требуемый расход $Q_{пр}$ обеспечивается перистальтическим насосом $ПН_{пр}$ производительностью до 100 л/час уставкой потенциометра $ПН_{пр}$, контроль величины расхода по ротаметру. Через магистраль компенсации продувки постоянно из магистрали подпиточной воды подаётся в бассейн МГ вода подпитки с расходом $Q_{мп} = Q_{пр}$. Подача производится перистальтическим насосом $ПН_{мп}$ производительностью до 100 л/час. Величина расхода обеспечивается уставкой потенциометра $ПН_{мп}$, контроль расхода по ротаметру [1].

Вода уносится из оборотной системы упариванием и каплеуносом. Поэтому уровень в бассейне МГ понижается. Уровень воды в бассейне автоматически поддерживается между верхним и нижним значениями. По сигналам датчиков уровней включается и выключается подача воды для компенсации потерь при упаривании и каплеуносе перистальтическим насосом $ПН_{кв}$ производительностью до 100 л/час. Количество добавленной воды учитывается постоянно контроллером по сигналам импульсного счётчика.

Нагнетающий вентилятор имеет производительность 3500 - 6500 м³/час. Производительность настраивается при запуске МГ в работу жалюзи на входном патрубке вентилятора и автоматически поддерживается в процессе цикла испытания частотным преобразователем по сигналу с датчика температуры воды в бассейне.

Снижение величины потерь воды оборота от каплеуноса достигается увеличением расстояния между оросителем и каплеуловителем с помощью специальных вставок в корпус МГ и регулировкой угла наклона жалюзи каплеуловителя.

В МГ применены следующие способы регулирования и поддержания параметров [2]:

- постоянной гидравлической нагрузки на ороситель поддержанием постоянного расхода оборотной воды $Q_{об} = 3000$ л/час.

- постоянной температуры T_1 на входе в МК отключением и подключением поточных водоподогревателей БПВ по сигналу датчика температуры на входе в МГ;

- постоянной температуры T_2 в бассейне МГ изменением производительности вентилятора МГ частотным преобразователем по сигналу датчика температуры на бассейне МГ;

Предусмотрено аварийное отключение установки при превышении воды в бассейне верхнего уровня или при понижении воды ниже нижнего уровня по контактными датчиками реле уровня РОС-1.

Установка служит для проведения предварительных испытаний по моделированию тепловых физических и химических процессов систем внешнего контура охлаждения АЭС, позволяющих определить эксплуатационную эффективность существующих марок реагентов, препятствующих образованию [3]:

- осадков на поверхности оросителя;
- хлопьев кальцита в воде бассейна градирни.

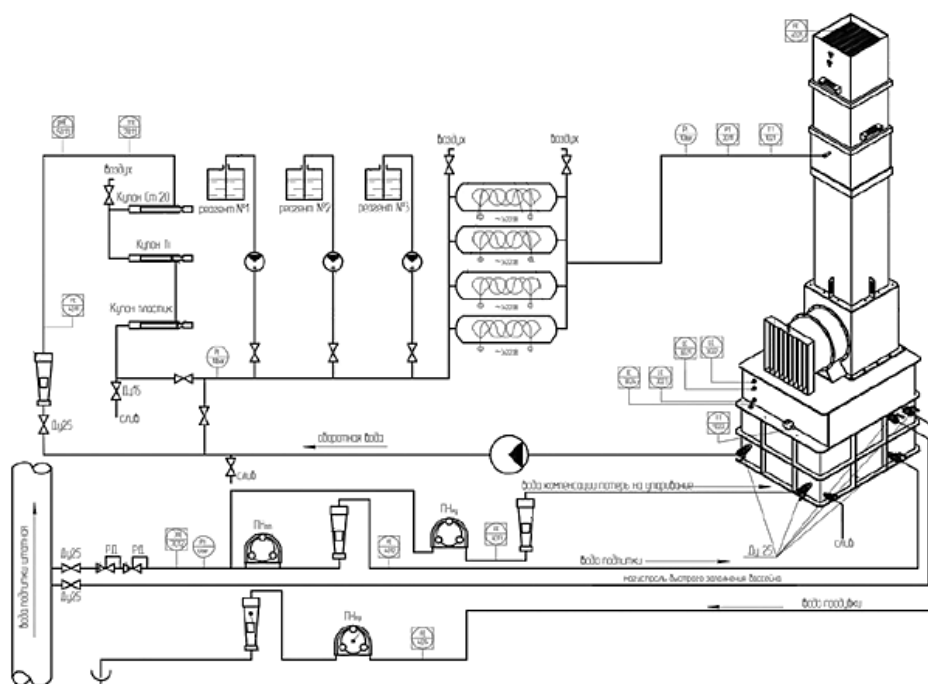


Рисунок 1 – Технологическая функциональная схема УМП

Технологическая схема установки моделирования представлена на рисунке 1.

Эффективность реагента объективно устанавливается приборными методами при моделировании технологического процесса охлаждения оборотной воды в градирне. При моделировании обеспечивается идентичность физических и химических процессов на поверхности оросителя установки физическим и химическим процессам на поверхности оросителя штатной градирни.

Идентичность обеспечивается поддержанием в течении цикла испытания базовых параметров:

- максимальная температура воды на входе в градирню T_1 ;
- предельная температура воды в бассейне градирни T_2 ;
- максимальная гидравлическая нагрузка на оросителе;
- коэффициент упаривания K_y в заданном коридоре;
- применение типа оросителя, используемого объекте моделирования;
- использование исходной воды объекта моделирования.

Для получения приемлемого времени испытания в Установке базовые параметры поддерживаются на значениях: $T_1 = 50$ °C, $T_2 = 35$ °C, $q = 15$ м/час. Параметры T_1 , T_2 , q поддерживаются системой автоматического управления постоянными по величине с максимально возможной точностью во всё время цикла испытания.

Параметр K_y определяется установкой непрерывно и выводится на дисплей. На дисплей автоматически выводится рекомендуемая коррекция расхода воды продувки для удержания величины K_y в заданном коридоре в случае выхода его значения K_y из коридора

Организация процесса сравнительного испытания конкурирующих реагентов включает в себя следующие этапы:

- подготовке установки к циклу испытания;
- проведение цикла испытания;
- заключительные работы после завершения цикла испытания;
- подготовительные работы для начала следующего цикла испытания;
- анализ полученных объективных результатов в течении сессии испытаний и выдача заключения по эффективности испытанных реагентов.

Оператор ежедневно по этим данным корректирует режим продувки.

В начале и по окончании цикла испытания производятся контрольные взвешивания: оросителя; пластин сбора кальцитов; купонов. По результатам контрольного взвешивания определяются величины изменения массы: оросителя; пластин сбора кальцитов; стального купона; титанового купона; пластмассового купона. Величина однозначно характеризует свойства реагента. Если она меньше единицы, то предлагаемый на замену реагент эффективней базового.

Заключение

Данная УМП выполняет изначальные требования, возложенные на систему, но согласно отраслевому плану мероприятий по поддержанию и повышению безопасности эксплуатации башенных испарительных градирен необходимо провести модернизацию установки, позволяющую обеспечить требуемые параметры. Достигнуть нужных показателей можно путем замены блока теплообменников на пластинчатый теплообменник. Целью модернизации является достижение следующих параметров [4, 5]:

- температура воды в греющем (внутреннем, закрытом) контуре на выходе из котельного агрегата задается автоматикой и в процессе эксплуатации поддерживается от 60 до 90 °С;
- циркуляция воды в греющем (внутреннем, закрытом) контуре обеспечивается насосом с 3 ступенями производительности: 32, 45, 55 л/мин;
- циркуляция воды в нагреваемом (внешнем, открытом) контуре составляет 3 м³/ч;
- целевая температура нагретой воды 50 °С;
- целевая температура охлажденной воды 32 °С;
- теплообменник должен обеспечивать удельный тепловой поток не менее 2 Вт/см², что обеспечивает оптимальное время проведения эксперимента.

Для решения данной задачи необходимо провести анализ конструкции теплообменника, расчет теплогидравлических параметров, определить оптимальную по размерам и конфигурации поверхность теплопередачи. Выбрать тип теплообменника, соответствующий требованиям эксплуатационных режимов работы установки УМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химические вещества и материалы, влияющие на работу оборудование атомных электростанций. Основные требования. Стандарт организации. СТО 1.1.1.02.005.1116-2016. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. – 57 с.

2. Водно-химический режим атомных станций. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. РБ-002-16. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. – 10 с.

3. Шимова, Ю.С. Моделирование химико-технологических процессов: учеб. пособие / Ю.С. Шимова, Н.Ю. Демиденко, Е.В. Лис ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2021. – 94 с.

4. Организация и проведение модернизации систем и оборудования атомных станций. Стандарт организации. СТО 1.1.1.04.003.0542-2019. – Москва: АО «ВНИИАЭС», 2020. – 150 с.

5. Теплообменное оборудование для атомных электростанций. Технические требования эксплуатирующей организации. СТО 1.1.1.01.001.0889-2013. – Нижний Новгород: ООО «НЭЦЯТ», 2021. – 30 с.

REFERENCES

1. Chemicals and materials affecting the operation of nuclear power plant equipment. Basic requirements. Organization standard. STO 1.1.1.02.005.1116-2016. – Moscow: JSC «Concern Rosenergoatom», 2016. – 57 p.

2. Water chemistry of nuclear power plants. Safety Guide for the use of atomic energy. RB-002-16. – Moscow : JSC «Concern Rosenergoatom», 2016. – 10 p.

3. Shimova, Yu.S. Modeling of chemical-technological processes: textbook / Yu.S. Shimova, N.Yu. Demidenko, E.V. Lis; Siberian State University named after M.F. Reshetnev. – Krasnoyarsk, 2021. – 94 p.

4. Organization and implementation of modernization of systems and equipment of nuclear power plants. Organization standard. STO 1.1.1.04.003.0542-2019. – Moscow : JSC «VNIIAES», 2020. – 150 p.

5. Heat exchange equipment for nuclear power plants. Technical requirements of the operating organization. STO 1.1.1.01.001.0889-2013. – Nizhny Novgorod : ООО «NNECNT», 2021. – 30 p.

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ УСТАНОВКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО КОНТУРА ОХЛАЖДЕНИЯ АЭС

CALCULATION OF A HEAT EXCHANGER FOR A SIMULATION INSTALLATION OF PROCESSES IN THE EXTERNAL COOLING CIRCUIT SYSTEM OF A NUCLEAR POWER PLANT

Федорова О.А., преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Fedorova O.A., College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Федоров Д.М., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Fedorov D.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Савенко Е.С., преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Savenko E.S., College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность модернизации установки моделирования процессов в системе внешнего контура охлаждения АЭС путем замены блока теплообменников на пластинчатый теплообменник. В результате конструктивного и гидравлического анализа был рекомендован теплообменник с 33 пластинами, работающий по принципу противоточности сред, что позволяет достичь требуемых параметров работы установки. Достигнуто соответствие эксплуатационным режимам, а также оптимальные размеры и конфигурация поверхности теплопередачи. Подтверждена эффективность выбранной конструкции теплообменного аппарата, его характеристик и наличие запаса по теплообменной поверхности.

Ключевые слова: установка моделирования процессов, пластинчатый теплообменник, удельный тепловой поток, коэффициент теплопередачи, контур.

Abstract. This article discusses the possibility of upgrading the setup for modeling processes in the external cooling loop of a nuclear power plant by replacing the heat exchanger unit with a plate heat exchanger. As a result of the design and hydraulic analysis, a heat exchanger with 33 plates operating on the principle of counter-current media was recommended, which allows achieving the required operating parameters of the setup. Compliance with operating modes, as well as optimal dimensions and configuration of the heat transfer surface were achieved. The efficiency of the selected design of the heat exchanger, its characteristics and the presence of a reserve on the heat exchange surface were confirmed.

Key words: process simulation unit, plate heat exchanger, specific heat flux, heat transfer coefficient, circuit.

Введение

В современных условиях энергоснабжения безопасность и эффективность атомных электростанций играют решающую роль в оценке надежности энергосистемы в целом. Образование накипи и биоотложений не допускается, так как это может существенно ухудшить работу открытых систем охлаждения. Реагенты, препятствующие этим процессам, становятся необходимым условием обеспечения надежной и бесперебойной работы оборудования.

Установка моделирования процессов (УМП) является современным инструментом, который может быть использован для детального анализа и оценки эффективности реагентов в открытых системах охлаждения атомных электростанций. Растущие требования к надежности и производительности системы охлаждения, а также соответствие отраслевым стандартам требуют проведения модернизации. В частности, одной из ключевых задач совершенствования установки является обновление блока теплообменников. В связи с этим замена традиционного теплообменника на пластинчатый теплообменник может стать важным шагом на пути к реальному достижению требуемого уровня производительности и надежности системы.

Анализ принципа работы и теплового баланса установки моделирования процессов в градирне

Установка моделирования процессов в градирне состоит из двух контуров – внутреннего и внешнего. Внутренний контур состоит из котельной установки и теплообменника, тепло котла передается во внешний контур через теплообменник. Внешний контур состоит из теплообменника и модельной градирни, вода из теплообменника принимает тепло от внутреннего контура и охлаждается на градирне.

Принципиальная схема установки для моделирования схематично представлена на рисунке 1, расшифровка обозначений представлена в таблице 1.

Закрытый оборотный цикл состоит из котла мощностью 70 кВт с системой поддержания температуры, буферной емкости, циркуляционного насоса. Вода закрытого цикла охлаждается на блоке теплообменников. Встроенная электроника котла поддерживает постоянную температуру воды на выходе из котла. Котловая вода охлаждается на пластинчатом теплообменнике, который необходимо подобрать для поддержания параметров температуры в установке.

Циркуляционный насос, открытого оборотного цикла, направляет охлажденную воду после градирни на блок дозирования и контроля. Вентилем К-4 обеспечивается необходимая скорость потока воды в блоке дозирования и контроля. Далее вода проходит через пластинчатый теплообменник, и нагретая вода направляется на градирню. Подпитка системы осуществляется из бака подпиточной воды по открытию, закрытию клапана.

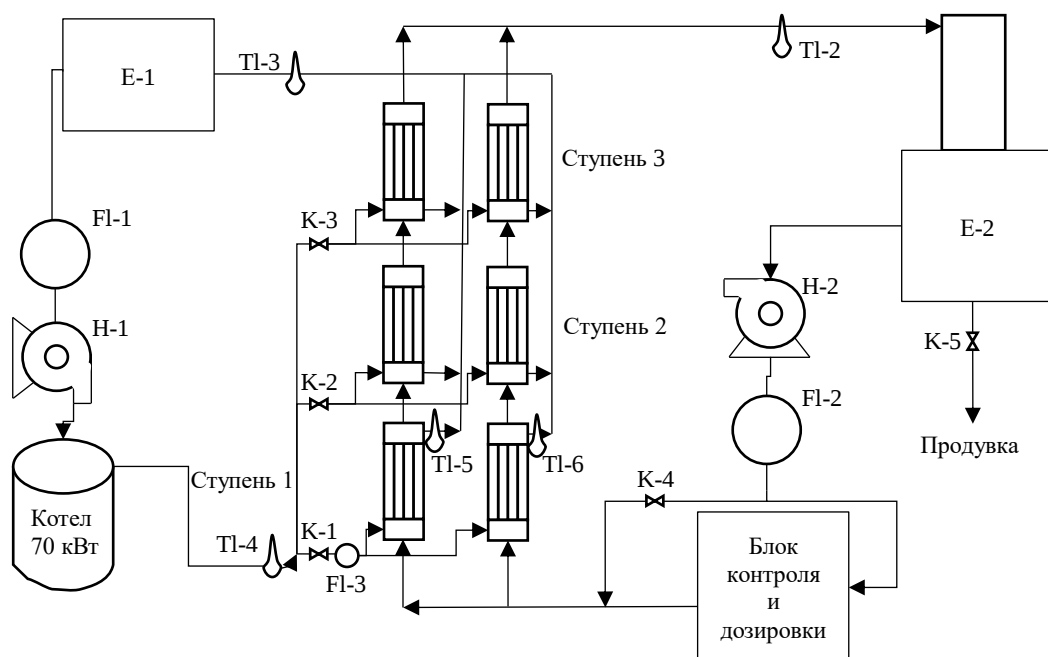


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для моделирования

Таблица 1 – Расшифровка обозначений к рисунку 1

E-1	Буферная емкость внутреннего контура, 1000
E-2	Бассейн градирни, 700 л тез
FI-1	Расходомер внутреннего контура
FI-2	Расходомер внешнего контура
K-1, K-2, K-3	Клапаны регулировки (электромагнитные)
TI-3	Датчик температуры холодной воды внутреннего контура
TI-4	Датчик температуры нагретой воды внутреннего контура
TI-5, TI-6	Датчики температуры охлажденной воды внутреннего контура первой ступени теплообменников
N-1	Циркуляционный насос внутреннего контура (до 7000л/час)
N-2	Циркуляционный насос внешнего контура (3000 л/час)

Блок теплообменников представляет собой теплообменный аппарат пластинчатого типа, который обеспечивает заданные температуры в установке и удельный тепловой поток менее 2 Вт/см².

Рассмотрим принцип работы установки. В первом контуре количество тепла, вырабатываемое котельным агрегатом, зависит от температуры на выходе из котла и задается автоматикой. После котла нагретая вода попадает в пластинчатый теплообменник, отдавая тепло во второй контур. После теплообменника охлажденная вода возвращается на нагрев в котел.

Во втором контуре нагретое рабочее тело после теплообменника идет на охлаждение в градирную установку для дальнейшего охлаждения до целевой температуры открытого

контура. Температура охлажденной воды поддерживается регулированием оборотов вентилятора с помощью ПЧВ-1 (Рис. 1).

По исходным данным перепад температур воды на входе и на выходе из градирни составляет 15°C. Необходимо найти режим работы установки, в котором будет соблюдаться тепловой баланс установки, теплота, отдаваемая котельным оборудованием первому контура, должна совпадать с теплотой, отдаваемой теплоносителем через градирню в окружающую среду.

Результаты расчета теплового баланса в зависимости от начальной температуры после котельного агрегата и расходов в закрытом и открытом контурах и теплоперепада на градирне, с параметрами: температуре охлаждаемого теплоносителя 35°C, температура нагреваемого теплоносителя 50 °C представлены в таблице 2 [2, 5].

Таблица 2 – Результаты теплового баланса в зависимости от температуры после котельного агрегата и заданном расходе

Параметры	При расходе $G_1 = 0,53 \text{ кг/с}$				При расходе $G_1 = 0,7 \text{ кг/с}$				При расходе $G_1 = 0,91 \text{ кг/с}$			
Температура после котельного агрегата, °C	60	70	80	90	60	70	80	90	60	70	80	90
Температура 1 контура после теплообменника, °C	36	46	56	66	42	52	62	72	46	56	66	76
Теплота, выделяемая котельным агрегатом и отдаваемая градирней, кВт	52											

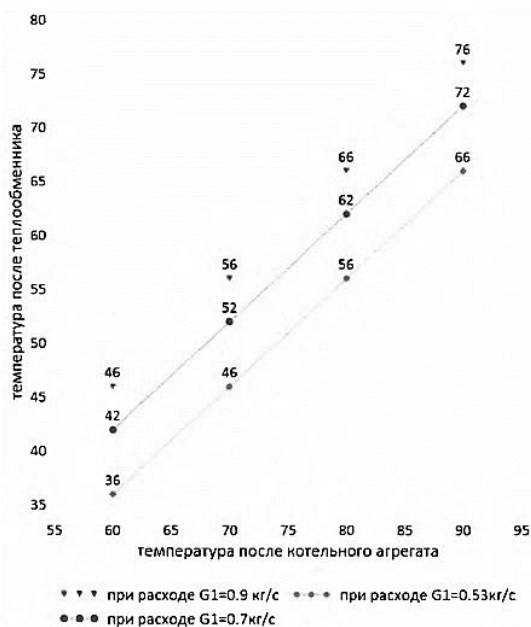


Рисунок 2 – График зависимости температуры теплоносителя после теплообменника в первом контуре от температуры после котельного оборудования и расхода в первом контуре

Из графика видно, что при повышении температуры после котельного агрегата, при неизменных параметрах во втором контуре, температура после теплообменника также

повышается и имеет линейную зависимость, а также и при повышении расхода в первом контуре температура возрастает.

Результаты расчета для случая соблюдения рекомендованных параметров. В таблицах 3-5 представлены параметры рабочих сред и теплообменника при различных перепадах температуры на градирни при различных расходах воды [1].

Рассмотрим пластинчатый теплообменник с числом пластин 33 шт. и площадью 4,2 м².

Таблица 3 – Результаты расчетов для теплообменника при различных перепадах температур на градирни ($G_1 = 0,53$ кг/с)

Параметр	Перепад температур											
Перепад на градирни, ΔT , °C	15				10				13			
Расход 1 контур, к/с	0,53											
Расход 2 контур, к/с	0,833											
Температура после котла, °C	58	59	60	61	54	56	58	59	56	57	58	59
Температура до теплообменника 2 контур, °C	32				37				34			
Температура после теплообменника 2 контур, °C	47											
Количество энергии передаваемый в теплообменнике, кВт	52,2				34,8				45,25			
тепловой поток, Вт/см²	1,49	1,8	2,1	2,38	0,889	1,496	2,057	2,332	1,12	1,44	1,742	2,03
Эффективная площадь, м²	3,49	2,89	2,48	2,18	3,91	2,327	1,69	1,49	4	3,138	2,59	2,229
Коэффициент запаса, %	18,8	43,4	66,86	89,69	5,95	78,33	145	177	2,87	32,2	59,7	86,2
Коэффициент теплопередачи Вт/м²·K	2628,6	2633,7	2640,4	2642,9	2646,5	2656,1	2671,3	2677,2	2648,9	2657,5	2665,9	2675,6
Гидравлическое сопротивление греющего теплоносителя, Па	4844,4	4804,4	4764,4	4754,4	4793	4753	4723	4703	4721,1	4702,55	4684,6	4666,2
Температура после теплообменника 1 контур, °C	34,2	35,4	36,42	37,42	38,2	40,2	42,2	43,2	35,5	36,5	37,5	38,5
Гидравлическое сопротивление нагреваемого теплоносителя, Па	10394,1	10394,1	10394,1	10394,1	10403,3	10403,3	10403,3	10403,3	10641,9	10641,9	10641,9	10641,9

Таблица 4 – Результаты расчетов для теплообменника при различных перепадах температур на градирни ($G_1 = 0,7$ кг/с)

Параметр	Перепад температур									
Перепад на градирни, ΔT , °C	15				10			13		
Расход 1 контур, к/с	0,7									
Расход 2 контур, к/с	0,833									
Температура после котла, °C	53	54	55	56	51	53	55	53	55	56
Температура до теплообменника 2 контур, °C	32				37			34		
Температура после теплообменника 2 контур, °C	47									
Количество энергии передаваемый в теплообменнике, кВт	52,2				34,8			45,25		
Тепловой поток, Вт/см²	1,29	1,59	1,89	2,194	0,864	1,46	2,05	1,359	1,96	2,26
Эффективная площадь, м²	4	3,26	2,753	2,38	4	2,3	1,69	3,3	2,309	2
Коэффициент запаса, %	1,98	27	50,7	74,3	3	77,2	144,9	24,6	79,79	107,3
Коэффициент теплопередачи Вт/м²·K	2901,1	2908,7	2916,2	2920,8	2958,6	2979	2996,6	2918,8	2930,2	2937,6
Гидравлическое сопротивление греющего теплоносителя, Па	7882,8	7874,2	7852,6	7820,8	7799,1	7645,9	7884,4	7865,8	7845,5	7839,7
Температура после теплообменника 1 контур, °C	35,1	36,1	37,1	38,1	39	41	43	37,5	39,5	40,5
Гидравлическое сопротивление нагреваемого теплоносителя, Па	10487,3	10487,3	10487,3	10487,3	10445	10445	10445	10384,6	10384,6	10384,6

Таблица 5 – Результаты расчетов для теплообменника при различных перепадах температур на градирни ($G_1 = 0,9$ кг/с)

Параметр	Перепад температур								
Перепад на градирни, ΔT , °C	15			10			13		
Расход 1 контур, к/с	0,9								
Расход 2 контур, к/с	0,833								
Температура после котла, °C	51	52	53	50	52	53	50	51	53
Температура до теплообменника 2 контур, °C	32			37			34		
Температура после теплообменника 2 контур, °C	47								
Количество энергии передаваемый в теплообменнике, кВт	52,2			34,8			45,25		
Тепловой поток, Вт/см²	1,43	1,756	2,1	1	1,7	2,05	1,05	1,38	2,07
Эффективная площадь, м²	3,64	2,9	2,5	3,2	2,02	1,69	4,12	3,24	2,15
Коэффициент запаса, %	13,9	39,5	35,2	27,8	105,4	144,5	0,6	27,8	92,7
Коэффициент теплопередачи Вт/м²·K	3160,3	3169,9	3178,6	3193,9	3212,7	3221,7	3170,2	3180,7	3205,32
Гидравлическое сопротивление греющего теплоносителя, Па	12237,4	12227,3	12214,4	12103,5	1260,5	1230,4	12181,9	12149,9	12120,8
Температура после теплообменника 1 контур, °C	37,1	38,1	39	40,7	42,7	43,7	37,9	38,9	40,9
Гидравлическое сопротивление нагреваемого теплоносителя, Па	10487,3	10487,3	10487,3	10441,9	10441,9	10441,9	10485,2	10485,2	10485,2

Из данных режимов необходимо выбрать оптимальный режим работы установки моделирования, при котором соблюдались следующие условия [3]:

- тепловой поток на пластинчатом теплообменнике не должен превышать 2,12 Вт/см².
- так же для соблюдения теплового баланса необходимо чтобы теплота, выводимая из системы не превышала 70 кВт, так как котел зная установка не сможет поддерживать систему в равновесном состоянии.

В таблице 6 представлены режимы работы установки с соблюдением исходных условий работы. В таблице 7 приведены параметры установки моделирования после настройки системы и проверки технических параметров.

Таблица 6 – Режимы работы установки с соблюдением исходных условий

Режимы	1 режим		2 режим	
Контур	Горячий контур	Холодный контур	Горячий контур	Холодный контур
Расход, т/ч	1,90	2,98	1,90	2,98
Температура на входе, °C	60	32	63	32
Температуры на входе, °C	36,47	47	34,8	50
Тепловая нагрузка, кВт	51,8		62,6	
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·K	2614		2652	
Тепловой поток, Вт/см ²	2,12		1,78	

Таблица 7 – Технические параметры УМП после ввода в эксплуатацию

Режимы	1 режим		2 режим	
Контур	Горячий контур	Холодный контур	Горячий контур	Холодный контур
Расход, т/ч	7,2	3,6	7,2	3,6
Температура на входе, °С	55-60	45-51	59	41,3
Температуры на входе, °С	60-65	36-41	64	51,2

Теплообменник обеспечивает требуемые диапазоны теплогидравлический параметров работы установки. Проведенный расчет подтвердил правильность выбранной конструкции теплообменника, его характеристик и запаса по теплообменной поверхности [4].

Заключение

В результате поверочного расчета пластинчатого теплообменника, (для оптимального режима работы, параметры которого представлены в таблице 7) были получены следующие основные результаты:

1. Коэффициент запаса ПТ составляет 564%, что позволяет использовать теплообменник в широком диапазоне значений температур и расходов теплоносителей, а также избежать снижения эффективности теплообмена с течением времени из-за загрязнения, окисления поверхности теплообмена.

2. Удельный тепловой поток в экспериментальных режимах составил, 1 Вт/см^2 , это позволяет избежать солеотложения и коррозии в ПТ, что в свою очередь увеличивает срок эксплуатации теплообменного оборудования, а также поддержание эффективности теплообмена в течении длительного времени эксплуатации. Также, по условиям задачи, тепловой поток на пластинчатом теплообменнике не должен превышать $2,12 \text{ Вт/см}^2$.

3. Коэффициент теплопередачи составил $4436 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

4. В диапазоне мощности электрического котла до 70 кВт, значения теплогидравлических параметров УМП не превышают расчетных значений, полученных во время конструкционного расчета.

Пластинчатый теплообменник соответствует требованиям эксплуатационных режимов работы установки УМП, а также обеспечивает оптимальную по размерам и конфигурации поверхность теплопередачи. На основании результатов конструктивного и гидравлического расчетов необходимо выбрать теплообменник с 33 пластинами, с противоточным движением сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 24.035.05-89 «Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС».

2. Организация и проведение модернизации систем и оборудования атомных станций. Стандарт организации. СТО 1.1.1.04.003.0542-2019. – Москва: АО «ВНИИАЭС», 2020. – 150 с.

3. Теплообменное оборудование для атомных электростанций. Технические требования эксплуатирующей организации. СТО 1.1.1.01.001.0889-2013. – Нижний Новгород: ООО «НЭЦЯТ», 2021. – 30 С.

4. Моряшов, А.А. Тепломассообменные процессы и установки: Методические указания / А. А. Моряшов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014 г. – 28 с.

5. Ведерникова, М.И. Расчет пластинчатых теплообменников: методические указания / М.И. Ведерникова, В.С. Таланкин. – Екатеринбург, 2018 г. – 29 с.

REFERENCES

1. RD 24.035.05-89 «Methodological guidelines. Thermal and hydraulic calculation of heat exchange equipment of NPPs».

2. Organization and implementation of modernization of systems and equipment of nuclear power plants. Organization standard. SТО 1.1.1.04.003.0542-2019. – Moscow: JSC «VNIIAES», 2020. – 150 p.

3. Heat exchange equipment for nuclear power plants. Technical requirements of the operating organization. SТО 1.1.1.01.001.0889-2013. – Nizhny Novgorod : ООО «NNECNT», 2021. – 30 p.

4. Moryashov, A.A. Heat and mass transfer processes and installations: Methodological guidelines / A.A. Moryashov. – Kazan: Kazan. state energy. un-t, 2014 – 28 p.

5. Vedernikova, M.I. Calculation of plate heat exchangers: guidelines / M.I. Vedernikova, V.S. Talankin – Ekaterinburg, 2018 – 29 p.

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕПАРИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ СЕМЯН НА РЕШЕТАХ

TO THE QUESTION OF IMPROVING THE TECHNOLOGY OF SEPARATION OF FOREST
SEEDS ON SCREENS

Ткачев В.В., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Tkachev V.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Бородин Н.А., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Borodin N.A., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Князев А.В., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Knyazev A.V., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Доманин К.А., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Domanin K.A., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Рассмотрен процесс сепарирования семян лесных культур на плоских качающихся решетках с использованием механизма очистки отверстий. Представлены результаты экспериментального исследования применения механизма отчистки отверстий решет, оснащенного цилиндрическими щеточными рабочими органами. Описаны выявленные в процессе эксплуатации недостатки механизма очистки отверстий решет. Определено, что при сепарировании семян лесных культур при значительных удельных нагрузках необходимо обеспечить увеличение количества участвующих в технологическом процессе отверстий решет именно за счет применения механизмов очистки. Установлено, что совершенствование механизмов очистки при обработке семян лесных культур прежде всего должно быть направлено на установление оптимальных конструктивно-кинематических параметров их работы, а также выбор видов рабочих органов.

Ключевые слова: решетка, отверстия, семена, забиваемость, очистка, сепарирование.

Abstract. The process of separating seeds of forest crops on flat swinging sieves using a hole cleaning mechanism is considered. The results of an experimental study of the use of a mechanism for cleaning sieve openings equipped with cylindrical brush working bodies are presented. The

disadvantages of the sieve hole cleaning mechanism identified during operation are described. It is determined that when separating seeds of forest crops at significant specific loads, it is necessary to ensure an increase in the number of sieve openings involved in the technological process precisely through the use of cleaning mechanisms. It has been established that the improvement of cleaning mechanisms in the treatment of forest seeds should primarily be aimed at establishing optimal design and kinematic parameters of their operation, as well as the choice of types of working bodies.

Keywords: sieves, holes, seeds, clogging, cleaning, separation.

Известно, что перед проведением посевных работ семена лесных культур подвергают различным видам обработки, наиболее значимым из которых является процесс сепарирования по линейным размерам.

В большинстве случаев в отечественном лесном комплексе для осуществления технологии сепарирования находят применение семеочистительные машины, оснащенные плоскими качающимися решетками. Ключевым недостатком разделения семян на решетках является то, что в ходе технологического процесса происходит забиваемость отверстий решет семенами и их примесями. Это существенно уменьшает площадь свободной сепарируемой поверхности и снижает качество обработки семенного материала, а также уменьшает производительность используемых при этом соответствующих средств механизации.

Устранение эффекта забиваемости отверстий может осуществляться различными способами, в число которых прежде всего входят: использованием специализированных («незабивающихся») решет, применением соответствующих режимов движения решет, а также установкой под решетками отдельных очистительных механизмов [1].

В некоторых случаях при сверхнизких удельных нагрузках на решето удастся получить удовлетворительные результаты сепарирования без применения очистки отверстий решет [2]. Между тем, как показала практика, при требуемых удельных нагрузках именно применение отдельного механизма очистки отверстий решет позволяет достичь необходимого результата сепарирования за один цикл обработки семенного материала [3].

Механизмы очистки отверстий решет широко используют в машинах сельскохозяйственного назначения [4]. Однако попытки применения традиционных сельскохозяйственных очистительных устройств для обработки семян лесных культур не принесли желаемого результата. Данное обстоятельство обусловлено тем, что семена лесных культур, прежде всего хвойных пород, удерживаются в отверстиях значительными силами сцепления, но при всем этом легко повреждаются рабочими органами машин [5-7].

Отдельных положительных результатов при обработке лесных семян хвойных пород удалось достичь посредством разработки специализированного механизма очистки отверстий решет, оснащенного активными цилиндрическими щеточными рабочими органами. Рабочие органы наряду с возвратно-поступательным движением под решетным станом семеочистительной машины совершают также вращательное движение посредством использования зубчатого зацепления. Ворс щеток рабочих органов при своем движении выталкивает застрявшие в отверстиях решета семена [7, 8].

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при различных конструктивно-кинематических параметрах механизма очистки, при соответствующих

режимах работы решета, за счет очистки отверстий решет можно повысить эффективность сепарирования на 10-20 % [9].

Однако, в процессе эксплуатации указанного механизма очистки выяснилось, что для него также характерны следующие недостатки: сложность конструкции, трудоемкость обслуживания, дополнительные нагрузки на решето и продукт сепарирования. Кроме того, рабочие органы очистительного устройства сами перекрывают собой отверстия решет, тем самым исключая их из процесса сепарирования [10]. Поэтому попытки повышения эффективности сепарирования только за счет увеличения количества рабочих органов механизмов очистки отверстий решет является нерациональными.

Таким образом, при сепарировании семян лесных культур при значительных удельных нагрузках необходимо обеспечить увеличение количества участвующих в технологическом процессе отверстий решет за счет применения механизмов очистки. Совершенствование механизмов очистки при обработке семян лесных культур прежде всего должно быть направлено на установление оптимальных конструктивно-кинематических параметров их работы, а также выбор видов рабочих органов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков, В.С. Теория процесса сепарирования сыпучих смесей на плоских качающихся решетках / В.С. Быков. – Воронеж: ВГЛТА, 1996. – 244 с. Деп. в ВИНТИ 18.07.1996., № 2450-B96.
2. Свиридов, Л.Т. Исследование процесса просеивания семян хвойных пород через отверстия различных решет / Л.Т. Свиридов, С.С. Арутюнян. – Воронеж: ВГЛТА, 1999. – 24 с. Деп. в ВИНТИ РАН 03.11.1999., № 3268-B99.
3. Ткачев, В.В. Обоснование параметров механизма очистки решет лесных семеочистительных машин: специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ткачев Виталий Викторович. – Воронеж, 2005. – 159 с.
4. Кожуховский, И.Е. Зерноочистительные машины. Конструкции, расчет и проектирование / И.Е. Кожуховский. – Москва: Машиностроение, 1974. – 200 с.
5. Свиридов, Л.Т. Технологические и механические свойства лесных семян и плодов / Л.Т. Свиридов. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 1993. – 140 с.
6. Свиридов, Л.Т. Сортирование лесных семян / Л.Т. Свиридов; Воронежская государственная лесотехническая академия. – Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2002. – 298 с.
7. Воспроизводство и лесоразведение хвойных лесов с использованием новых технологий и технических средств для обработки семян / Л.Т. Свиридов, Н.Д. Гомзяков, А.Н. Томилин [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса: межвузовский сборник научных трудов в 2 томах / Министерство образования и науки РФ, Воронежская государственная лесотехническая академия. Том 1 выпуск 1. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2010. – С. 78-82.
8. Совершенствование механизма очистки отверстий решет сепарирующих машин / В.В. Ткачев, А.В. Князев, Н.А. Бородин, К.А. Доманин // Достижения науки и технологий,

культурные инициативы и устойчивое развитие - ДНиТ-III-2024: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 01-02 марта 2024 года. – Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2024. – С. 210-213.

9. Ткачев, В.В. К вопросу экспериментального исследования процесса сортирования семян хвойных пород / В.В. Ткачев, П.Н. Щеблыкин, Е.И. Губанова // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: межвузовский сборник научных трудов / под редакцией В.И. Посметьева; Федеральное агентство по образованию, Воронежская государственная лесотехническая академия. Том 4. – Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2009. – С. 87-90.

10. Завгородний, А.И. О влиянии рабочих органов очистителей на пропускную способность решет / А.И. Завгородний, С.М. Дюндик, В.А. Романов // Технология производства и конструирования сельскохозяйственных машин: сборник научных трудов Харьковского государственного аграрного университета. – Харьков, 1997. – Вып. 5. – С. 70-78.

REFERENCES

1. Bykov, V.S. Theory of the process of separation of bulk mixtures on flat swinging sieves / V.S. Bykov. – Voronezh: VGLTA Publ., 1996. – 244 p. Dep. in VINITI 18.07.1996, No. 2450-B96.

2. Sviridov, L.T. Study of the process of sifting coniferous seeds through the holes of various sieves / L.T. Sviridov, S.S. Arutyunyan. – Voronezh: VGLTA, 1999. – 24 p. Dept. in VINITI RAS 03.11.1999., No. 3268-B99.

3. Tkachev, V.V. Justification of the parameters of the cleaning mechanism of forest seed cleaning machines: specialty 05.21.01 «Technology and machines of logging and forestry»: dissertation for the degree of PhD in Technical Sciences / Tkachev Vitaly Viktorovich. – Voronezh, 2005. – 159 p.

4. Kozhukhovskiy, I.E. Grain cleaning machines. Constructions, calculations and design / I.E. Kozhukhovskiy. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. – 200 p.

5. Sviridov, L.T. Technological and mechanical properties of forest seeds and fruits / L.T. Sviridov. – Voronezh: Voronezh State University, 1993. – 140 p.

6. Sviridov, L.T. Sorting of forest seeds / L.T. Sviridov; Voronezh State Forestry Academy. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering Academy, 2002. – 298 p.

7. Reproduction and afforestation of coniferous forests using new technologies and technical means for seed treatment / L.T. Sviridov, N.D. Gomzyakov, A.N. Tomilin [et al.] // Actual problems of the forest complex: interuniversity collection of scientific papers in 2 volumes / Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Voronezh State Forest Engineering Academy. Volume 1, issue 1. – Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2010. – P. 78-82.

8. Improving the mechanism for cleaning the holes of screens of separating machines / V.V. Tkachev, A.V. Knyazev, N.A. Borodin, K.A. Domanin // Achievements of science and technology, cultural initiatives and sustainable development - DNiT-III-2024: collection of scientific articles

based on the materials of the III All-Russian Scientific Conference with international participation, Krasnoyarsk, March 01-02, 2024. – Krasnoyarsk: Public Institution «Krasnoyarsk Regional House of Science and Technology of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations», 2024, – P. 210-213.

9. Tkachev, V.V. On the issue of experimental study of the process of sorting coniferous seeds / V.V. Tkachev, P.N. Shcheblykin, E.I. Gubanova // Promising technologies, vehicles and equipment in production, operation, service and repair: an interuniversity collection of scientific papers / edited by V.I. Posmetyev; Federal Agency for Education, Voronezh State Forest Engineering Academy. Volume 4. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering Academy, 2009. – P. 87-90.

10. Zavgorodniy, A.I. On the influence of the working organs of cleaners on the throughput of sieves / A.I. Zavgorodniy, S.M. Dyundik, V.A. Romanov // Technology of production and design of agricultural machinery: collection of scientific papers of the Kharkiv State Agrarian University. – Kharkov, 1997. – Iss. 5. – P. 70-78.

СИМУЛЯЦИЯ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСОПИЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

SIMULATION OF THE OPERATION OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR SAWMILL EQUIPMENT

Мещерякова А.А., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

Meshcheryakova A.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Статья посвящена симуляции работы автоматизированной системы управления лесопильным оборудованием, которая позволяет оценить эффективность предложенной математической модели в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: системы управления, лесопильное оборудование, экономическая эффективность, математическая модель.

Abstract. The article is devoted to the simulation of the operation of an automated control system for sawmill equipment, which allows one to evaluate the effectiveness of the proposed mathematical model under various operating conditions.

Keywords: control systems, sawmill equipment, economic efficiency, mathematical model.

Россия, являясь крупнейшей лесной державой, входит в тройку мировых лидеров по объёму лесозаготовок и производству пиломатериалов. Несмотря на значительный вклад отечественных учёных в развитие лесопиления (Х.Л. Фельдман, Д.Ф. Шапиро, Г.Д. Власов, А.Н. Песочкий и др.), эффективность предприятий отрасли остаётся недостаточной. Одной из ключевых причин выступает ограниченность экономических исследований, которые зачастую не устанавливают взаимосвязи между технологическими параметрами производства и экономическими показателями предприятий. Существующие работы фокусируются на влиянии технологических факторов на объёмный выход пиломатериалов, однако вопросы оптимизации управления оборудованием в режиме реального времени остаются нерешёнными [1-3].

Отличительной особенностью лесопильного производства является его комплексный характер: в итоге соответствующего управленческого решения результатом процесса раскря бревна могут быть одновременно два или более видов продукции. Комплексность процесса раскря леса, как характерный признак лесопильного производства, формирует определенные сложности при планировании затрат в связи с возникновением так называемых комплексных затрат [4-5].

В ходе научно-исследовательской работы были проведены исследования, направленные на повышение эффективности и устойчивости системы управления

лесопильным оборудованием. В работе установлено, что, несмотря на значительные достижения отечественной науки в области лесопиления, существует разрыв между теоретическими исследованиями и практической реализацией технологий, что ограничивает эффективность предприятий отрасли.

Автоматизированная система управления лесопильным оборудованием представляет собой комплекс технических и программных средств, направленных на повышение эффективности производства за счет оптимизации процессов распиловки древесины. Целевая функция должна отражать капитальные затраты, эксплуатационные затраты и доходы от продажи полученной пилопродукции. Капитальные затраты имеют разовый характер. Для этого подойдёт эквивалентный аннуитет. При определении эквивалентного аннуитета ЕА появляется возможность учесть и другие, специфические для данного вида оборудования эксплуатационные затраты, такие, как заработная плата персонала, электроэнергия, приобретение и подготовка инструмента, техническое обслуживание и ремонт. Для определения эквивалентного аннуитета можно использовать уравнение:

$$EA = \frac{CF_t \left[(1+k)^T - 1 \right] + I_0 k (1+k)^T}{(1+k)^{T+1} - 1}, \quad (1)$$

где CF_t – затраты в году t , тыс. руб.; T – срок службы (чаще срок до первого капитального ремонта), лет; k – ставка дисконтирования; I_0 – капитальные затраты, связанные с приобретением и установкой оборудования, тыс. руб.

Тогда экономический эффект $\mathcal{E}$ использования ресурса (партии сырья Q) может быть выражен как разница результата и затрат:

$$\mathcal{E} = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n \Pi_{ij} K_{ij} r_{ij} P_{\text{ПМ}} - EA_j \cdot \sum_{i=1}^n K_{ij} \right], \quad (2)$$

где K_{ij} – количество времени работы оборудования ij при распиловке сырья из группы i , лет.

После преобразований получим выражение для экономического эффекта, которое и будет целевой функцией:

$$Q \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{d_i x_{ij}}{\Pi_{\text{шо}}} \left[\Pi_{ij} r_{ij} P_{\text{ПМ}} - EA_j \right] \rightarrow \max, \quad (3)$$

Более подробная информация о разработке математической модели оптимизации распределения пиловочного сырья между различными типами оборудования лесопильного производства представлена автором в тезисах национальной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Инновационные решения в автоматизации и управлении техническими, организационными и экономическими системами» проходившей в марте 2025 года в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова».

Симуляция работы автоматизированной системы управления лесопильным оборудованием позволяет оценить эффективность предложенной математической модели в различных условиях эксплуатации. В данной статье рассматриваются основные этапы симуляции, тестирование различных сценариев и анализ их влияния на производительность и качество продукции.

Основная цель симуляции заключается в проверке корректности разработанной математической модели и оценке её применимости для реальных условий производства. Симуляция позволяет:

- проверить точность распределения сырья между оборудованием;
- оценить влияние различных факторов (например, изменение цен на пиломатериалы или характеристик оборудования) на экономический эффект;
- проанализировать качество продукции и производительность оборудования при различных сценариях.

Для проведения симуляции используются исходные данные из примера, представленного ниже.

Сырье включает бревна диаметром 16 см (20%), 22 см (50%), 28 см (20%), 32 см (10%). Общий объем сырья составляет $Q = 100\,000\text{ м}^3$.

Характеристики оборудования, такие как производительность Π_{ij} и выход пиломатериалов r_{ij} , непосредственно взаимосвязаны и задаются соответствующим эквивалентным аннуитетом:

- Тип 1: $EA_1 = 7094$ тыс. руб./год.
- Тип 2: $EA_2 = 6178$ тыс. руб./год.
- Тип 3: $EA_3 = 5790$ тыс. руб./год.

Выход пиломатериалов составляет:

- для бревен диаметром 16 см: 44%, 44%, 44% (для оборудования №1, №2, №3 соответственно);
- для бревен диаметром 32 см: 45%, 55%, 65%.

Годовая производительность оборудования:

- для бревен диаметром 16 см: 60 000, 40 000, 19 000 куб. м/год;
- для бревен диаметром 32 см: 64 000, 50 000, 26 000 куб. м/год.

Цена пиломатериалов: $P_{\text{ПМ}} = X$ руб./м³.

Рассмотрим этапы симуляции.

Этап 1: Базовый сценарий

Базовый сценарий соответствует исходным данным из примера:

Распределение сырья: бревна диаметром 16 см обрабатываются только на оборудовании №1, бревна диаметром 22 см – только на оборудовании №2, бревна диаметром 28 см и 32 см – только на оборудовании №3.

Результаты:

Экономический эффект: $\mathcal{E} = 172\,730$ тыс. руб.

Качество продукции: высокий выход пиломатериалов за счет оптимального распределения сырья.

Этап 2: Изменение объема сырья

Тестирование влияния увеличения общего объема сырья:

Новый объем сырья: $Q = 150\,000\text{ м}^3$.

Результаты:

Увеличение экономического эффекта до $\mathcal{E} = 259\,095$ тыс. руб.

Производительность оборудования №1 достигает предела (60 000 м³/год), что требует дополнительных инвестиций в оборудование.

Этап 3: Изменение цены пиломатериалов

Тестирование влияния роста цены пиломатериалов:

Новая цена: $P_{\text{ПМ}} = 1.2 \cdot X$.

Результаты:

Увеличение экономического эффекта до $\mathcal{E} = 207\,276$ тыс. руб.

Качество продукции остается неизменным, но возрастает привлекательность использования более дорогого оборудования (№1).

Этап 4: Введение ограничений на оборудование

Тестирование влияния снижения производительности оборудования:

Производительность оборудования №1 снижена на 20% (до 48 000 м³/год).

Результаты:

Перераспределение части сырья диаметром 16 см на оборудование №2.

Снижение экономического эффекта до $\mathcal{E} = 165\,460$ тыс. руб.

Этап 5: Влияние качества сырья

Тестирование влияния изменения долей размерных групп:

Новые доли: диаметр 16 см – 15%, диаметр 22 см – 60%, диаметр 28 см – 15%, диаметр 32 см – 10%.

Результаты:

Увеличение нагрузки на оборудование №2.

Экономический эффект снижается до $\mathcal{E} = 168\,000$ тыс. руб.

Анализ результатов

1) Влияние объема сырья – увеличение объема сырья приводит к росту экономического эффекта, но может вызвать перегрузку оборудования. Рекомендуется инвестировать в дополнительное оборудование при значительном увеличении объема сырья.

2) Влияние цены пиломатериалов – рост цены пиломатериалов существенно увеличивает экономический эффект. Это делает использование более дорогого оборудования (например, №1) более выгодным.

3) Влияние ограничений на оборудование – снижение производительности оборудования приводит к перераспределению сырья и снижению экономического эффекта. Необходимо поддерживать оборудование в рабочем состоянии для минимизации потерь.

4) Влияние качества сырья – изменение долей размерных групп влияет на распределение сырья между оборудованием. Рекомендуется использовать дифференцированные цены на сырье для стимулирования поставщиков к улучшению качества.

Таким образом, симуляция работы системы на базе разработанной математической модели подтвердила её эффективность для оптимизации процесса лесопиления. Тестирование различных сценариев показало, что:

- оптимальное распределение сырья между оборудованием обеспечивает максимальный экономический эффект;
- изменение внешних факторов (объем сырья, цена пиломатериалов, характеристики оборудования) требует адаптации системы;
- дифференциация цен на сырье является ключевым фактором повышения эффективности производства.

Разработанная модель может быть успешно применена для управления лесопильным оборудованием в реальных условиях, обеспечивая высокую производительность и качество продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обоснование необходимости внедрения процессов комплексного использования древесины на лесопильных предприятиях / А.А. Тамби, С.А. Угрюмов, А.Р. Бирман [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 2 (46). – С. 47-54.
2. Соболев, И.Д. Рациональное использование ресурсов и утилизация отходов в лесопильном производстве / И.Д. Соболев // Актуальные вопросы техники, науки, технологии: материалы ежегодной национальной научно-практической конференции магистрантов и аспирантов Брянского государственного инженерно-технологического университета, Брянск, 07-10 февраля 2024 года. – Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2024. – С. 202-204.
3. Огурцов, В.В. Зависимость объемного выхода пиломатериалов от количества их толщин в поставе / В.В. Огурцов, Е.В. Каргина, И.С. Матвеева // Хвойные бореальной зоны. – 2023. – Т. 41, № 3. – С. 257-261.
4. Мурзакаев, Н.И. Инновационные цифровые решения на предприятиях лесопромышленного комплекса / Н.И. Мурзакаев, А.Е. Михайлова // Актуальные вопросы лесного хозяйства : материалы VII международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2023. – С. 151-154.
5. Мещерякова, А.А. Исследование автоматизированной системы управления лесопильным оборудованием / А.А. Мещерякова, А.А. Грибанов // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06 июня 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 225-228.

REFERENCES

1. Justification of the need to introduce processes of integrated use of wood at sawmills / A.A. Tambi, S.A. Ugryumov, A.R. Birman [et al.] // Systems. Methods. Technologies. – 2020. – No. 2 (46). – P. 47-54.
2. Sobolev, I.D. Rational use of resources and waste disposal in sawmill production / I.D. Sobolev // Actual issues of engineering, science, technology: materials of the annual national scientific and practical conference of undergraduates and postgraduates of Bryansk State University

of Engineering and Technology, Bryansk, February 07-10, 2024. – Bryansk: Bryansk State University of Engineering and Technology, 2024. – P. 202-204.

3. Ogurtsov, V.V. Dependence of the volumetric yield of sawn timber on the number of their thicknesses in the set / V.V. Ogurtsov, E.V. Kargina, I.S. Matveeva // Conifers of the boreal zone. – 2023. – Vol. 41, No. 3. – P. 257-261.

4. Murzakaev, N.I. Innovative digital solutions at enterprises of the timber industry / N.I. Murzakaev, A.E. Mikhailova // Topical issues of forestry : materials of the VII International Youth Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 09-10, 2023. – Saint Petersburg: Saint Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 2023. – P. 151-154.

5. Meshcheryakova, A.A. Research of automated control system of sawmill equipment / A.A. Meshcheryakova, A.A. Gribanov // Energy efficiency and energy conservation in modern production and society : materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, June 06, 2024. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2024. – P. 225-228.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRIC MOTORS FOR OPERATION IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Шамков Е.Ю., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Shamkov E.Yu., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Кабанцов В.Д., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kabantsov V.D., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Самодуров И.А., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Samodurov I.A., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Яцута Р.Д., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Yatsuta R.D., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье на основании обзора существующих конструктивных данных электродвигателей разных типов методом многокритериального сравнения альтернатив проводится сравнительный анализ по таким критериям, как масса, стоимость, возможность эксплуатации в агрессивной среде. В рамках такого подхода выяснилось, что оптимальным вариантом является двигатель АИМЛ100L4.

Ключевые слова: системный анализ, многокритериальный метод сравнения, эксплуатация в агрессивной среде, электродвигатель.

Abstract. In the article, based on a review of existing design data for electric motors of different types, a comparative analysis is carried out using the method of multi-criteria comparison of alternatives according to such criteria as weight, cost, and the possibility of operation in an aggressive environment. Within the framework of this approach, it was revealed that the optimal option is the AIML100L4 engine.

Keywords: systems analysis, multi-criteria comparison method, operation in an aggressive environment, electric motor.

В настоящий момент все большую значимость приобретают вопросы экологической безопасности как планеты в целом, так и отдельных её регионов. Поэтому сохранение и грамотное использование лесной зоны является актуальной проблемой для устойчивого и комфортного существования человечества. Одной из задач лесопромышленного комплекса является развитие технического оборудования, в частности расширение использования различных типов двигателей. Все чаще в повседневной жизни тепловые двигатели уступают место электродвигателям. В результате их активного внедрения снижается вред, наносимый деятельностью человека природе, нормализуется экологическая обстановка в мегаполисах, увеличивается комфортность жизни граждан разных стран. Поэтому актуальной становится задача оценки возможности применения их в области лесного хозяйства. Естественно, обоснование методик для оценивания должно формироваться в рамках комплексного подхода с учетом многоаспектности поставленной проблемы и, следовательно, с применением современных методов системного анализа [1].

Цель данной работы – на примере решения задачи сравнения наиболее популярных типов электродвигателей, продемонстрировать возможности применения методов многокритериального анализа для обоснованного выбора оптимального варианта двигателя в рамках системного подхода.

Условия работы электродвигателей при эксплуатации в лесопромышленном комплексе характеризуются повышенной влажностью и резкими перепадами температур, что существенно влияет на их коррозионную стойкость и электрическую прочность изоляции. В процессе длительной эксплуатации увеличивается частота возникновения технологических перегрузок, неполнофазных режимов, расширяется диапазон колебаний питающего напряжения. Все это происходит в условиях недостаточного уровня оснащения двигателей защитными устройствами и технического обслуживания. Кроме того, высокая запыленность в сочетании с повышенным уровнем влажности окружающей среды приводит к забиванию вентиляционных отверстий в кожухе и межреберных каналов корпуса, что негативно влияет на охлаждение двигателя [2-5] и, следовательно, на его надежность. Влияние условий эксплуатации на работу двигателей часто определяется такими факторами, как специфичность окружающей среды, оцениваемая по продолжительности работы и характеру загрузки по мощности в условиях мониторинга, а также величиной диапазона колебаний напряжения и уровнем технического обслуживания. Однако, при принятии решения о возможности массового применения электродвигателей гораздо чаще основываются на вербальном подходе по категориям качественной оценки агрессивности окружающей среды при их эксплуатации. Для учета рентабельности использования электродвигателя в сравнении применялся такой критерий как стоимость, а удобство пользователей оценивалось по его массе. Таким образом, в качестве критериев для сравнения конструктивных данных двигателей были выбраны масса, стоимость и пригодность к эксплуатации в агрессивной среде.

Как известно, электрический двигатель (электромеханический преобразователь), преобразует электрическую энергию в механическую, в основе его принципа действия лежит взаимодействие поля постоянных магнитов на роторе и вращающегося магнитного поля обмотки статора [2-5]. В качестве материалов для постоянных магнитов используют огромное количество сталей, сплавов и их композиций, отличающихся по магнитным свойствам и

технологии производства. Не вдаваясь в подробности моделирования рабочих процессов, для сравнения были выбраны четыре модификации асинхронных трехфазных двигателей общепромышленного назначения: АИР100L4 с чугунным или алюминиевым корпусом, выпускаемым Российским производителем АДМ100L4 и взрывозащищенный АИМЛ100L4.

Эффективность приведенных конструкций определялась по степеням сравнения. Для принятия решения была введена прогрессивная шкала отношений по выбранным критериям. Сравнение критериев проводилось вербально на основании опроса пользователей. Коэффициенты их сравнительной значимости b_{ij} определялись по прогрессивной шкале отношений (3:5:7). Поскольку была поставлена задача оценить перспективы использования электродвигателя в лесопромышленном комплексе, то самым значимым был выбран критерий пригодности эксплуатации в агрессивной среде, затем масса и, наконец, стоимость (см. круговую диаграмму на рисунке 1). С выбранными коэффициентами рассчитывался вектор матрицы срезнения ρ_i по формуле [6-8]:

$$\rho_i = \sqrt[k]{\prod_{l=1}^k b_{il}}, \quad (1)$$

где k – количество системно обоснованных критериев (в рассматриваемом случае $k = 3$).

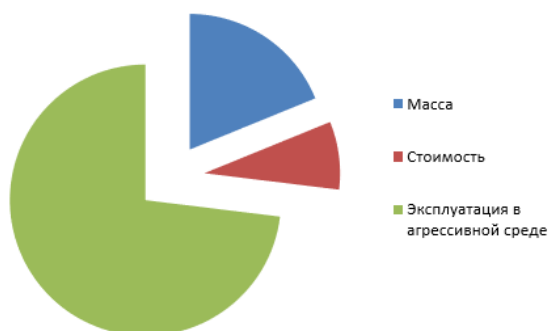


Рисунок 1 – Результат сравнения значимости критериев выбора

Затем на основании собранной по отзывам пользователей информации с учетом выявленных достоинств и недостатков рассматриваемых модификаций электродвигателей (альтернатив) по прогрессивной шкале формировались коэффициенты попарного сравнения альтернатив a_{ij} по каждому критерию отдельно. По последним составлялась матрица:

$$\omega_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{m=1}^n a_{ijm}}, \quad (2)$$

где n – число сравниваемых двигателей (в данном случае $n = 4$); i – порядковый номер критерия сравнения; j – порядковый номер модификации. Для нормировки использовалось соотношение:

$$\omega_{ijn} = \frac{\omega_{ij}}{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}}. \quad (3)$$

Анализ осуществлялся по индикатору сравнения для каждой модификации двигателя:

$$\Omega_j = \sum_i \rho_i \omega_{ijn} . \quad (4)$$

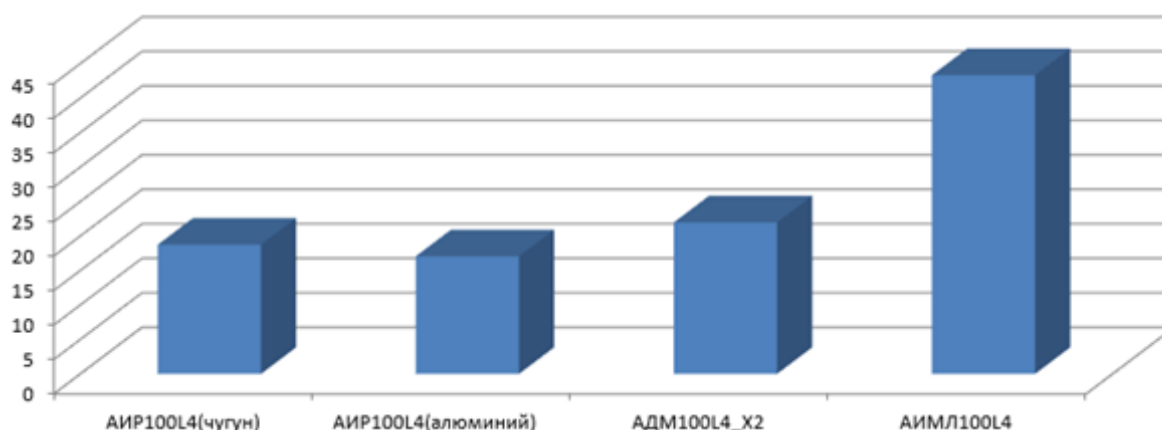


Рисунок 2 – Результат сравнения модификаций асинхронных трехфазных электродвигателей

В результате сравнения выяснилось, что для выбранных критериев с учетом агрессивности окружающей среды при эксплуатации в лесопромышленном комплексе наиболее перспективным является взрывозащищенный двигатель АИМЛ100L4 (см. Рис. 2).

В заключение хотелось бы отметить, что применение многокритериального метода сравнения конструктивной схемы в технологиях поиска решения является удобным обоснованием выбора, поскольку позволяет использовать данные опросов наравне с техническими описаниями без особой математической подготовки. При этом критерии сравнения могут быть представлены в виде качественных категорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е.Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
3. Веренич, И.А. Экологические и энергосберегающие аспекты при проектировании систем гидроприводов машин / И.А. Веренич, М.А. Тини // Наука и техника. – 2006. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-i-energoberegayuschie-aspekty-pri-proektirovanii-sistem-gidroprivodov-mashin> (дата обращения: 02.06.2025).
4. Применение электрического двигателя с постоянными магнитами в качестве силовой установки беспилотного летательного аппарата / Е.А. Вяткина, А.Г. Люtareвич, Е.А. Пугачева, В.В. Тевс // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 12-2. – С. 228-232. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12024> (дата обращения: 02.06.2025).
5. Елизаров, В.В. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором / В.В. Елизаров // Форум молодых ученых. – 2017. – №12 (16). – URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/asinhronnyy-dvigatel-s-korotkozamknutym-rotorom> (дата обращения: 02.06.2025).

6. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

7. Системный подход к проблеме обоснования модернизации лесозаготовительных машин / П.И. Попиков, Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, В.С. Полянин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 2, ч. 2 (13-2). – С. 296-300.

8. Кузнецов, Д.С. Применение метода анализа иерархий для обоснования выбора наиболее эффективного корчевателя / Д.С. Кузнецов, Е.В. Поздняков, Н.Ю. Евсикова // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 1, № 1 (26). – С. 91-95.

REFERENCES

1. Theoretical foundations of system analysis / V.I. Novosel'tsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by V.I. Novosel'tsev. – Moscow: Mayor, 2006. – 592 p.

2. Anuchin A.S. Electric drive control systems. – Moscow: MPEI Publishing House, 2015. – 373 p.

3. Verenich, I.A. Environmental and energy-saving aspects in the design of hydraulic drive systems of machines / I.A. Verenich, M.A. Tini // Science and Technology. – 2006. – No. 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-i-energoberegayuschie-aspekty-pri-proektirovanii-sistem-gidroprivodov-mashin> (date of access: 02.06.2025).

4. Application of an electric motor with permanent magnets as a power plant of an unmanned aerial vehicle / E.A. Vyatkina, A.G. Lyutarevich, E.A. Pugacheva, V.V. Tevs // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2017. – No. 12-2. – P. 228-232. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12024> (date of access: 02.06.2025).

5. Elizarov, V.V. Asynchronous motor with a squirrel-cage rotor / V.V. Elizarov // Forum of young scientists. – 2017. – No. 12 (16). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/asinhronnyy-dvigatel-s-korotkozamknutym-rotorom> (date of access: 02.06.2025).

6. Saati, T. Decision Making. The Analytic Hierarchy Process Method / T. Saati; trans. from English by R.G. Vachnadze. – Moscow: Radio and Communications, 1993. – 278 p.

7. Systems approach to the problem of justifying the modernization of logging machines / P.I. Popikov, N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, V.S. Polyanin // Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice. – 2015. – No. 2, part 2 (13-2). – P. 296-300.

8. Kuznetsov, D.S. Application of the hierarchy process analysis method to justify the choice of the most effective rooter / D.S. Kuznetsov, E.V. Pozdnyakov, N.Yu. Evsikova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Vol. 1, No. 1 (26). – P. 91-95.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

COMPARATIVE ANALYSIS OF MOTOR OILS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Повалюхин Д.В., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Povaluhin D. V., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia.

Иванов Д.А., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Ivanov D. A., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia.

Скрыльников Н.В., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Skrylnikov N.V., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ различных типов моторных масел, используемых в двигателях внутреннего сгорания. Актуальность темы обусловлена высокой важностью выбора качественного масла для обеспечения надежной работы двигателей, повышения их эффективности, а также продления срока службы агрегатов. В результате исследований выяснилось, что в рамках системного подхода можно применять многокритериальные методы сравнения альтернатив к задачам многоаспектного обоснованного выбора в конкретной ситуации.

Ключевые слова: системный анализ, многокритериальный метод сравнения, повышение ресурса двигателя, моторные масла.

Abstract. The article presents a comparative analysis of various types of motor oils used in internal combustion engines. The relevance of the topic is due to the high importance of choosing a quality oil to ensure reliable operation of engines, improve their efficiency, and extend the service life of units. As a result of the research, it was found that within the framework of a systems approach,

multi-criteria methods for comparing alternatives can be used to solve problems of multi-aspect justified choice in a specific situation.

Key words: systems analysis, multi-criteria comparison method, increasing engine life, motor oils.

Как известно, моторное масло способствует защите рабочих поверхностей деталей двигателя от коррозии (образованию защитной пленки), охлаждению сопрягаемых поверхностей деталей в результате действия нагрузок и, как следствие, снижению силы трения, обеспечению очистки деталей от загрязняющих частиц, продуктов износа и нагара. Поэтому для поддержания долговечности и работоспособности двигателя внутреннего сгорания необходимо своевременно и регулярно производить замену масла в системе смазки. В современных условиях при выборе моторного масла рядовой потребитель сталкивается с множеством марок, каждая из которых активно рекламируется. В результате для принятия решения ему требуется провести комплексный анализ информации о характеристиках моторных масел, разработать критерии сравнения, содержащие иерархическую систему показателей эффективности в зависимости от целей эксплуатации двигателя, и, собственно, остановиться на компромиссном варианте выбора. Таким образом, потребители фактически сталкиваются с задачей обоснования выбора, являющейся, с точки зрения современного системного подхода, компонентой проблемы принятия решения. Программные комплексы для поддержки в подобных ситуациях в настоящий момент активно используются в системах управления [1]. Однако, широкое применение таких приложений существенно затрудняет отсутствие у широкого круга возможных пользователей навыков системного анализа.

Например, для осуществления обоснованного выбора марки масла разработаны обозначения и стандарты (такие как API, ACEA, ILSAC), которые должны помогать пользователю определить оптимальные варианты решения для конкретного типа двигателя и условий эксплуатации с учетом рекомендаций автопроизводителя, содержащихся в технической документации автомобиля. При этом к условиям эксплуатации можно отнести использование в городской среде, на трассе, при экстремальных температурах (в условиях пустыни или арктики) [2-4]. Для применения программного комплекса их необходимо ранжировать по сложности с учетом основных параметров сравнения, например, требуемого уровня защиты от износа при интенсивной эксплуатации или специфических свойств в результате использования в дизельных или бензиновых двигателях. Не меньшую значимость имеет и стоимость бренда. Таким образом, задача отличается многоаспектностью и требует применения системных методов исследования [1].

Целью данной работы является на примере сравнительного анализа наиболее популярных моторных масел продемонстрировать возможности применения методов многокритериального анализа для решения задачи выбора оптимального варианта в конкретной ситуации.

В рамках системного подхода на первом этапе разработки комплексных методов поддержки систем принятия решения в конкретной ситуации необходимо ознакомиться с возможными вариантами конструктивных схем маслосистемы. Типовая конструкция для двигателя внутреннего сгорания с «мокрым» картером содержит (см. Рис. 1) [2-4]: патрубок

маслоналивной (1); насос топливный (2); трубка маслоподводящая (3); трубка маслоотводящая (4); фильтр центробежной очистки масла (5); фильтр масляный (6); указатель давления масла (7); клапан перепускной масляного фильтра (8); кран радиатора (9); радиаторы (10); клапан дефференциальный (11); клапан предохранительный радиаторной секции (12); картер масляный (13); труба всасывающая с заборником (14); секция радиаторная масляного насоса (15); секция нагнетающая масляного насоса (16); клапан редукционный нагнетающей секции (17); полость дополнительной центробежной очистки масла.

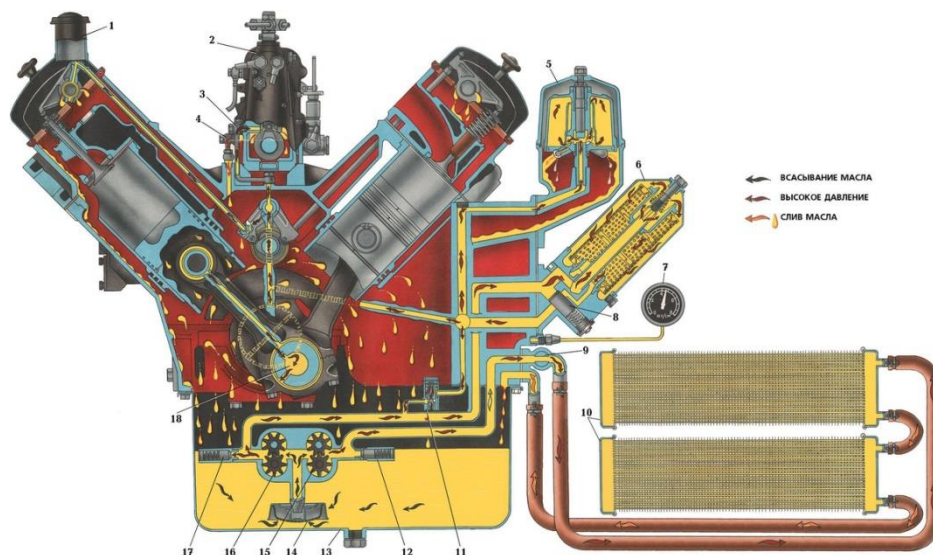


Рисунок 1 – Система смазки двигателя внутреннего сгорания

Анализ схемы позволяет сделать вывод, что в системе смазки двигателя формируется многоконтурный механизм движения масла, отличающийся сложностью, главным требованием к которому является его управляемость и устойчивость в условиях эксплуатации. Расчет основных характеристик динамики масла, согласно общим подходам механики жидкости и газа, основывается на оценке коэффициента сопротивления, который, в свою очередь, во многом определяется числом Рейнольдса, содержащем как допустимый расход, так и вязкость масла. Поэтому для сравнения были выбраны масла одного из самых популярных стандартов по вязкости SAE. Уровень угара, характеризующий износостойкость системы, определяется температурой вспышки масла, а кислотно-щелочной индекс, позволяет оценить его очищающие свойства и, следовательно, способность системы противодействовать образованию отложений на стенках двигателя и нагару на его рабочих частях. Поэтому для сравнения были выбраны такие показатели качества, как окислительно-щелочные свойства, кинетическая вязкость масла при 100°C и температура его вспышки.

Моторные масла обычно классифицируются по способу производства на три основных типа: минеральные, синтетические и полусинтетические [2-4]. Минеральные масла производятся из очищенной нефти, проходят процесс рафинирования для удаления нежелательных примесей и добавления различных добавок. Как правило, они дешевле синтетических, отличаются нестабильностью химического состава, имеют более короткий срок службы и подвержены влиянию флуктуаций температуры окружающей среды [2-4].

Синтетические масла получают химическим путем. Они предназначены для обеспечения стабильной работы двигателя в широком диапазоне температур, поэтому обычно более устойчивы к флуктуациям температуры окружающей среды и лучше защищают двигатель от износа. Поскольку дольше сохраняют свои свойства, то реже требуют замены, но существенно дороже минеральных [2-4].

Полусинтетические масла представляют собой смесь минеральных и синтетических масел, создаются для реализации сочетания лучших сторон своих составляющих, поэтому считаются более качественными, чем минеральные, но при этом доступнее по цене чем синтетические масла [2-4].

Для принятия решения по выбранным критериям была введена прогрессивная шкала отношений (3:5:7), по которой определялись коэффициенты их сравнительной значимости b_{ij} . Сравнение критериев проводилось вербально на основании опроса пользователей. Самым значимым критерием была выбрана вязкость при 100°C, затем температура вспышки и, наконец, окислительно-щелочные свойства (см. круговую диаграмму на рисунке 1). По выбранным коэффициентам рассчитывался вектор матрицы сравнения ρ_i по формуле [5-7]:

$$\rho_i = \sqrt[k]{\prod_{l=1}^k b_{il}}, \quad (1)$$

где k – количество обоснованных критериев ($k = 3$).

Далее, на основании собранной информации по отзывам автомобилистов и автомехаников, с учетом выявленных достоинств и недостатков рассматриваемых марок масла (альтернатив), по прогрессивной шкале формировались коэффициенты попарного сравнения альтернатив a_{ij} по каждому критерию отдельно, и составлялась матрица:

$$\omega_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{m=1}^n a_{ijm}}, \quad (2)$$

где n – число сравниваемых марок масла ($n = 4$); i – порядковый номер критерия сравнения; j – порядковый номер альтернативы. Для нормировки использовалось соотношение:

$$\omega_{ijn} = \frac{\omega_{ij}}{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}}. \quad (3)$$

Анализ осуществлялся по индикатору сравнения для каждой марки моторного масла:

$$\Omega_j = \sum_i \rho_i \omega_{ijn}. \quad (4)$$

Итоги применения метода многокритериального сравнения альтернатив к рассматриваемой задаче приведены на рисунке 2.

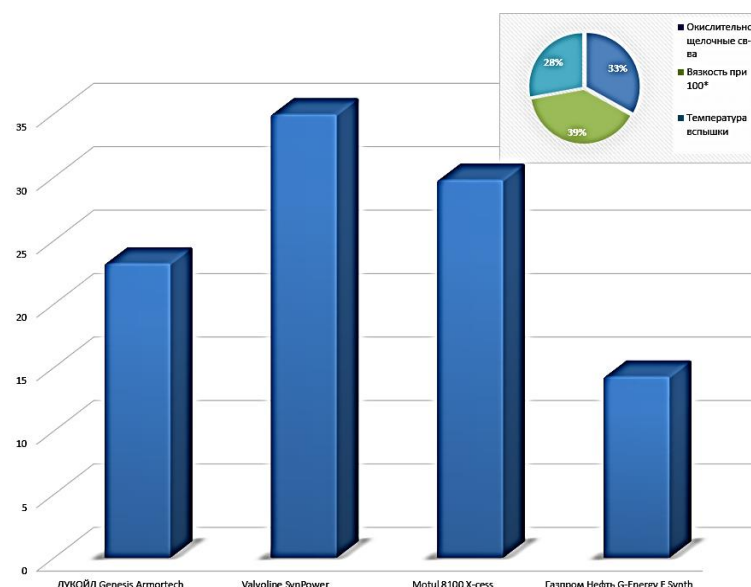


Рисунок 2 – Результаты сравнения моторных масел

В результате сравнения выяснилось, что лучше остальных в рассматриваемой ситуации подойдут марки Valvoline и Motul, которые благодаря своим премиальным формулам обеспечивают хорошие показатели основных рассматриваемых характеристик (см. Рис. 2). Таким образом, синтетические масла средней ценовой категории могут обеспечить двигатель хорошей защитой и продлить срок его эксплуатации.

В заключение отметим, что многокритериальный анализ в рамках системного подхода дает возможность обоснованно принять решение по выбору марки масла с учетом многоаспектности задачи с помощью программ поддержки принятия решения. При этом моделирование конкретной ситуации состоит в обосновании и формировании ранжированного по значимости набора критериев сравнения возможных альтернатив (в данном случае марок масел), список которых составляется по данным, полученным из различных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.
2. Войтов, В.А. Оптимизация и прогнозирование эксплуатационных свойств смазочных материалов в агрегатах трансмиссии / В.А. Войтов, С.А. Митиков, М.И. Суханов // Вестник НТУ «ХПИ» / Автомобиле- и тракторостроение / Сборник научных трудов. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 6. – С. 136-140.
3. Терехов, А.С. Влияние температурных режимов работы агрегатов трансмиссии на эксплуатационные свойства трансмиссионного масла / А.С. Терехов, П.П. Заскалько, В.И. Некрасов // Автомобильная промышленность. – 1976. – № 6. – С. 11-12.
4. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник / Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.Я. Буяновский [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1989. – 224 с.
5. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

6. Системный подход к проблеме обоснования модернизации лесозаготовительных машин / П.И. Попиков, Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, В.С. Полянин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 2, ч. 2 (13-2). – С. 296-300.

7. Кузнецов, Д.С. Применение метода анализа иерархий для обоснования выбора наиболее эффективного корчевателя / Д.С. Кузнецов, Е.В. Поздняков, Н.Ю. Евсикова // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 1, № 1 (26). – С. 91-95.

REFERENCES

1. Theoretical Foundations of Systems Analysis / V.I. Novosel'tsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by V.I. Novosel'tsev. – Moscow: Mayor, 2006. – 592 p.

2. Voitov, V.A. Optimization and Forecasting of Performance Properties of Lubricants in Transmission Units / V.A. Voitov, S.A. Mitikov, M.I. Sukhanov // Bulletin of NTU "KhPI" / Automobile and Tractor Industry / Collection of Scientific Papers. – Kharkov: Publishing House of NTU "KhPI". – 2006. – Iss. 6. – P. 136-140.

3. Terekhov, A.S. Influence of Temperature Modes of Transmission Units on Performance Properties of Transmission Oil / A.S. Terekhov, P.P. Zaskal'ko, V.I. Nekrasov // Automobile industry. – 1976. – No. 6. – P. 11-12.

4. Lubricants: Antifriction and antiwear properties. Test methods: Handbook / R.M. Matveevsky, V.L. Lashkhi, I.Ya. Buyanovsky [et al.]. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 224 p.

5. Saati, T. Decision making. Hierarchy process analysis method / T. Saati; trans. from English by R.G. Vachnadze. – Moscow: Radio and communication, 1993. – 278 p.

6. Systems approach to the problem of justifying the modernization of logging machines / P.I. Popikov, N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, V.S. Polyanin // Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice. – 2015. – No. 2, Part 2 (13-2). – P. 296-300.

7. Kuznetsov, D.S. Application of the hierarchy process analysis method to justify the choice of the most effective root puller / D.S. Kuznetsov, E.V. Pozdnyakov, N.Yu. Evsikova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Vol. 1, No. 1 (26). – P. 91-95.

Секция 3. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.58168/PHBSc-IT2025_293-299

УДК 372.862

ПРОЕКТНОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ КАК ОСНОВА ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ АВИАЦИОННОГО ВУЗА

PROJECT-BASED PHYSICS EDUCATION AS A BASIS FOR MILITARY SPECIALISTS
TRAINING AT AN AVIATION HIGHER SCHOOL

Сушко Т.И., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Sushko T.I., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Кожемякин А.Е., курсант, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Kozhemyakin A.E. Cadet, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Майорова Т.Л., кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Mayorova T.L., PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Хухрянская Е.С., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Khukhryanskaya E.S., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. Проектное физическое образование в военном вузе является одной из составляющих практического изучения дисциплин специализации, развивает у курсантов навыки изобретательской работы и практический опыт исследователя. Форма такой проектной деятельности, которую осуществляет междисциплинарная команда преподавателей и курсантов, проводится в рамках военно-научной секции кафедры физики. Преподавательский состав задает алгоритм и определяет траектории его хода. Курсанты выполняют совместные проекты в соответствии с инженерной специальностью, где каждый раздел проекта состоит из решения инженерных задач.

Ключевые слова: междисциплинарные связи, специализация, проект, моделирование.

Abstract. Project-based physics education at a military higher school is one of the components of the specialization disciplines practical study, develops military students' inventive skills and practical experience as a researcher. The form of such project activity, which is implemented by an interdisciplinary team of teachers and military students, is carried out within the framework of the department military scientific section. The teaching staff sets the algorithm and determines its trajectories. The military students carry out joint projects in accordance with the engineering specialty, where each project section consists of solving engineering problems.

Keywords: interdisciplinary connections, subspecialty, project, simulations.

Курс физики является основой подготовки военного инженера, фундаментальной базой, без которой невозможна профессиональная деятельность военного специалиста. В нем заложена взаимосвязь со специальными дисциплинами общеобразовательной программы специальности. Говоря о физике, как учебной дисциплине, представляют два типа мышления для ее изучения и понимания: эмпирический и теоретический. Поскольку физика традиционно изучается на первых курсах, современный курсант, вчерашний выпускник, в целом слабо готов к восприятию теоретического курса. Однако именно данный тип мышления обладает базой создания интеллектуального фундамента, обеспечивающего эффективность применения достижений современной физики, военной техники и технологий. Следовательно, возникает как объективная потребность, так и необходимость активного использования эмпирического языка физики и развития соответствующего типа мышления, чтобы каждый на своем уровне помогал и развивал желание понимать сложные физические процессы посредством решения военно-профильных и иных задач в совместных проектах курсантов с преподавателями в соответствии с выбранной инженерной специальностью. Проектная деятельность в военном вузе в данном случае выступает как концептуальная основа изучения дисциплин специализации, учитывающая как когнитивные стили и диссонансы курсантов в пределах непрерывного образования, так и иницилирующая практико-ориентированный подход. По нашему мнению, такая работа позволяет адаптировать характеристики обучения с личной мотивацией курсантов, развивать навыки изобретательской работы. Форма такой проектной деятельности проводится в рамках военно-научной секции (ВНС) кафедры. Актуальной задачей преподавательского состава кафедры физики является представление наиболее интересных направлений для проектной работы курсантов, отработка междисциплинарных связей на аудиторных занятиях по разным типам мышления в рамках компетенций соответствующих направлений будущей инженерной деятельности. Желательно, чтобы участниками такого проектного физического образования была создана междисциплинарная команда в рамках инженерной специализации для обмена опытом и условиями взаимодействия в цифровой образовательной среде вуза, цифровой трансформации военных вузов. Доступность образовательной среды вуза, возможности настройки и адаптации программного обеспечения под задачи исследования выбранной тематики, квалифицированная индивидуальная помощь курсантам для ориентации не только в физических процессах при постановке задач в проектах, но и в системном междисциплинарном обучении помогают курсантам приобрести прикладные инженерные

знания к моменту выпуска их из вуза. Каждый раздел проекта состоит из инженерных задач, решаемых курсантами и преподавательским составом.

Одним из результатов такой деятельности является опыт совместной разработки проектов курсантами, обучающимися по специальности «Техническая эксплуатация летательных аппаратов», начиная с первого и переходом их на последующие курсы, и преподавателями специализированной кафедры по тематике «Разработка и оптимизация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) вертикального взлета и посадки (ВВП) малых размеров повышенной грузоподъемности» [1]. Тема является актуальной, так как диапазон современных беспилотных аппаратов очень широк: от микро - и мини- БПЛА до тяжелых многотонных аппаратов. Их назначение не ограничивается только военной промышленностью, поскольку с необходимостью применяются в спасательных операциях, грузоперевозках, сельском и лесном хозяйстве, охране границ, что придает импульсы к развитию беспилотной авиационной техники. Взлет и посадка – важные этапы полетов современных БПЛА, от качества расчета и выполнения этих операций зависит не только эффективность проводимых с их использованием работ, но и возможность их многоразового применения. Одним из ограничений применения БПЛА является длина или отсутствие взлетно-посадочной полосы. Задачей разработчиков в беспилотной авиации является проектирование программ управляемого полетом. Частные математические модели движения беспилотного аппарата в вертикальной или горизонтальной плоскостях лежат в основе данных программ. Также уточняется трехмерное изображение конкретизации векторов косвенного управления аппаратом [2]. Существенной проблемой остается малое количество работ в открытом доступе по математическому и физическому описанию основных видов взлета и посадки современных БПЛА, что не позволяет при моделировании учитывать характеристики местности для выбранных взлетно-посадочных площадок беспилотных подразделений. Для облегчения сложных электрических расчетов и имитационного моделирования двигателя возможно использование условно бесплатного веб-сервиса *eCalc*, представляющего собой онлайн-калькулятор, который с 2004 года предоставляет услуги по моделированию и оценке проектов радиоуправляемых моделей [3].

Целью этапа работы, выполняемой в рамках указанного проекта, является разработка БПЛА вертикального взлета малых размеров повышенной грузоподъемности с двигателями, расположенными в разных плоскостях, и новым видом крепления груза в виде электромагнитного замка, с изменением запуска БПЛА малого радиуса действия массой от 35 до 150 кг. При механическом движении аппарата учитывалась несбалансированность основных сил, возникающих в полете (тяга, лобовое сопротивление, подъемная сила и вес), для ускорения в направлении большей силы в соответствии с законами механики сред. Имитационное моделирование полета БПЛА проводилось в веб-сервисе *eCalc* с учетом объективных технических характеристик: взлетная масса, дальность, высота и продолжительность полета, размеры аппарата, размер и мощность электродвигателей, определяемые габаритами выбранной рамы БПЛА. Компьютерное моделирование полета БПЛА малого радиуса действия позволило авторам внести изменения в конструкцию его крепления к фюзеляжу. Основу расчетов составляют кинематические уравнения

механического движения и законы аэродинамики. На рисунке 1 показан расчет дальности полета и воздушная скорость при выбранном типе двигателей.

Ранее с помощью программного комплекса *SolidWorks* [4] были разработаны трехмерные модели крестовины, подкоса, вставки крепления, штанги для крепления двигателя на основе конечно-разностной сетки, состоящей из трех элементов формы БПЛА (Рис. 2). Функция комплекса «Сборка» позволяет осуществить получение трехмерного изображения мультикоптера.

Формат *.stl* позволяет передавать трехмерные модели на 3D-принтер для изготовления элементов БПЛА на учебном стенде, процесс его сборки и изготовление частей показан на рисунке 3.

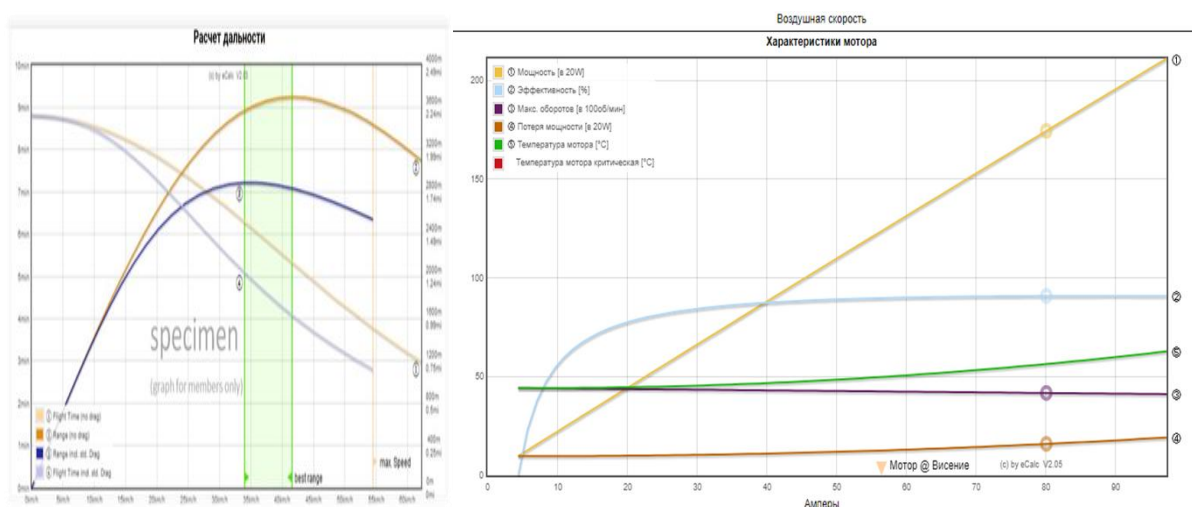


Рисунок 1 – Расчет дальности полета и воздушная скорость при выбранном типе двигателей

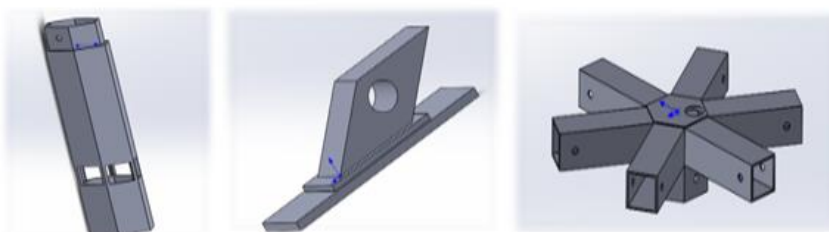


Рисунок 2 – Трехмерные модели подкоса, вставки крепления и крестовины

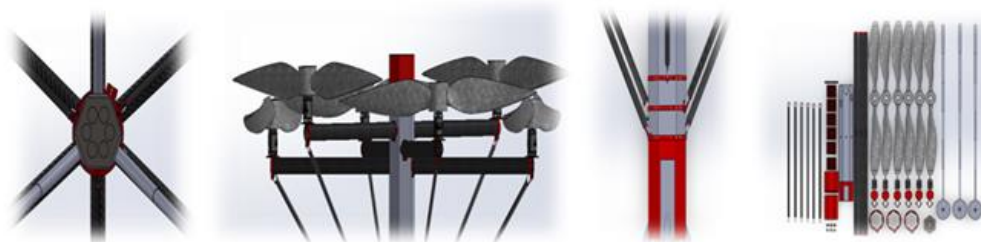


Рисунок 3 – Процесс сборки БПЛА

Условия рельефа местности в некоторых регионах не позволяют иметь взлетно-посадочную полосу, что является основной проблемой для мультикоптера вертикального взлета. Одним из способов решения проблемы взлета с любой наземной точки, по нашему мнению, могут являться конструктивные изменения вида крепления. В качестве такой модернизации предложен электромагнитный замок, позволяющий без потери времени и с большей надежностью поднимать и отпускать груз при сохранении нужной грузоподъемности (Рис. 4). Это позволит осуществить оптимизацию конструкции крепления посредством изменения подъема за счет системы электромагнитных замков в виде 10 мм металлических шайб, приклеенных к фюзеляжу, в количестве четырех штук и добавления электростартера на двигатель внутреннего сгорания.

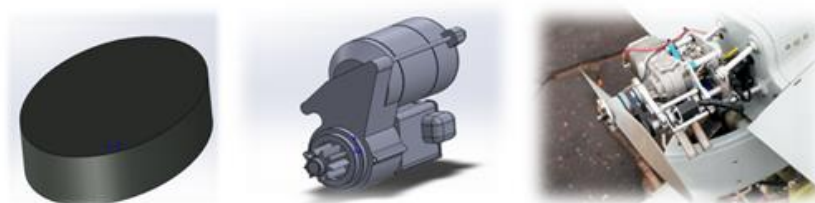


Рисунок 4 – Изменения, внесенные в конструкцию крепления

С помощью разработанного мультикоптера (Рис. 5) осуществляется подъем БПЛА на высоту, обесточивание электромагнитных замков и дальнейшее пикирование БПЛА до набора необходимой скорости, переход с набора вертикальной скорости в горизонтальную с дальнейшим продолжением полета и выполнением необходимых задач. Расчет радиуса выхода из набора вертикальной скорости в горизонтальную скорость при данном способе запуска был проведен с учетом тяги и лобового сопротивления.



Рисунок 5 – Разработанный мультикоптер

Таким образом, в процессе разработки и конструирования предложено решение по изменению расположения двигателей в разных плоскостях, позволяющее повысить грузоподъемность мультикоптера при тех же габаритных размерах. Имитационное моделирование полета измененной конструкции мультикоптера позволило авторами провести расчеты его воздушной скорости, дальности полета, которая составила при максимальной

нагрузке 150 кг около 3200 м, радиуса кривизны полета самолета при переходе к набору вертикальной скорости с учетом тяги двигателя и лобового сопротивления при старте с нулевой скоростью [5]. Радиус изменялся от 6,57 м при скорости от 100 км/ч до 19 м при скорости до 170 км/ч. Результаты исследований могут быть использованы как помощь преподавательскому составу выпускающих кафедр при изучении специальных дисциплин, в курсовом и дипломном проектировании устройств аналогичного типа, для изобретательской и рационализаторской деятельности междисциплинарной команды.

Проектное физическое образование не только способствует усваиванию материала по другим дисциплинам специализации: аэродинамика, инженерная и компьютерная графика, теория авиационных полетов, разработка летательных аппаратов, системы автоматизированного проектирования, но и имеет значительный потенциал для творчества курсантов и их прикладных знаний. Преподаватель задает алгоритм и определяет траектории его хода, которые корректируются курсантами в ходе совместных обсуждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сушко, Т.И. Формирование инженерных навыков курсантов посредством компьютерного моделирования / Т.И. Сушко, А.Е. Кожемякин, Т.В. Пашнева // Физико-математическое моделирование систем: материалы XXIV международного семинара, Воронеж, 25-26 ноября 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. – С. 122-126.

2. Булат, П.В. Основы аэродинамики беспилотных воздушных судов: учебное пособие. / П.В. Булат, С.Ю. Дудников, П.Н. Кузнецов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет. – Москва: Издательство Спутник+, 2021. – 272 с.

3. eCalc - reliable electric drive simulations. – URL: <https://www.ecalc.ch> (дата обращения 12.03.2025).

4. SolidWorks 3D CAD. – URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-3d-cad> (дата обращения 17.03.2025).

5. Кожемякин, А.Е. Расчет радиуса кривизны полета самолета при переходе к набору вертикальной скорости с учетом тяги двигателя и лобового сопротивления при старте с нулевой скоростью. – Свидетельство о государственной регистрации программы № 2024681669 от 06 сентября 2024 г.

REFERENCES

1. Sushko, T.I. Formation of engineering skills of cadets through computer modeling / T.I. Sushko, A.E. Kozhemyakin, T.V. Pashneva // Physico-mathematical modeling of systems: materials of the XXIV International seminar, Voronezh, November 25-26, 2022. – Voronezh: Voronezh State Technical University, 2023. – P. 122-126.

2. Bulat, P.V. Fundamentals of aerodynamics of unmanned aircraft: training manual / P.V. Bulat, S.Yu. Dudnikov, P.N. Kuznetsov; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Sevastopol State University. – Moscow: Sputnik+ Publishing House, 2021. – 272 p.

3. eCalc – reliable electric drive simulations. – URL: <https://www.ecalc.ch> (accessed 12.03.2025).

4. SolidWorks 3D CAD. – URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-3d-cad> (accessed 17.03.2025).

5. Kozhemyakin, A.E. Calculation of the radius of curvature of an aircraft flight during the transition to a set of vertical speed, taking into account engine thrust and drag at zero-speed start. – Certificate of State registration of the program No. 2024681669 dated September 06, 2024.

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОПАРКОВ В РЕАЛИЗАЦИИ STEM-ОБРАЗОВАНИЯ

POSSIBILITIES OF TECHNOLOGY PARKS IN THE IMPLEMENTATION OF STEM EDUCATION

Громова Е.М., кандидат педагогических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова», Ульяновск, Россия

Gromova E.M., PhD in Pedagogical Sciences, Docent, Associate Professor, Ulyanovsk State Pedagogical University named after I.N. Ulyanov, Ulyanovsk, Russia

Беркутова Д.И., кандидат педагогических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова», Ульяновск, Россия

Berkutova D.I., PhD in Pedagogical Sciences, Docent, Associate Professor, Ulyanovsk State Pedagogical University named after I.N. Ulyanov, Ulyanovsk, Russia

Горшкова Т.А., кандидат педагогических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова», Ульяновск, Россия

Gorshkova T.A., PhD in Pedagogical Sciences, Docent, Associate Professor, Ulyanovsk State Pedagogical University named after I.N. Ulyanov, Ulyanovsk, Russia

Веселовская Ю.А., кандидат педагогических наук, декан, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова», Ульяновск, Россия

Veselovskaya Ju.A., PhD in Pedagogical Sciences, Dean, Ulyanovsk State Pedagogical University named after I.N. Ulyanov, Ulyanovsk, Russia

Сидорова Н.В., кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова», Ульяновск, Россия

Sidorova N.V., PhD in Pedagogical Sciences, Docent, Head of the Department, Ulyanovsk State Pedagogical University named after I.N. Ulyanov, Ulyanovsk, Russia

Аннотация. Федеральная программа по созданию технопарков, в том числе детских технопарков «Кванториум» в образовательных учреждениях, создала предпосылки для переосмысления методики обучения физике и другим естественно-научным предметам. В статье представлен современный подход к обучению молодежи физике и иным естественно-научным, инженерным и техническим дисциплинам на основе принципа их интеграции и выполнения междисциплинарных учебных проектов. Анализируются основные аспекты концепции STEM-образования (Science, Technology, Engineering and Mathematics). В результате проведенного анализа авторы делают вывод о преимуществах реализации концепции STEM-образования, в основе которой лежит интеграция научных (физики, химии, биологии и др.), технических, инженерных и математических предметных областей.

Ключевые слова: STEM-образование, методика обучения, технопарк, метод проектов, междисциплинарные проекты.

Abstract. The federal program for the creation of technoparks, including children's technoparks «Quantorium» in educational institutions, has created the prerequisites for rethinking the teaching methods of physics and other disciplines. The article examines a modern approach to teaching physics and other natural science, engineering and technical subjects to young people based on the principle of their integration and the implementation of interdisciplinary educational projects. The main aspects of the concept of STEM education (Science, Technology, Engineering and Mathematics) are analyzed. As a result of the analysis, the authors conclude about the advantages of implementing the concept of STEM education, which is based on the integration of scientific, technical, engineering, natural sciences (physics, chemistry, biology, etc.) and mathematical disciplines.

Keywords: STEM-education, teaching methods, technopark, project method, interdisciplinary projects.

Сегодня система образования в России как социальный институт меняется, адаптируясь не только к новым геополитическим реалиям, диктующим необходимость технологического суверенитета страны. Образование ориентируется и на требования уже не постиндустриального, а информационного общества, в котором научно-технический прогресс определяет изменения всех сфер жизни: конкурентоспособность зависит от технологий, происходит активная трансформация различных областей знания, развивается научное мировоззрение, доминируют междисциплинарные проекты, цифровые инструменты становятся повседневностью для всех категорий граждан.

Наблюдение за физическими явлениями, их влияние на протекание биологических процессов и химических реакций, научная визуализация средствами цифровых технологий и многие другие элементы интеграции физики с другими учебными предметами в школьном образовании сегодня выходят на новый уровень. Во многом этот процесс стимулируют обновленные федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС), в которых заложен вектор метапредметности. Большинство педагогов сегодня осознает, что достижение метапредметных образовательных результатов возможно лишь на основе расширения и углубления теоретических знаний обучающихся по физике, математике, информатике, биологии, химии, учебному предмету «Труд (технология)», а, главное, интеграции данных предметных областей и моделирования практико-ориентированных учебных занятий, выполнения междисциплинарных учебных проектов и лабораторных работ с использованием современного оборудования, внедрения новых моделей дополнительного образования детей инженерно-технической направленности.

Реализация национального проекта «Образование» позволила в кратчайшие сроки провести масштабное материально-техническое переоснащение образовательных организаций и кардинально улучшить обучение по направлениям естественных и технических наук за счет открытия детских технопарков «Кванториум» (на данный момент в Российской Федерации их открыто уже около 500). Собственно, это и являлось главной целью их создания. При этом, в методических рекомендациях прямо указывается, что «... целью создания

школьного Кванториума является развитие материально-технической базы общеобразовательных организаций и совершенствование организационно-содержательных условий для расширения содержания общего образования и реализации дополнительных общеобразовательных программ, обеспечивающих развитие у обучающихся современных компетенций и навыков, в том числе естественно-научной, математической, информационной грамотности, формирования критического и креативного мышления, а также повышения качества образования» [1, С. 2].

Кроме того, при обучении школьников дисциплинам естественно-научной и технической направленности взят курс на усиление взаимодействия с высшей школой. Для использования возможностей инфраструктуры университетов, проведения научной экспертизы результатов проектной деятельности школьников профессорско-преподавательским составом университетов сегодня действует несколько федеральных программ:

- создаются центры научного образования детей «Дом научной коллаборации» (ДНК) (открыто около 30);

- в педагогических вузах открыты технопарки универсальных педагогических компетенций «Учитель будущего поколения России» (открыто более 30) [2, С. 75-76].

Технопарки представляют собой особые образовательные пространства, оснащенные самым современным высокотехнологичным естественно-научным, инженерным и техническим оборудованием с использованием цифровых технологий. Их основа – обучение через междисциплинарные проекты.

Метод проектов является особой философией в образовании. На наш взгляд, одним из наиболее точных является следующее определение: «Метод проектов – совокупность педагогических приемов и операций, осуществляемых преподавателем и учащимся в процессе личностно значимой деятельности с целью активизации познавательных интересов учащихся, направленных на получение и закрепление новых знаний, умений и навыков, развитие творческих способностей и приобретение опыта практического решения самостоятельно поставленных задач» [3]. При этом, приоритетная роль в обучении естественно-научным и инженерно-техническим дисциплинам принадлежит междисциплинарным практико-ориентированным проектам. Это обусловлено тем, что именно такие проекты являются отражением современных прорывных технологий и напрямую связаны с технологическими инновациями.

Проведенный нами информационный анализ психолого-педагогической и методической литературы показал, что напрямую с обучением естественно-научным и инженерно-техническим дисциплинам методом проектов на основе принципа междисциплинарности связана такая концепция, как STEM-образование. STEM – это устоявшаяся аббревиатура, которая расшифровывается как:

- S – Science (перевод с англ. «естественные науки»);
- T – Technology (перевод с англ. «технологии»);
- E – Engineering (перевод с англ. «инженерный»);
- M – Mathematic (перевод с англ. «математика») [4-8].

Существуют различные варианты данной концепции, расширяющие границы интеграции:

- STEAM – добавляется A – Arts (перевод с англ. «искусство»);
- STEMM – добавляется M – Music (перевод с англ. «музыка»);
- STREAM – добавляется A – Arts (перевод с англ. «искусство») и добавляется R – Reading+Writing (перевод с англ. «чтение» и «письмо»).

Но основной посыл заключается в том, что внедрение STEM-образования в стратегически важные области науки и техники должно производиться через реализацию реальных «практических проектов», в которых необходимо «слияние в единое целое разрозненных естественнонаучных знаний» [9, С. 93]. Выполнение подобных проектов, в том числе, направлено и на решение профориентационных задач. Общеизвестно, что современного школьника следует готовить к освоению профессий будущего. И многие из этих профессий также носят междисциплинарный характер, и содержание их труда находится на стыке специальных научных областей, математики и инженерии (например, биофизик, биоинформатик, генный инженер, биотехнолог в аграрной, пищевой промышленности, генетике, медицине, фармации и др.). И в этих условиях трудно переоценить возможности того ресурсного обеспечения и оборудования, которое готов предоставить технопарк для организации наблюдений, экспериментов, лабораторных исследований, проектной деятельности талантливых обучающихся – будущего национального кадрового резерва для высокотехнологичных отраслей экономики России. Работа по данному направлению ведется нашим авторским коллективом в рамках внутривузовского гранта УлГПУ на тему «Реализация STEM-образования в условиях ФГОС нового поколения».

Таким образом, можно говорить о масштабных изменениях в методике обучения молодежи физике и другим естественно-научным, инженерным и техническим дисциплинам, в освоении наукоемких технологий за счет доминирования междисциплинарной практико-ориентированной проектной деятельности обучающихся, а, следовательно, STEM-образования. Во многом эти изменения стали возможными благодаря созданию технопарков, в том числе детских технопарков «Кванториум».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические рекомендации по созданию и функционированию детских технопарков «Кванториум» на базе общеобразовательных организаций // Центр просветительских инициатив Министерства просвещения Российской Федерации. – URL: <https://mpcenter.ru/national-project/informacionnoe-soprovozhdenie/quantorium/%D0%9C%D0%A0%20%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%83%D0%BC.pdf> (дата обращения 05.04.2025).
2. Громова, Е.М. Подготовка будущих учителей технологии на базе технопарка: опыт и перспективы / Е.М. Громова, Д.И. Беркутова, Т.А. Горшкова // Поволжский педагогический поиск. – 2023. – № 4 (46). – С. 73-82.
3. Громова, Е.М. Метод проектов в технологическом образовании (этнокультурный аспект) / Е.М. Громова // Актуальные проблемы технологического образования: опыт,

проблемы, перспективы: материалы II Международной заочной научно-практической конференции, Мозырь, 25–26 ноября 2011 года. – Мозырь: Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шемякина, 2012. – С. 54-57.

4. Зубова, Н.В. Реализация идей STEM-образования на занятиях по физике в технологическом вузе / Н.В. Зубова, М.Д. Даммер // Современное образование и педагогическое наследие академика А.В. Усовой: Международная научно-практическая конференция. Сборник материалов, Челябинск, 04-05 октября 2021 года. Том Часть 1. – Челябинск: Общество с ограниченной ответственностью «Край Ра», 2021. – Т. 4. – С. 143-147.

5. Жусупкалиева, Г.К. Проблемы изучения подготовки учителей физики к внедрению и развитию STEM-технологий / Г.К. Жусупкалиева, Б.У. Куанбаева, М.Е. Рахметов // Вестник Атырауского университета имени Халела Досмухамедова. – 2024. – Т. 74, № 3. – С. 170-178.

6. Шатунова, О.В. Развитие STEM и STEAM в России / О.В. Шатунова // Теория и практика современного воспитания и обучения: материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный педагогический университет, 2023. – С. 13-17.

7. Стрекалова, Н.А. Применение STEAM-образования на примере организации и проведения «Школы STEAM для старшеклассников» / Н.А. Стрекалова // Проблемы модернизации языкового образования. Иностранные языки: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) памяти профессора Б.П. Годунова, Сыктывкар, 15-17 мая 2019 года. – Сыктывкар: Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, 2019. – С. 87-91.

8. Ожибаева, З.М. Роль математики в развитии STEM образования / З.М. Ожибаева, Г.Т. Абдолдинова // 3i: Intellect, Idea, Innovation - интеллект, идея, инновация. – 2024. – № 1. – С. 156-163.

9. Ярных, Д.В. STEM-технологии в современном образовании / Д.В. Ярных, Л.М. Бронникова // Проблемы социально-гуманитарного образования на современном этапе модернизации российской школы: материалы десятой всероссийской с международным участием научно-практической конференции, Барнаул, 14 декабря 2021 года. – Барнаул: Алтайский государственный педагогический университет, 2022. – С. 93-96.

REFERENCES

1. Methodological recommendations on the creation and functioning of children's technoparks «Quantorium» on the basis of educational organizations // Center for Educational Initiatives of the Ministry of Education of the Russian Federation. – URL: <https://mpcenter.ru/national-project/informacionnoe-soprovozhdenie/quantorium/%D0%9C%D0%A0%20%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%83%D0%BC.pdf> (accessed 05.04.2025).

2. Gromova, E.M. Training of future teachers of technology on the basis of the technopark: experience and prospects / E.M. Gromova, D.I. Berkutova, T.A. Gorshkova // Volga Pedagogical Search. – 2023. – No. 4(46). – P. 73-82.

3. Gromova, E.M. Project method in technological education (ethno-cultural aspect) / E.M. Gromova // Actual problems of technological education: experience, problems and prospects:

materials of the II International Correspondence Scientific and Practical Conference, Mozyr, November 25-26, 2011. – Mozyr: I.P. Shemyakin Mozyr State Pedagogical University, 2012. P. 54-57.

4. Zubova, N.V. Implementation of the ideas of STEM education in physics classes at a technological university / N.V. Zubova, M.D. Dammer // Modern education and pedagogical heritage of Academician A.V. Usovoy: International Scientific and Practical Conference. Collection of materials, Chelyabinsk, October 04-05, 2021. Volume Part 1. – Chelyabinsk: Limited Liability Company «Krai Ra», 2021. – Vol. 4. – P. 143-147.

5. Zhusupkalieva, G.K. Problems of studying the training of physics teachers for the introduction and development of STEM technologies / G.K. Zhusupkalieva, B.U. Kunanbayeva, M.E. Rakhmetov // Bulletin of Atyrau University named after Khalel Dosmukhamedov. – 2024. – Vol. 4, No. 3. – P. 170-178.

6. Shatunova, O.V. The development of STEAM and STEAM in Russia / O.V. Shatunova // Theory and practice of modern education and training: materials of the International Scientific and practical conference, Voronezh, April 06, 2023. – Voronezh: Voronezh State Pedagogical University, 2023. – P. 13-17.

7. Strekalova, N.A. The use of STEAM education on the example of the organization and conduct of the «STEAM School for high school students» / N.A. Strekalova // Problems of modernization of language education. Foreign languages: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) in memory of Professor B.P. Godunov, Syktyvkar, May 15-17, 2019. – Syktyvkar: Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin, 2019. – P. 87-91

8. Ozhibaeva, Z.M. The role of mathematics in the development of STEM education / Z.M. Ozhibayeva, G.T. Abdoldinova // 3i: Intellect, Idea, Innovation - intelligence, idea, innovation. – 2024. – No. 1. – P. 156-163.

9. Yarnyh, D.V. STEM technologies in modern education / D.V. Yarnyh, L.M. Bronnikova // Problems of social and humanitarian education at the present stage of modernization of Russian schools: materials of the tenth All-Russian scientific and practical conference with international participation, Barnaul, December 14, 2021. – Barnaul: Altai State Pedagogical University, 2022. – P. 93-96.

НАУЧНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ОБУЧЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

SCIENTIFIC WORK BY STUDENTS DURING THE INITIAL PERIOD OF THEIR STUDY AT
TECHNICAL UNIVERSITIES

Бирюкова И.П., кандидат педагогических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Biryukova I.P., PhD in Pedagogical Sciences, Docent, Associate professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Саврасова Н.А., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Savrasova N.A., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы организации научно-исследовательской работы студентов младших курсов в технических вузах. Определены задачи, которые стоят перед преподавателями, осуществляющими руководство научной работой данного контингента обучающихся. Для студентов на начальном этапе обучения рекомендуются такие формы научной работы, как составление обзора научной литературы, вычислительный эксперимент, обработка статистических данных и рационализаторская работа.

Ключевые слова: научно-исследовательская работа студентов, исследовательские компетенции, вычислительный эксперимент, статистическая обработка информации, рационализаторская работа.

Abstract. The article discusses the problems of organizing research work for junior students at technical universities. It defines the tasks facing teachers who manage scientific work with this group of students. For students at the beginning of their studies, forms of scientific work such as reviewing scientific literature, conducting computational experiments, processing statistical data and rationalization work are recommended.

Keywords: students' research work, research competencies, computational experiment, statistical information processing, innovation work.

Согласно федеральным государственным образовательным стандартам высшего образования научная деятельность является важной составляющей подготовки специалистов технического профиля. Для эффективного формирования компетенций в области научных

исследований соответствующие виды деятельности должны быть включены в учебный процесс на протяжении всего периода получения студентом высшего образования. Однако при организации научной работы студентов на начальном этапе обучения выявляется ряд проблем, которые необходимо решать преподавателям общеобразовательных кафедр.

Прежде всего, это проблема выбора научных задач, которые могут быть успешно решены студентами младших курсов, а также используемых методов исследования. Данная проблема связана с тем, что многие знания и умения, которые требуются в научной деятельности студента по выбранной специальности, приобретаются ими позже при изучении математических и специальных дисциплин. Преподаватели также отмечают низкий уровень подготовки по математике и физике у абитуриентов, поступающих в настоящее время в технические вузы [1, 2]. Кроме того, студенты первых курсов демонстрируют слабые знания методологии физического эксперимента и отсутствие навыков работы с измерительным оборудованием [3]. Все это накладывает ограничения на применение теоретических и экспериментальных методов исследования и сужает спектр доступных для решения научных задач.

Многие исследователи и преподаватели указывают на отсутствие заинтересованности в научной работе, а также низкий уровень самоорганизации и самоконтроля учебной деятельности и слабые навыки самостоятельной работы у первокурсников [4]. Это затрудняет привлечение данного контингента студентов к научной деятельности и отрицательно влияет на ее результативность.

Вследствие указанных факторов студенты младших курсов не могут создавать качественные научные продукты, что делает невозможным их участие в публикациях статей, научных конференциях, конкурсах и других научных мероприятиях. Это обстоятельство ограничивает научное общение студентов и порождает проблему адекватного оценивания и стимулирования их научной деятельности.

Поэтому перед преподавателями, осуществляющими руководство научной работой студентов на младших курсах, стоят следующие задачи:

- определить компоненты компетенций в сфере научных исследований, которые могут быть сформированы на начальном этапе обучения в вузе;
- подобрать формы научной работы, обеспечивающие получение научно значимого результата;
- выделить круг научных задач, доступных для решения, подобрать соответствующие методы и средства;
- выбрать адекватные способы оценивания и стимулирования научной работы студентов первых и вторых курсов.

Основная цель научной работы студентов младших курсов, в соответствии с принципом доступности и постепенного усложнения деятельности в процессе формирования компетенций, состоит в создании у них теоретической и методологической базы для дальнейших исследований на старших курсах. Студенты должны освоить необходимый математический аппарат, технику простейших измерений, методики информационного поиска и выполнения наблюдений и экспериментов, а также приобрести опыт решения

упрощенных научных задач, выступлений с сообщениями о результатах проведенных исследований и подготовки материалов к публикациям.

На наш взгляд, для студентов первого и второго курсов доступны и соответствуют указанным целям развития исследовательских компетенций такие формы работы, как составление обзора научной литературы, вычислительный эксперимент, обработка статистических данных и рационализаторская работа.

Поиск информации по теме исследования и составление обзора научных публикаций позволяет студенту ознакомиться с современным уровнем разработки изучаемой проблемы, мотивирует его на изучение необходимых учебных дисциплин или их разделов, помогает приобрести опыт выявления проблем и постановки задач. Составление обзора научной литературы способствует освоению методов теоретического исследования: анализа, синтеза, сравнения, обобщения, конкретизации, классификации, а также помогает научиться аргументировано излагать собственные идеи.

С помощью вычислительного эксперимента, в том числе с использованием готового программного обеспечения, студенты могут исследовать моделируемые системы, определять их свойства и закономерности поведения, оценивать влияние внешних факторов и границы применимости используемых физических законов и теоретических моделей. Такая деятельность способствует формированию ключевых компонентов исследовательских компетенций: знания методологии решения задач с помощью компьютерного моделирования, опыта постановки задач, планирования эксперимента, обработки, анализа и интерпретации его результатов. Кроме того, возможен перенос приобретенных умений на эксперименты на реальном лабораторном оборудовании, что может облегчить выполнение экспериментальных исследований на старших курсах.

Многие современные специалисты в своей профессиональной деятельности сталкиваются с необходимостью анализа больших массивов статистической информации. В научно-исследовательских работах преподавателей также часто возникают задачи, предусматривающие статистическую обработку данных. Это могут быть, например, задачи климатологической обработки данных наблюдений на метеостанциях в заданных местностях, задачи исследования деградации порошков, задачи обработки результатов испытаний материалов при различных воздействиях. К решению таких задач целесообразно привлекать студентов, которые попутно могут освоить методы вычислений описательных статистик, проверки статистических гипотез, корреляционного и факторного анализов.

Рационализаторская работа позволяет студентам в более простой, по сравнению с изобретательством, деятельности приобрести опыт технического творчества и внесения инноваций. На кафедрах, ведущих дисциплины естественного цикла, рационализаторские предложения студентов могут быть направлены на усовершенствование лабораторного оборудования для учебных занятий [5]. Помимо полезного практического результата данный вид деятельности способствует освоению физических основ работы измерительных приборов и лабораторных установок, развитию умений выявлять проблемы в работе технических устройств, изучению известных способов их решений, приобретению навыков поиска необходимой информации и оформления технической документации.

Таким образом, включение в научную работу таких видов деятельности, как составление обзоров научной литературы, вычислительный эксперимент, обработка статистических данных и рационализаторская работа дает возможность студентам младших курсов получить значимые научные результаты и обеспечить их участие в научных мероприятиях, а также заложить методологическую основу для дальнейших научных исследований. Эти виды деятельности позволяют повысить привлекательность научной работы и вовлечь в нее более широкий контингент студентов уже в начале обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобасова, М.С. Анализ влияния физико-математической подготовки в школе на инженерное образование / М.С. Лобасова // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. – 2024. – № 52. – URL: <https://s.esrae.ru/vsoa/pdf/2024/52/1462.pdf> (дата обращения: 01.04.2025).
2. Ан, А.Ф. Фундаментальная подготовка в техническом университете: требования, проблемы, решения / А.Ф. Ан, Е.И. Кутарова // Вестник Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. Серия: педагогические и психологические науки. – 2023. – № 52 (71). – С. 57-67.
3. Петрова, Р.И. К вопросу о методологических умениях учащихся по физике / Р.И. Петрова, Ф.Л. Сидорова // Современные проблемы науки и образования. – 2020. – № 4. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29968> (дата обращения: 01.04.2025).
4. Корзинова, Е.И. Самостоятельность в учебной деятельности студента как компонент достижения высокого уровня готовности к будущей профессии / Е.И. Корзинова, А.А. Рывлина, О.П. Шабанова // Преподаватель XXI век. – 2021. – № 3-1. – С. 55-63.
5. Бирюкова, И.П. Рационализаторская работа как компонент учебной деятельности курсантов в военном вузе / И.П. Бирюкова, И.О. Бакланов // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 6. – С. 90-95.

REFERENCES

1. Lobasova, M.S. Analysis of the influence of physical and mathematical training in school on engineering education / M.S. Lobasova // Bulletin of the East Siberian Open Academy. – 2024. – No. 52. – URL: <https://s.esrae.ru/vsoa/pdf/2024/52/1462.pdf> (date of reference: 04/01/2025).
2. An, A.F. Fundamental training at a technical university: requirements, problems, solutions / A.F. An, E.I. Kutarova // Bulletin of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov. Series: pedagogical and psychological sciences. – 2023. – No 52 (71). – P. 57-67.
3. Petrova, R.I. On the issue of methodological skills of students in physics / R.I. Petrova, F.L. Sidorova // Modern problems of science and education. – 2020. – No. 4. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29968> (date of reference: 04/01/2025).
4. Korzinova, E.I. Independence in student's academic activities as a component of achieving a high level of readiness for the future profession / E.I. Korzinova, A.A. Ryvlina, O.P. Shabanova // Teacher of the XXI century. – 2021. – No. 3-1. – P. 55-63.
5. Biryukova, I.P. Rationalization work as a component of the educational activities of cadets in a military university / I.P. Biryukova, I.O. Baklanov // Modern high technologies. – 2024. – No. 6. – P. 90-95.

**ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ В ФОРМЕ
ТЕСТИРОВАНИЯ В РАМКАХ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА**
CURRENT MONITORING OF STUDENTS' ACADEMIC ACHIEVEMENTS THROUGH
TESTING WITHIN THE CONTEXT OF THE COMPETENCY-BASED APPROACH

Бирюкова И.П., кандидат педагогических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Саврасова Н.А., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Biryukova I.P., PhD in Pedagogical Sciences, Docent, Associate professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Savrasova N.A., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. В статье рассматривается проблема использования тестирования в текущем контроле успеваемости студентов инженерных вузов по дисциплине «Физика». Наиболее эффективными признаются тесты учебных достижений, оценивающие степень сформированности когнитивных составляющих компетенций. В условиях текущего контроля затруднено применение тестов, полностью отвечающих требованиям теории педагогических измерений. Поэтому рекомендуется использовать небольшие наборы заданий тестового формата, применение которых на каждом практическом и лабораторном занятии повышает мотивацию студентов к учебной деятельности и стимулирует их самостоятельную работу.

Ключевые слова: текущий контроль успеваемости студентов, тестирование, компетенции, тесты учебных достижений.

Abstract. The article discusses the problem of using testing in the current monitoring of students' academic performance in engineering universities in the subject of "Physics". Academic achievement tests are considered to be the most effective instruments to assess the degree of development of competencies cognitive components. In the context of current monitoring, it is difficult to apply tests that fully meet the requirements of pedagogical measurements theory. Therefore, it is recommended to use small sets of test-format tasks. The use of these tasks in each practical and laboratory lesson enhances students' motivation for learning and encourages their independent work.

Keywords: current monitoring of student progress, testing, competencies, tests of academic achievement.

Компетентностный подход и интенсивное внедрение различных педагогических технологий в вузах влекут за собой острую необходимость разработки адекватных методов и средств мониторинга образовательного процесса и оценивания его результатов. В рамках решения проблемы создания педагогического инструментария для контроля процесса формирования компетенций широко используется тестирование.

Метод тестирования имеет многочисленные преимущества, позволяющие повысить качество педагогического контроля и его эффективность. Во-первых, оценивание результатов обучения с помощью тестов повышает объективность контроля: обучающиеся находятся в одинаковых условиях и выполняют стандартизованные задания примерно равной степени сложности, четкие критерии оценивания и однозначно определенные правильность и полнота ответов помогают исключить субъективность преподавателя.

Тестирование, особенно при использовании компьютерных технологий, также сокращает время и усилия преподавателя при проведении контроля и обработке результатов оценивания. Это позволяет сделать применение данного метода контроля более массовым и систематическим, что необходимо для мониторинга учебного процесса в вузе. В настоящее время существует большое количество компьютерных приложений, позволяющих сделать процесс тестирования индивидуальным и адаптированным к испытуемому.

Краткость тестовых заданий, использование заданий различного вида, применение в них различных форм наглядности, а также отсутствие необходимости взаимодействия с преподавателем облегчают, как правило, процедуру контроля для студентов. Тестирование экономит время и усилия студентов, способствует сохранению их устойчивого внимания во время процедур оценивания.

Доступность для обучающихся результатов тестирования и построение рейтингов повышают мотивацию студентов и стимулируют их самостоятельную работу. Прозрачность критериев оценивания, стандартность заданий позволяют обучающимся считать оценивание справедливым и полезным для совершенствования учебной деятельности.

Важным обстоятельством является то, что метод тестирования допускает обоснование достоверности получаемых результатов и представление их в количественной форме. Тестирование позволяет перейти при оценивании от порядковых шкал к интервальным или шкалам отношений и применять в полной мере аппарат математической статистики для обработки результатов. И, наконец, тестирование легко может быть включено в традиционный учебный процесс, не требуя его перестройки.

С другой стороны, многие исследователи и преподаватели вузов считают, что метод тестирования имеет существенные недостатки, ограничивающие его применение для контроля процесса и оценивания результатов формирования компетенций [1, 2]. Тестирование хорошо зарекомендовало себя при оценивании знаний в рамках отдельных дисциплин, в частности естественно-математического цикла [2, 3]. Однако с помощью тестов можно осуществить только проверку способностей применять знания в стандартных и упрощенных ситуациях. В то время как компетенции предполагают готовность применять знания в быстро изменяющихся и зачастую неопределенных условиях профессиональной деятельности, а также требуют творческого применения знаний различных дисциплин для решения профессиональных проблем и приобретения опыта соответствующей деятельности.

Тестирование также не дает возможностей проверить коммуникативные компетенции: речевые навыки, способности логически выстраивать ответы, иллюстрировать свои высказывания примерами, строить доказательства или обоснования и т.п. Все это порождает проблему поиска наиболее адекватных условий применения тестирования для контроля процесса формирования компетенций.

Цель данной статьи состоит в анализе проблемы использования тестирования в текущем контроле успеваемости студентов инженерных вузов по дисциплине «Физика», а также в разработке методических рекомендаций для составления тестовых заданий.

Для мониторинга и оценивания процесса формирования компетенций в вузах инженерного профиля используются психодиагностические тесты и тесты учебных достижений. Психодиагностические тесты применяются для определения личностных характеристик, задатков и психологических качеств студентов, необходимых для выполнения будущей профессиональной деятельности и позволяющих эффективно ее осваивать, а также для определения внутренних причин неудач в освоении компетенций [4]. Применение этого вида тестирования выходит за рамки компетенций преподавателей, ведущих дисциплины естественно-математического цикла. Данные преподаватели обычно используют тесты учебных достижений.

Наиболее эффективными являются тесты учебных достижений, оценивающие степень формирования когнитивных составляющих компетенций, то есть знаний и связанных с ними умений и навыков, на которые опираются осваиваемые компетенции [5, 6]. Для этих результатов обучения имеется возможность оценивания в рамках отдельных учебных дисциплин. Но анализ традиционного применения тестов данного вида показывает, что преподаватели обычно создают их на основе интуитивных представлений без должного анализа характеристик тестов и опоры на методы теории педагогических измерений [7].

Согласно теории педагогических измерений тест – это набор заданий стандартизованного вида, подразумевающих однозначно определенный правильный ответ, при этом данный набор должен обладать необходимыми характеристиками: валидностью, надежностью, размерностью. Валидность теста – это его соответствие тем характеристикам испытуемых, для определения которых он создан, то есть при применении теста мы должны быть уверены, что в результате будут оцениваться характеристики, являющиеся целью оценивания. Это диктуется требованием обоснованности полученных результатов. Валидность тестов, которые используются для итогового оценивания уровня сформированности компетенций студентов и принятия управленческих решений, определяется экспертными комиссиями, состоящими из преподавателей и будущих работодателей или представителей заинтересованных организаций. В ходе текущего контроля при изучении общеобразовательных дисциплин такая сложная проверка валидности тестов обычно не требуется и определение валидности производится преподавателем, ведущим дисциплину, или методической комиссией.

Надежность – это способность теста давать те же результаты при повторном применении. Надежность оценивается апробацией теста на репрезентативной выборке обучающихся и статистической обработкой полученных результатов. Достаточно надежные тесты обычно содержат более двадцати пяти заданий, что в текущем контроле

нецелесообразно из-за ограниченности учебного времени. Кроме того, в условиях реального учебного процесса специальная апробация многочисленных тестов для текущего контроля зачастую невозможна. Выход из данной ситуации представляется в постепенном наборе статистики в условиях применения теста непосредственно в учебном процессе.

Размерность теста или отдельного тестового задания определяет количество характеристик, которые он измеряет. Тесты, предназначенные для определения уровней сформированности компетенций, многомерны вследствие большого числа требований, присущих компетенции. Кроме того, готовность к определенной деятельности характеризуется латентными величинами, то есть не наблюдаемыми непосредственно. Латентной величине может соответствовать различное число референтов (измеряемых величин), и это также увеличивает размерность теста. Многомерность результатов затрудняет представление их испытуемым, которое в текущем контроле должно быть наиболее простым для выполнения мотивирующей функции. Поэтому, на наш взгляд, для текущего контроля предпочтительны тесты, использующие одномерные шкалы результатов.

Таким образом, создание тестов для оценивания когнитивных составляющих компетенций требует значительных усилий и времени преподавателя, а применение готовых тестов нецелесообразно, так как каждый вуз имеет свою специфику обучения и требований к результатам подготовки специалистов. Также часто отсутствует возможность оперативной модификации банка тестовых заданий для решения текущих задач образовательного процесса и адаптации к конкретному контингенту обучающихся.

При изучении курса физики текущий контроль осуществляется в основном на практических и лабораторных занятиях. На практических занятиях тестирование наиболее целесообразно при контроле готовности студентов к занятию, в частности при проверке знания необходимого теоретического материала. Рекомендуется также применять тестирование для контроля отдельных аспектов освоения методики решения задач, например, определения результирующих величин на основе принципа суперпозиции, проецирования уравнений в векторной форме на оси системы координат и т.п.

На лабораторных занятиях с помощью тестирования можно проверять готовность к выполнению лабораторных работ, знание необходимых теоретических законов и определений, устройства и функционирования лабораторной установки, техники безопасности при выполнении эксперимента. В процессе защиты отчета можно проверить знания теории, в особенности найденных или подтвержденных экспериментально зависимостей между физическими величинами, теоретических законов, положенных в основу методики измерений, а также знание некоторых аспектов методологии экспериментального исследования, понимание хода работы и умение анализировать полученные результаты.

Для достижения указанных целей следует применять наборы небольшого числа заданий тестового формата. При этом, так как количество заданий маленькое, следует исключить возможность угадывания правильного ответа. Поэтому наиболее целесообразны следующие формы заданий:

- задания открытого типа, подразумевающие числовой ответ или ответ в виде одного слова или словосочетания;

- задания закрытого типа с выбором правильных ответов, количество которых не фиксировано, из пяти предоставленных вариантов в текстовом или графическом виде;
- задания закрытого типа на установление соответствия.

При этом формы заданий в наборе должны варьироваться для поддержания внимания и мотивации студентов.

Достоинства такого способа тестирования:

- возможность оперативной модификации контрольных материалов и адаптации к конкретному контингенту обучающихся,
- полный охват контролем присутствующих на занятии студентов,
- объективность и доступность результатов контроля непосредственно на текущем занятии,
- обеспечение систематического контроля.

Таким образом, тестирование является эффективным методом мониторинга процесса формирования когнитивных составляющих компетенций и оценивания результатов обучения в рамках отдельных учебных дисциплин. В условиях текущего контроля успеваемости студентов целесообразно и практически реализуемо применение небольших наборов заданий тестового формата. Использование таких наборов на каждом практическом и лабораторном занятии дисциплинирует студентов, стимулирует их самостоятельную работу, повышает мотивацию к учебной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елагина, В.С. Тестовый контроль как средство оценки уровня сформированности компетенций курсантов / В.С. Елагина // Военный научно-практический вестник. – 2016. – № 2 (5). – С. 79-82.
2. Щербаков, В.С. Теоретические и технологические вопросы эффективного применения тестовых технологий диагностики физико-математической подготовки студентов технического вуза / В.С. Щербаков, А.А. Ушаков // Казанский педагогический журнал. – 2009. – № 11-12. – С. 97-105.
3. Медведева, И.Н. Тестовые задания на достаточность данных / И.Н. Медведева, В.В. Фролова // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». – 2018. – № 13. – С. 97-101.
4. Андреева, О.С. Комплексная диагностика компонентов исследовательской компетенции у студентов педагогических направлений подготовки / О.С. Андреева, О.А. Селиванова, И.В. Васильева // Образование и наука. – 2019. – Т. 21. № 1. – С. 37-58.
5. Некрасов, В.П. О формировании и диагностике когнитивных компетенций студентов высшей школы / В.П. Некрасов // Ярославский педагогический вестник. – 2016. – № 1. – С. 27-32.
6. Бакланов, И.О. Диагностика формирования компетенций в лабораторных практикумах естественно-научных дисциплин / И.О. Бакланов, И.П. Бирюкова / Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 8. – С. 113-119.

7. Драчук, Л.А. Тестирование как рациональное средство диагностики качества обучения / Л.А. Драчук, П.Э. Драчук, М.В. Пешикова // Педиатрический вестник Южного Урала. – 2017. – № 2. – С. 40-47.

REFERENCES

1. Elagina, V.S. Test control as a means of assessing the level of competence formation of cadets / V.S. Elagina // Military Scientific and Practical Bulletin. – 2016. – № 2 (5). – P. 79-82.
2. Shcherbakov, V.S. Theoretical and technological issues of effective application of test technologies for diagnostics of physico-mathematical training of technical university students / V.S. Shcherbakov, A.A. Ushakov // Kazan Pedagogical Journal. – 2009. – No. 11-12. – P. 97-105.
3. Medvedeva, I.N. Test tasks for data sufficiency / I.N. Medvedeva, V.V. Frolova // Bulletin of Pskov State University. The series "Natural and physico-mathematical sciences". – 2018. – No. 13. – P. 97-101.
4. Andreeva, O.S. Comprehensive diagnostics of the components of research competence in students of pedagogical training areas / O.S. Andreeva, O.A. Selivanova, I.V. Vasilyeva // Education and Science. – 2019. – Vol. 21. No. 1. – P. 37-58.
5. Nekrasov, V.P. On the formation and diagnosis of cognitive competencies of higher school students / V.P. Nekrasov // Yaroslavl Pedagogical Bulletin. – 2016. – No. 1. – P. 27-32.
6. Baklanov, I.O. Diagnostics of competence formation in laboratory practices of natural science disciplines / I.O. Baklanov, I.P. Biryukova / Modern high-tech technologies. – 2020. – No. 8. – P. 113-119.
7. Drachuk, L.A. Testing as a rational means of diagnosing the quality of education / L.A. Drachuk, P.E. Drachuk, M.V. Peshikova // Pediatric Bulletin of the Southern Urals. – 2017. – No. 2. – P. 40-47.

ФОРМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ СВЯЗЕЙ В РАМКАХ ПРЕПОДАВАНИЯ ОБЩЕПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН

FORMS AND DIRECTIONS OF IMPLEMENTATION OF INTERDISCIPLINARY CONNECTIONS IN THE FRAMEWORK OF TEACHING GENERAL PROFESSIONAL DISCIPLINES

Платонова М.А., кандидат технических наук, доцент, АНОО ВО «Воронежский институт высоких технологий», Воронеж, Россия

Platonova M.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

Платонов А.А., кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Platonov A.A., PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. Современной тенденцией совершенствования учебного процесса является расширение междисциплинарных связей преподаваемых в вузах дисциплин технической направленности. В статье на примере дисциплины «Теория механизмов и детали машин» рассматриваются особенности формирования и последующей реализации междисциплинарных связей как с дисциплинами технического, так и гуманитарного цикла, для обеспечения которой отмечаются практические рекомендации при планировании учебного процесса.

Ключевые слова: дисциплины, взаимосвязь, реализация, направление, эффективность.

Abstract. A modern trend in improving the educational process is the expansion of interdisciplinary links between technical disciplines taught at universities. In the article, using the example of the discipline «Theory of Mechanisms and Machine Parts», the features of the formation and subsequent implementation of interdisciplinary links with both technical and humanitarian disciplines are considered, for the provision of which practical recommendations for planning the educational process are noted.

Keywords: disciplines, interrelation, implementation, direction, efficiency.

В современной российской действительности всё более и более востребованным среди молодых людей становится получение ими высшего технического образования. При этом независимо от того, получают ли они указанное образование в обычном гражданском или военном специализированном вузе, особое значение для процесса обучения приобретают междисциплинарные связи [1, 2], которые позволяют формировать у обучающихся (студентов, курсантов) целостное представление об их будущей профессиональной

деятельности при готовности к решению практических задач в условиях быстро меняющихся технологий.

Одной из проблем современного высшего образования продолжает оставаться приверженность целого ряда преподавателей традиционному (в чем-то – догматическому) подходу, при котором они просто транслируют требуемую по тематическому плану информацию, не раскрывая ее взаимосвязь с другими дисциплинами как предшествующего, так и последующего цикла. В результате обучающийся лишен возможности увидеть целостную картину накопленных предыдущими поколениями знаний как в изучаемой, так и в смежных дисциплинах, где преподавание ведется также в узких рамках тематического плана. Усугубляется данная ситуация тем, что в военных вузах обучающийся вдобавок лишен доступа к мировой информационно-коммуникационной сети, результатом чего является невозможность расширения кругозора обучающегося по конкретной дисциплине. Современной тенденцией совершенствования учебного процесса является как раз расширение междисциплинарных связей преподаваемых в вузах дисциплин технической направленности [3], одной из которых является «Теория механизмов и детали машин», преподаваемая обучающимся в ВУНЦ ВВС ВВА на ряде специальностей 2 и 3 курса.

Дисциплина «Теория механизмов и детали машин» (ТМДМ) занимает важное место в системе подготовки технических специалистов как военной, так и гражданской направленности, так как объединяет теоретические знания, приобретенные обучающимися в том числе при изучении предшествующих дисциплин, с практическими навыками, полученными в том числе как в школе, так и в целом в жизни.

Междисциплинарные связи в рамках дисциплины «Теория механизмов и детали машин» представляют собой взаимосвязь с дисциплинами технического цикла (материаловедение, сопротивление материалов, теоретическая механика и др.), общепрофессионального цикла (инженерная графика, компьютерная графика), а также общеобразовательного цикла. К последним относится прежде всего математика, без владения которой обучающимися невозможно выполнение современных вычислительных операций (в том числе – даже в рамках предлагаемых практических и лабораторных работ). Однако при формировании междисциплинарных связей не стоит забывать и про историю, в глубине веков которой можно найти как примеры интересных машин и механизмов, способных показать значимость дисциплины ТМДМ, так и великих изобретателей, чьими именами гордится как человечество в целом, так и Россия в частности.

К формам реализации междисциплинарных связей относятся консолидация лекционного материала по истории развития машиностроения с обязательными отсылками к современным требованиям по качеству разрабатываемых машин и механизмов. Целесообразно выполнять демонстрацию эволюции технических решений через призму графических изображений, в том числе – посредством создания динамических презентаций. Как показывает опыт преподавания, динамичность изображений привлекает внимание современных обучающихся к преподаваемому материалу, способствуя лучшему освоению материала. Однако, если обучающийся категорически не заинтересован в получении знаний, никакая динамика подаваемого материала не способна вложить в него требуемый уровень знаний.

Также к формам реализации междисциплинарных связей относится формирование практических заданий, основанных на реальных исходных данных, поставляемых сотрудничающими в данной области кафедрами. Перспективным также является работа на практических занятиях с реальными конструкторскими документами, однако здесь возможны нюансы, заключающиеся в необходимости сохранения как коммерческой, так и иного вида тайны.

В рамках выполнения графических заданий целесообразно сопровождать выполнение эскизов деталей с учётом их функционального назначения. Если это достаточно распространенные изделия, то преподавателю вполне хватит имеющегося у него уровня знаний. Если же в рамках преподаваемой дисциплины предлагается проектирование и вычерчивание специализированного изделия, то преподавателю желательно изучить специализированную терминологию и владеть хотя бы основной информацией о сути и назначении таких изделий.

В зависимости от количества аудиторных часов, выделенных на изучение дисциплины, тематическим планом может быть предусмотрено выполнение комплексных чертежей с учетом требований различных нормативных документов. При этом задействование междисциплинарных связей с кафедрами, не относящимися к общепрофессиональным, позволит более эффективно и на современном уровне осуществлять моделирование наиболее распространенных деталей и узлов в отечественных CAD-системах. Это позволит обучающемуся путем развития пространственного мышления более углубленно подготовиться к изучению специальных дисциплин. Кроме того, при выполнении чертежей в традиционном (бумажном) или компьютерном вариантах целесообразно интегрировать полученные или вновь осваиваемые обучающимся знания из области материаловедения и общего машиностроения. В частности, связь истории развития машиностроения с современными требованиями к конструкциям обычных и специализированных транспортных средств позволяет более глубоко освоить рассматриваемую в качестве примера техническую дисциплину.

При формировании междисциплинарных связей целесообразно рассматривать следующие основные направления их реализации:

а) теоретическое направление – рассматривается эволюция технических решений различных машин и механизмов в историческом контексте. Производится краткий анализ конструктивных особенностей предшественников современных машин и механизмов, обращается внимание на взаимосвязь между формой детали и ее функциональным назначением. В качестве примеров могут быть использованы древнеримские катапульты, средневековые арбалеты, в конструкции которых применялись натяжные устройства различного вида, а также рычажные механизмы полуавтоматического привода.

б) практическое направление – концепция формирования и развития связей между дисциплинами технической и гуманитарной направленности предусматривает выработку для обучающихся некоторых практических рекомендаций. В частности, при выполнении различных схем и чертежей обучающиеся вспоминают (освещаемые им обычно на первом курсе по дисциплине «Инженерная графика») основные правила выполнения чертежей и схем, предусмотренные различными нормативными документами. При выполнении расчетов

нередко им приходится переводить одни единицы измерения в другие, применяя при этом кратные и дольные множители, добавляя или наоборот убирая различные переводные коэффициенты « 10^3 », « 10^6 », «3600» и т.д., что нередко преподается на занятиях по дисциплине «Метрология». Используя знания из разных областей, обучающиеся приходят к положительному результату решения той или иной задачи, связанной, например, с выяснением прочностных характеристик резьбового соединения или тихоходного вала редуктора.

При самостоятельной работе по рассматриваемому предмету обучающиеся нередко изучают дополнительную литературу, связанную с процессом производства той или иной детали, рассматривая при этом, например, технологический процесс повышения твердости поверхностного слоя или увеличения коррозионной стойкости всей конструкции, что попутно позволит увеличить обучающемуся «багаж знаний» по дисциплине «Материаловедение».

При выполнении практических упражнений одним из элементов, способствующих развитию творческого мышления обучающихся, является задание, нацеленное на создание собственной конструкции изделия. Для создаваемого обучающимся изделия варьируется его назначение (целый комплекс дисциплин), материал («Материаловедение»), нагрузка («Техническая механика»), требования к шероховатости поверхности («Технологии»), конечное качество («Сертификация»). При этом концептуальный подход к междисциплинарным связям позволяет интерпретировать полученную конструкцию как к изделиям самого общего назначения, так и специальным изделиям.

Рассмотренные формы и направления реализации междисциплинарных связей позволяют более тщательно, углубленно и надежно осуществлять формирование у обучающихся требуемых профессиональных компетенций, к которым относятся умение применять знания из различных дисциплин при решении стоящих перед выпускником инженерных задач, способность анализировать современные конструкции машин и механизмов, разрабатывая к ним (или к новым машинам и механизмам) соответствующую конструкторскую документацию.

Для реализации междисциплинарных связей при планировании учебного процесса [4] крайне необходимо соблюдение таких несложных практических рекомендаций, как учет взаимосвязи различных дисциплин смежного (технического или иного) профиля с применением современных образовательных технологий и обеспечением последних не только мультимедийным, но и иным оборудованием по запросу кафедры. Перспективным также является проведение лабораторных работ с элементами других дисциплин, в том числе использование виртуальных лабораторий. Что касается организации практических и лабораторных занятий на производстве, то такая форма обучения нередко практиковалась ранее, однако в современных условиях (в том числе для обучающихся в военном вузе) она представляется трудно осуществимой.

К сложностям реализации междисциплинарных связей для дисциплины ТМДМ относится, например, то, что они должны быть предусмотрены в контексте их развития от простого к сложному. К сожалению, нередко бывает наоборот, и в этих случаях трудно ждать от обучающихся (даже среднего уровня их развития) каких-либо больших успехов. В частности, и в военных, и в гражданских вузах сплошь и рядом встречается параллельное

изучение дисциплин «Сопротивление материалов» и «Детали машин» (как вариант – ТМДМ). Основопологающим определением в сопротивлении материалов является понятие о напряжении, возникающем в материалах конструкции. В случае параллельного (или, ещё хуже вариант – опережающего) изучения дисциплины ТМДМ преподавателю невольно приходится отклоняться от тематического плана, разъясняя обучающимся суть возникновения и основы расчета напряжений. Такое отклонение от тематического плана не приветствуется с точки зрения методического сопровождения дисциплины, тем не менее является необходимостью коррекции периодически возникающего перекоса в междисциплинарных связях общепрофессиональных дисциплин.

Тем не менее, реализация междисциплинарных связей в образовательном процессе дисциплины «Теория механизмов и детали машин» способствует усилению практической направленности обучения, повышению качества подготовки специалистов путем формирования у них профессиональных компетенций требуемой области, развитию системного технически направленного и в тоже время разностороннего мышления [5].

Таким образом, современная образовательная практика подтверждает, что междисциплинарные связи выступают как конкретная реализация интеграционных процессов, происходящих в научном и социальном контекстах. Они играют ключевую роль в формировании у обучающихся как практических навыков, так и глубокого научно-теоретического понимания, акцентируя внимание на развитии обобщенного подхода к познанию. Эта обобщенность позволяет эффективно применять полученные знания и умения при анализе конкретных ситуаций и решении частных задач как в рамках учебного процесса, так и в будущей профессиональной и общественной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лободенко, Е.И. Развитие междисциплинарных связей при подготовке инженеров в условиях модернизации высшего профессионального образования / Е.И. Лободенко, Н.В. Рыдалина // Проблемы инженерного и социально-экономического образования в техническом вузе в условиях модернизации высшего образования: материалы I Международной научно-практической конференции, Тюмень, 28 марта 2017 года. Том 1. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 212-214.

2. Ищенко, Р.В. Междисциплинарные связи в учебном процессе в техническом вузе / Р.В. Ищенко, Д.А. Костырева // Математические методы и модели в управлении, экономике и социологии: сборник научных трудов / Ответственные редакторы О.М. Барбаков, Ю.А. Зобнин. Том Выпуск 11. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 98-101.

3. Нежелской, А.Н. Междисциплинарные связи в образовательной деятельности военного вуза / А.Н. Нежелской // Исследование различных направлений развития психологии и педагогики: сборник статей международной научно-практической конференции: в 3 частях, Оренбург, 13 апреля 2017 года. Том Часть 2. – Оренбург: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2017. – С. 126-130.

4. Арбатский, Е.В. Технология разработки учебных планов вуза с учетом междисциплинарных связей / Е.В. Арбатский, Н.А. Воробьева, С.И. Носков //

Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2009. – № 7. – С. 140-146.

5. Воронина, Ю.В. Роль междисциплинарных связей в обеспечении качества образовательного процесса / Ю.В. Воронина, М.А. Мотовилов // Компетентностный подход в оценке качества высшего и среднего профессионального образования: материалы 59-ой межвузовской научно-методической конференции, Новосибирск, 02 марта 2018 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2018. – С. 251-253.

REFERENCES

1. Lobodenko, E.I. Development of interdisciplinary relations in the training of engineers in the context of modernization of higher professional education / E.I. Lobodenko, N.V. Rydalina // Problems of engineering and socio-economic education in a technical university in the context of modernization of higher education: materials of the I International Scientific and Practical Conference, Tyumen, March 28, 2017. Volume 1. – Tyumen: Tyumen Industrial University, 2017. – P. 212-214.

2. Ishchenko, R.V. Interdisciplinary connections in the educational process at a technical university / R.V. Ishchenko, D.A. Kostyeva // Mathematical methods and models in management, economics and sociology: a collection of scientific papers / Responsible editors O.M. Barbakov, Yu.A. Zobnin. Volume 11. – Tyumen: Tyumen Industrial University, 2018. – P. 98-101.

3. Nezhelskoy, A.N. Interdisciplinary connections in the educational activities of a military university / A.N. Nezhelskoy // Research of various directions in the development of psychology and pedagogy: collection of articles of the international scientific and practical conference: in 3 parts, Orenburg, April 13, 2017. – Volume Part 2. – Orenburg: Aeterna Limited Liability Company, 2017. – P. 126-130.

4. Arbatsky, E.V. Technology of developing university curricula taking into account interdisciplinary connections / E.V. Arbatsky, N.A. Vorobyeva, S.I. Noskov // Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems. – 2009. – No. 7. – P. 140-146.

5. Voronina, Yu.V. The role of interdisciplinary connections in ensuring the quality of the educational process / Yu.V. Voronina, M.A. Motovilov // Competence-based approach in assessing the quality of higher and secondary vocational education: materials of the 59th Interuniversity Scientific and Methodological Conference, Novosibirsk, March 02, 2018. – Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2018. – P. 251-253.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ

APPLICATION OF SOFT COMPUTING TECHNOLOGY TO ASSESS STUDENT PERFORMANCE

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Агафонова М.В., преподаватель СПО ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Agafonova M.V., College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье предлагается использовать нечёткие множества для разработки методики определения уровня формирования запланированных компетенций у студентов высшего учебного заведения по данным модульно-рейтинговой системы оценки успеваемости. В результате проведенных исследований выяснилось, что применение формализованного моделирования расширяет возможности оценки успеваемости студентов с учётом их намерений и особенностей организации учебного процесса.

Ключевые слова: формализованное моделирование, функции принадлежности, нечёткие множества, требуемые компетенции, успеваемость.

Abstract. The article proposes to use fuzzy sets to develop a methodology for determining the level of formation of planned competencies in students of a higher educational institution based on the data of a modular-rating system for assessing academic performance. As a result of the conducted research, it was found that the use of formalized modeling expands the possibilities for assessing students' academic performance, taking into account their intentions and the specifics of the organization of the educational process.

Keywords: formalized modeling, membership functions, fuzzy sets, required competencies, academic performance.

Оценка успеваемости студента является системной проблемой, поскольку отличается многоаспектностью, вызывает конфликты, постоянно изменяется, отвечая на требования

рынка труда и профессионального сообщества, а в некоторых ситуациях практически не требуется. В текущий момент соответствие квалификации выпускника высшего учебного заведения уровню бакалавра или магистра определяется степенью формирования компетенций, гарантирующей способность принимать обоснованные решения в реальных ситуациях [1, 2] с использованием широкого спектра методов систематизации доступной информации. Например, одна из общепрофессиональных компетенций (ОПК-1) формулируется так: «Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности». Для всех направлений подготовки бакалавров и специалистов обязательна универсальная компетенция (УК-1) – «Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий». Следовательно, в процессе выполнения учебного плана по выбранной специальности или направлению подготовки студент вырабатывает свою уникальную технологию принятия обоснованного решения проблемной ситуации, характерной для его будущей профессиональной деятельности. С другой стороны, его успеваемость может быть определена преподавателем по степени успешности выполнения заданий, наиболее приближенных к профессиональным задачам (например, кейс-заданий [3, 4]). При этом необходимо понимать, что уникальная технология формируется в процессе обучения в результате овладения широкой сферой способов разрешения различных проблем, методов моделирования процессов и ситуаций и навыков использования технических и программных средств, осуществляется путем накопления опыта успешного применения научных знаний при поиске решения стандартных задач. В системном анализе проект решения сложной противоречивой проблемы всегда представляет собой иерархическую структуру (дерево целей и задач), базовый уровень которой состоит из задач, имеющих однозначное решение в рамках требуемых критериев эффективности проекта в целом [5]. Таким образом, при оценке успеваемости студента необходимо учитывать уникальность технологии принятия решения каждого студента (намерения выполнить учебный план), доступные преподавателю средства оценивания и особенности текущей ситуации.

Цель данной работы – продемонстрировать возможности применения нечетких множеств для оценки успеваемости студентов. В отличие от традиционного математического подхода, использующего однозначно определенные операции синтаксиса формульных соотношений и преобразований, такие мягкие вычислительные процедуры, как нечеткие множества, оперируют понятиями, более приближенными к естественным конструкциям описания ситуаций. Вместе с тем, для конструирования соотношений в них используется синтаксис, близкий к математическим моделям.

По определению, нечетким множеством A , заданном на совокупности элементов x , называется множество упорядоченных пар $A = \{\mu_A(x), x\}$, составленных из элементов x и их функций принадлежности $\mu_A(x)$ [6-8]. Методы построения функций принадлежности определяются трактовкой и обычно задаются числами на интервале $[a, b]$. Наиболее часто используемыми являются линейные, треугольные, трапециевидные, гауссовские и колоколообразные зависимости. В применении к решаемой в данной работе проблеме можно понимать успеваемость студентов как долю выполнения заданий индивидуального плана к

концу отчетного периода (семестра). Неоднозначность исследуемой ситуации, по нашему мнению, состоит в том, что на этот параметр оказывают влияния следующие обстоятельства. Во-первых, в рамках компетентностного подхода студент, в принципе, волен сам определять количество заданий, необходимое для уверенности в своей способности применить усвоенную им информацию в своей профессиональной деятельности. С другой стороны, преподаватель может оценить степень формирования компетенции, в принципе, только по успеваемости студента. Кроме того, усвоение дисциплины не является единственной целью обучающихся, поэтому они выделяют на учебный процесс ограниченное количество времени, а преподаватели, согласно нормативам, проводят групповые занятия (на одного преподавателя должно приходиться 12 студентов). Поэтому рассмотрим более конкретную ситуацию.

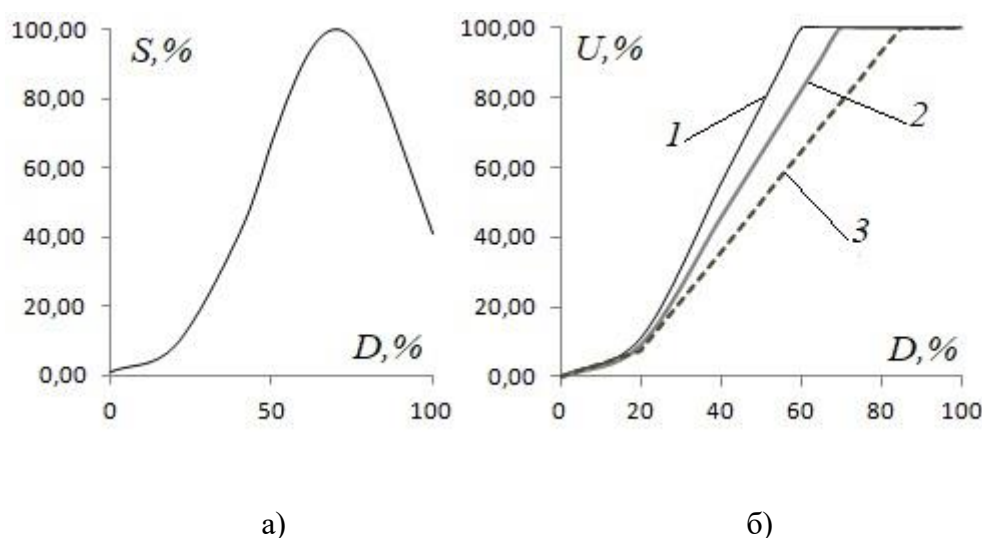


Рисунок 1 – Функции принадлежности для моделирования намерений студентов (а) и принципов оценки успеваемости преподавателем (б)

В рамках стохастической модели, представления студентов о достаточности выполнения учебного плана определяются гауссовской функцией принадлежности $S(D)$:

$$S(D) = e^{-0.5 \frac{(D-c)^2}{s^2}}, \quad (1)$$

где D – доля выполнения заданий по дисциплине в соответствии с рабочим планом преподавателя; c – достаточная, по мнению студентов, для гарантированного уровня итоговой аттестации величина D ; s – параметр, характеризующий неоднозначность выбора c в группе обучающихся. Например, для аттестации по текущей успеваемости, согласно модульно-рейтинговой системе [9], студенту достаточно выполнить 70 % заданий преподавателя. Тогда представление о необходимости выполнении учебного плана $S(D)$ достигнет максимума при $c = 70 \%$, а затем начнет уменьшаться в соответствии с (1) (см. Рис. 1а). Таким образом, в базовой модели оценки успеваемости студентов учтены их намерения по выбору степени заинтересованности в изучении дисциплины. В данном примере рассматривается достаточно заинтересованная группа, поскольку намерение выполнить все задания составляет 40 % от списочного состава студентов. С другой стороны, осознавая обстоятельства организации

учебного процесса (групповые занятия), преподаватели тоже оценивают в процессе общения уровень формирования компетенции, ориентируясь на необходимость выполнения минимального количества заданий. Поэтому их ожидания целесообразно моделировать с помощью линейной функции принадлежности:

$$U(x) = \begin{cases} 0, D \leq a \\ (D - a)/(b - a), a < D \leq b \\ 1, D > b \end{cases} \quad (2)$$

где a – параметр характеризующий, процент выполнения, соответствующий тому факту, что студент приступил к обучению (например, выполнил 15 % заданий по дисциплине и посетил соответствующее количество занятий); b – достаточная доля выполнения учебного плана для положительной аттестации студента. В зависимости от уровня освоения дисциплины (базовый, продвинутый или средний) в рамках компетентного подхода преподаватель ожидает, что доля выполненных заданий составит 60 %, 70 % или 85 % (кривые 1, 2 и 3 на Рис. 1б, соответственно). В результате необходимости учёта влияния на успеваемость ожиданий студента и преподавателя, распределение вероятности выполнения рабочего плана дисциплины можно моделировать, как

$$F(D) = S(D) \cdot U(D). \quad (3)$$

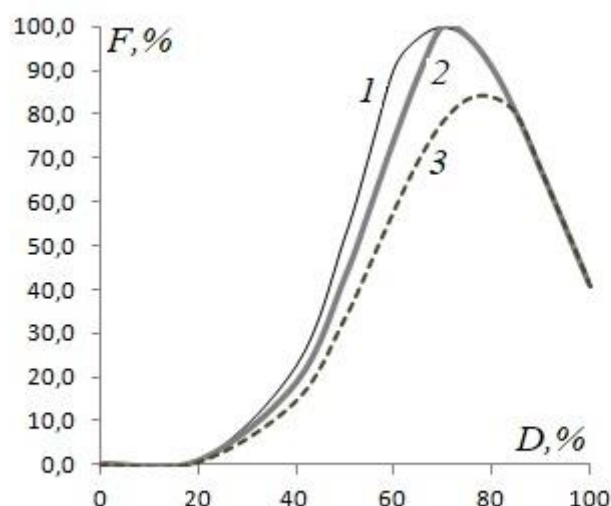


Рисунок 2 – Результаты вычислительного эксперимента

Модель была реализована с помощью электронных таблиц. Результаты вычислительного эксперимента приведены на рисунке 2. Анализ полученных данных позволяет оценить успеваемость студента очень просто. Если для успешной аттестации по контрольным оценочным материалам достаточно выполнить 65 % тестовых заданий, то успевающим студентам для базового уровня необходимо выполнить более 52 %, для продвинутого – более 62 % рабочего плана преподавателя.

В заключение хотелось бы заметить, что предложенный подход позволяет оценивать успеваемость студентов с учётом обстоятельств организации учебного процесса, намерений студентов и представлений преподавателя. Интересным оказался тот факт, что на вероятность

полного выполнения всех заданий влияет только намерения студентов, а жёсткость требований преподавателя определяет только минимальную величину степени выполнения рабочего плана дисциплины и максимум в распределении вероятности $F(D)$. Таким образом, аппарат нечётких множеств позволяет разработать методику оценки успеваемости студента по данным модульно-рейтинговой системы в соответствии с требованиями формирования требуемых компетенций с учетом обстоятельств протекания учебного процесса и мотивации обучающихся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу о применении тестирования при проверке качества образования / Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова, А.А. Полумиско, К.А. Уварова, А.М. Хворых // Современные технологии непрерывного обучения школа – вуз : Материалы X Всероссийской научно-методической конференции, Воронеж, 21 марта 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2023. – С. 97-98.
2. Авдашкин, А.А. Подходы к определению понятия "качество образования" / А.А. Авдашкин, А.А. Пасс // Научно-методическое обеспечение оценки качества образования. – 2018. – № 2 (5). – С. 21-26.
3. Лузан Е. Н. Кейс как образовательная технология/ Е. Н. Лузан // Вестник БГУ. – 2012. – № 1 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/keys-kak-obrazovatel'naya-tehnologiya> (дата обращения: 12.04.2025).
4. Андруник, А.П. Применение кейс-метода в образовательном процессе / А.П. Андруник, А.В. Бирик // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2017. – № 3 (75). – С. 144-146.
5. Новосельцев, В.И. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.
6. Шведов, А.С. О нечетких множествах типа 2 и нечетких системах типа 2 / А.С. Шведов // Итоги науки и техники. Серия «Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры». – 2019. – Том 165. – С. 114-122.
7. Чернов, В.Г. Нечеткие множества. Основы теории и применения : учеб. пособие / В.Г. Чернов ; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2018. – 156 с.
8. Басков, О.В. Нечеткие множества второго порядка и их применение в принятии решений. Общие понятия / О.В. Басков, В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – № 1. – С. 3-14.
9. Модульно-рейтинговая система аттестации и контроль качества обучения студентов / Н.Н. Матвеев, В.И. Лисицын, Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Проблемы высшего образования. – 2015. – № 3. – С. 28-33.

REFERENCES

1. On the use of testing in assessing the quality of education / N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova, A.A. Polumisko, K.A. Uvarova, A.M. Khvorykh // Modern technologies of continuous learning school - university: Proceedings of the X All-Russian scientific and methodological conference, Voronezh, March 21, 2023. – Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2023. – P. 97-98.
2. Avdashkin, A.A. Approaches to defining the concept of "quality of education" / A.A. Avdashkin, A.A. Pass // Scientific and methodological support for assessing the quality of education. – 2018. – No. 2 (5). – P. 21-26.
3. Luzan E.N. Case as an educational technology / E.N. Luzan // Bulletin of BSU. – 2012. – No. 1 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/keys-kak-obrazovatel'naya-tehnologiya> (дата обращения: 12.04.2025).
4. Andrunik, A.P. Application of the case method in the educational process / A.P. Andrunik, A.V. Bibik // Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia. – 2017. – No. 3 (75). – P. 144-146.
5. Novosel'tsev, V.I. Theoretical foundations of system analysis / V.I. Novosel'tsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by V.I. Novosel'tsev. – Moscow: Major, 2006. – 592 p.
6. Shvedov, A.S. On fuzzy sets of type 2 and fuzzy systems of type 2 / A.S. Shvedov // Results of science and technology. Series "Modern Mathematics and its Applications. Thematic reviews". – 2019. – Vol. 165. – P. 114-122.
7. Chernov, V.G. Fuzzy sets. Fundamentals of theory and application: textbook / V.G. Chernov; Vladimir. state University named after A.G. and N.G. Stoletovs. – Vladimir: VLSU Publishing House, 2018. – 156 p.
8. Baskov, O.V. Second-order fuzzy sets and their application in decision making. General concepts / O.V. Baskov, V.D. Nogin // Artificial intelligence and decision making. – 2021. – No. 1. – P. 3-14.
9. Modular-rating system of certification and quality control of student education / N.N. Matveev, V.I. Lisitsyn, N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova // Bulletin of Voronezh State University. Series: Problems of Higher Education. – 2015. – No. 3. – P. 28-33.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЛИЧНОСТЬ

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN EDUCATION AND THEIR IMPACT ON PERSONALITY

Фесикова О.В., кандидат философских наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Fesikova O.V., PhD in Philosophy, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Мазур А.А., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Mazur A.A., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются различные виды инноваций в образовании, включая предметные, общепедагогические, управленческие и мировоззренческие. Описываются методы, такие как игровые методики, персонализированное обучение, проектно-исследовательский метод и дистанционное обучение, которые способствуют активному вовлечению учащихся в процесс обучения. Так же авторы выделяют положительные воздействия инновационных технологий на мотивацию и психологическую среду, в которой обучаются студенты.

Ключевые слова: инновации, современные технологии, образовательный процесс.

Abstract. The article examines various types of innovations in education, including subject-specific, general pedagogical, managerial, and ideological. It describes methods such as game-based methods, personalized learning, project-based research, and distance learning that promote active involvement of students in the learning process. The authors also highlight the positive impact of innovative technologies on motivation and the psychological environment in which students study.

Keywords: innovations, modern technologies, educational process.

Первые в истории образовательные системы появились в Древней Греции и Древнем Риме. Уже тогда дети обучались письму, чтению, математике и иным наукам [1]. Крайне важно отметить, что изначально и долгое время после образование не являлось чем-то общедоступным, ведь возможность учиться имели только материально обеспеченные люди, занимающие определенное социальное положение в обществе. Только спустя тысячелетия развития человечества, в конце XVIII в., появилось понятие бесплатного образования. И вот спустя еще чуть более 200 лет образование не просто доступно всем, а является обязательной частью жизни практически каждого ребенка или молодого человека. Однако решение проблемы доступности образования создало новую – как сделать обучение понятным и интересным для всех?

В эпоху современной трансформации образовательной системы приоритеты и задачи, стоящие перед образованием, претерпевают значительные изменения. Фокус смещается от простого накопления знаний к развитию ключевых компетентностей. Внедрение компетентного подхода в образовательный процесс началось давно, но обрело особую актуальность, именно сейчас [2]. Система формирования ключевых компетенций охватывает коммуникативную составляющую и развитие социальных навыков. На практике это проявляется в совершенствовании умений эффективно и гармонично взаимодействовать с другими, способности ориентироваться и действовать в различных социальных контекстах, готовности принимать ответственность за свои решения, развитии навыков коллективной работы, стремлении к определению личных целей. Также такая методика способствует формированию толерантности и умению жить в мире и согласии с представителями разных культур, языков и религий.

Таким образом, рассматривая обобщенно современную систему образования, можно сказать, что в виду глобальных социальных изменений у нее появились новые, постепенно внедряемые цели и задачи. А как известно задачи образования – это задачи учителей и педагогов, а новые задачи требуют новых решений. Именно поэтому все большее значение для педагогики сейчас обретают инновационные технологии.

Инновация от латинского «*novato*» значит «обновление», а использование и значение слова «технология» систематизировал в 19 в. профессор Гарвардского университета (США) Дж. Бигелоу в своей работе «*Elements of Technology*» («Элементы технологии»)» [3], подчеркивая глубокую взаимосвязь между ремеслом, искусством и наукой. Иными словами, инновационные технологии – есть переосмысление и привнесение новшеств в науку, искусство и различные сферы деятельности, включая педагогику.

Внедрение инновационных технологий в образовательный процесс опирается на основополагающие принципы обучения, включающие в себя необходимые условия и намеченные цели, служащие базисом для прогресса. Инновации в образовании, как правило, соответствуют текущей социально-экономической ситуации в обществе. В настоящее время приоритет отдается развитию у учащихся навыков самостоятельной работы, формированию умений самостоятельно учиться и совершенствоваться, а также осознанному усвоению учебных материалов. Инновационная деятельность в образовательном контексте представляет собой структурированный набор взаимосвязанных научных, технологических, организационных и методических мероприятий, ориентированных на модернизацию существующих образовательных практик. Основная цель таких мероприятий заключается в усовершенствовании учебного процесса путем внедрения современных подходов и разработок, отвечающих текущим запросам общества и экономики [4].

Рассмотрим основные виды инноваций.

Образовательные инновации предметной направленности представляют собой комплекс методологических преобразований, разработанных с учетом специфики отдельных дисциплин. Данные трансформации затрагивают базовые принципы организации учебного процесса в рамках определенных областей научного знания. Они отличаются высокой степенью специализации и направлены на оптимизацию процесса передачи и усвоения узкопрофильных знаний и умений. Такие инновационные преобразования учитывают

эпистемологические особенности конкретных предметных областей, обеспечивая более эффективное достижение образовательных результатов.

Общепедагогические инновационные технологии представляют собой универсальные образовательные стратегии, применимые в преподавании любых дисциплин. В отличие от предметно-ориентированных новшеств, эти технологии не ограничены рамками конкретных областей знания [5].

Управленческие инновации в образовательной сфере представляют собой комплекс стратегических инициатив и административных преобразований, реализуемых руководящими структурами образовательных организаций.

Мировоззренческие инновации в образовательной сфере представляют собой фундаментальные концептуальные сдвиги, формирующиеся под влиянием эволюционирующих социальных парадигм и актуальных вызовов современности. Инновационный компонент образовательной деятельности направлен на создание, экспериментальную проверку и интеграцию прогрессивных педагогических подходов в учебный процесс. Образовательные организации через свои педагогические коллективы формулируют приоритетные образовательные задачи, для решения которых разрабатываются и внедряются инновационные методические инструменты. Образовательная среда успешно интегрирует ряд проверенных временем инновационных методик, доказавших свою высокую результативность. Среди ключевых эффективных инновационных решений, получивших широкое практическое применение, выделяются:

Образовательная игрофикация. Представляет собой эффективный педагогический инструмент, успешно применяемый на различных ступенях образования. Внедрение игровых элементов в учебный процесс трансформирует традиционные форматы обучения, придавая им динамичность и привлекательность для учащихся [3].

Персонализированный подход к обучению. Реализуется через систему элективных курсов, позволяющих учащимся развивать уникальные способности и следовать индивидуальным интересам. Данная методика содействует более осознанному профессиональному самоопределению, помогая учащимся четче артикулировать личностные цели и формировать оптимальную траекторию карьерного развития [6].

Современные образовательные технологии здоровьесбережения. Фокусируются на поддержании физического и психологического благополучия обучающихся. Несмотря на интенсивную цифровизацию образования, сохранение здоровья продолжает оставаться приоритетной задачей, требующей системных решений по минимизации негативного воздействия учебных нагрузок [7].

Активный подход к освоению знаний через проектно-исследовательскую деятельность. Предполагает самостоятельный сбор, систематизацию и интерпретацию информации учащимися. Данная методика особенно эффективна при изучении информационных технологий и иностранных языков. Формирует углубленное понимание предмета и развивает критическое мышление.

Блочно-модульный подход. Акцентирует автономную работу обучающихся, включающую разработку визуальных материалов и реализацию творческих инициатив. Эта методика развивает комплекс информационно-поисковых и аналитических компетенций, способствуя как академическому прогрессу, так и личностному становлению учащихся.

Модульное обучение. Структурирование образовательного процесса на основе модульных единиц предполагает комбинирование обязательных и вариативных компонентов. Учебный материал представляется в форме концентрированных опорных конспектов, отличающихся научной обоснованностью, лаконичностью и визуальной наглядностью. Модульное обучение ориентировано на формирование навыков самостоятельного познания и сознательного целеполагания [7].

Электронное интерактивное обучение. Современные сетевые технологии выступают эффективным инструментом передачи знаний, мониторинга и оценки образовательных результатов. Арсенал электронных образовательных ресурсов включает интерактивные учебные материалы, цифровые библиотечные системы, коммуникационные платформы и средства видеоконференцсвязи [7].

Дистанционное обучение. Реализуется посредством технологических платформ, обеспечивающих взаимодействие между преподавателями, учащимися и информационными ресурсами. Коммуникационная инфраструктура дистанционного образования базируется на разнообразных цифровых каналах, включая электронную почту, аудио- и видеоконференции, компьютерные форумы [8].

К положительным факторам воздействия инновационных технологий на образовательный процесс и учащихся можно отнести:

1. Стимулирование мотивации и заинтересованности учащихся в образовательном процессе.
2. Применение подобных подходов формирует благоприятную психологическую среду для обучающихся и устраняет преграды в коммуникации с преподавателем.
3. Увеличение поля для творчества, дающее возможность взглянуть на задачу не только прагматично и с точки зрения логики, но и креативно, что приводит к увеличению числа уникальных, выдающихся работ.
4. Внедрение информационных технологий мотивирует не только учеников, но и в большей степени вовлекает преподавателей, поскольку информационная и творческая среда постоянно расширяется, что в свою очередь требует от педагога большей эрудиции и компетентности [1].

Актуальность методов является одним из наиболее важных факторов развития современного образования, в виду растущей изменчивости общества, влияния глобализации и иных факторов, побуждающих нас смотреть на мир и показывать его нашим детям и молодым людям иначе.

Социальная среда, в которой мы существуем, определенно имеет не мало недостатков и проблем, требующих внимания, но наибольшее значение из них имеет развитие сферы образования. Ведь качественное образование, несомненно, является основой развития новых поколений, а они, в свою очередь, являются основой мира, который мы увидим уже в недалеком будущем.

Каждый день дети, подростки, студенты, просыпаясь, думают о том, куда они идут, что будут сегодня там делать, а главное зачем? Одна из главных задач каждого преподавателя – дать им ответы на эти вопросы. Ведь лишь когда человек имеет цель стремления к чему-либо, процесс и его воплощение будут иметь значение для него самого. Каждый человек, лишь начинающий свой путь в познании мира и самого себя, нуждается в помощи, словах, примерах

и действиях, что укажут ему путь на годы вперед. И помните, делая светлым наше сегодня, мы все ближе к нашему светлому завтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гузеев, В.В. Характерные черты образовательных технологий разных поколений / В.В. Гузеев // Завуч. – 2004. – № 3. – С. 64-96.
2. Алексеева, Л.Н. Инновационные технологии как ресурс эксперимента / Л.Н. Алексеева // Учитель. – 2004. – № 3. – С. 78.
3. Бычков, А.В. Инновационная культура / А.В. Бычков // Профильная школа. – 2005. – № 6. – С. 33-38.
4. Селевко, Г.К. Современные образовательные технологии: учебное пособие / Г.К. Селевко. – Москва: Народное Образование, 1998. – 256 с.
5. Соколова, Н.Ф. Перспективы распространения информационных и коммуникационных технологий / Н.Ф. Соколова // Среднее профессиональное образование. – 2005. – № 7. – С. 6.
6. Загвязинский, В.И. Инновационные процессы в образовании и педагогическая наука / В.И. Загвязинский // Инновационные процессы в образовании. – Тюмень: Тюменский государственный университет, 1990. – С. 5-14.
7. Колесникова, Т.А. Применение инновационных технологий в образовательном процессе современной школы / Т.А. Колесникова, З.У. Колокольникова, О.Б. Лобанова // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2017. – № 6-2. – С. 261-269.
8. Коджаспирова, Г.М. Педагогический словарь / Г.М. Коджаспирова, А.Ю. Коджаспиров. – Москва: Академия, 2001. – 176 с.

REFERENCES

1. Guzeev, V.V. Characteristic features of educational technologies of different generations / V.V. Guzeev // Head teacher. – 2004. – No. 3. – P. 64-96.
2. Alekseeva, L.N. Innovative technologies as an experimental resource / L.N. Alekseeva // Teacher. – 2004. – No. 3. – P. 78.
3. Bychkov, A.V. Innovative culture / A.V. Bychkov // Specialized school. – 2005. – No. 6. – P. 33-38.
4. Selevko, G.K. Modern educational technologies: training manual / G.K. Selevko. – Moscow: Narodnoe Obrazovanie Publ., 1998. – 256 p.
5. Sokolova, N.F. Prospects for the dissemination of information and communication technologies / N.F. Sokolova // Secondary vocational education. – 2005. – No. 7. – P. 6.
6. Zagvyazinsky, V.I. Innovative processes in education and pedagogical science / V.I. Zagvyazinsky // Innovative processes in education. – Tyumen: Tyumen State University, 1990, – P. 5-14.
7. Kolesnikova, T.A. The use of innovative technologies in the educational process of modern schools / T.A. Kolesnikova, Z.U. Kolokolnikova, O.B. Lobanova // Scientific review. Pedagogical sciences. – 2017. – No. 6-2. – P. 261-269.
8. Kojaspirova, G.M. Pedagogical dictionary / G.M. Kojaspirova, A.Yu. Kojaspirov. – Moscow: Akademiya Publ., 2001. – 176 p.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

MODERN TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Фесикова О.В., кандидат философских наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Fesikova O.V., PhD in Philosophy, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Матвиец П.В., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Matviets P.V., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В данной статье рассматриваются актуальные вопросы современного образовательного процесса. Какие плюсы и минусы появляются при использовании современных технологий в обучении. Авторы считают, что основной проблемой в эру информационных технологий стало повсеместное использование искусственного интеллекта, с помощью которого можно не только получать знания, но и постепенно потерять себя как личность.

Ключевые слова: образование, современные технологии

Abstract. This article examines current issues of the modern educational process. What are the pros and cons of using modern technologies in education. The authors believe that the main problem in the era of information technology has become the widespread use of artificial intelligence, with the help of which you can not only gain knowledge, but also gradually lose yourself as a person.

Keywords: education, modern technologies

Для всех очевидно, что современные технологии достигли совершенно иного уровня. В 21 веке произошли кардинальные изменения в зоне общего образования, которые базируются на выход качественного уровня с помощью новых методик, внедрения гаджетов, ноутбуков и современного психологического личного подхода. Основной проблемой в эру информационных систем стало освоение новейших технологий искусственного интеллекта, с помощью которого можно не только узнать, как приготовить себе завтрак или как ответить другу в споре, но и полностью заменить весь поток информации, что ученики должны осваивать и запоминать в ходе учебного процесса.

С одной стороны, есть и положительные качества, но негативные значительно перевешивают. Рассмотрим позитивные и негативные качества в сравнении. Позитивными качествами являются: доступность, большой поток информации на любую тему, легкость в работе, высокая скорость и эффективность, автоматизация и оптимизация, объективность, круглосуточная работа, в то время как негативными: некоторые имеют запросы больших

финансовых вложений для предоставления ответов, угроза безопасности, недостаток творческого мышления, и конечно же, потеря личного мышления в зависимости от того, что за тебя все может решить машина. Но все же стоит отметить, что фундаментом образовательных интернет-технологий выступает сбор, обработка, хранение, передача и последующее применение информации в процессе обучения в виде онлайн обучений, который каждый может выбрать для себя [1]. Если не принимать во внимание общие образовательные программы: школу, колледж или университет, для себя можно выделить множество интересных площадок с курсами для саморазвития и занятия любимыми хобби.

В настоящее время это отличный способ выделиться, продемонстрировать свои навыки в новой области и узнать много нового и интересного, подходящего для людей разных возрастов, применяя это не только в личной жизни, но и в профессии. А что же могут дать и как повлиять на наш личностный рост родители и учебно-воспитательный процесс, мы разберем дальше в статье.

Все учебные заведения действуют не просто как объекты, а как активные участники формирования образовательной среды. В будущем, в контексте международного образовательного пространства общего образования, возрастет ответственность за качество предоставляемых образовательных услуг. Применение разнообразных педагогических технологий позволяет преподавателям эффективно использовать учебное время и достигать высоких результатов в обучении студентов. Технологический подход изначально ориентирован на управление образовательным процессом, что подразумевает ясное определение целей и методов их достижения. Не стоит и забывать про фундамент, на котором выстраивается модель личностного развития и этим как раз является воспитание родителей. В настоящее время одной из актуальных проблем является формирование личности человека благодаря социализации и учебно-воспитательному процессу. Многие факторы, такие как семья и воспитание, занимают центральную позицию в формировании человека как индивидуальности, но не стоит забывать и про процесс обучения, который целенаправленно организывает человека на протяжении всей его жизни в стремлении к получению новых знаний [1-3]. Благодаря родителям с самого рождения дети перенимают качества в формировании своих привычек, что в дальнейшем по мере взросления преследуют их. По статистике с шести лет у ребенка начинается активное развитие когнитивных функций. И аспекты, что влияют, на развитие делятся на два типа: окружающая среда, а также воспитание родителей, их взаимодействие и заинтересованность в жизни. Заинтересованность родителей проявляется не только в заботе, но и во внимании и помощи с учебным процессом. Занятия в кружках помогают развивать дисциплину и нахождение в социуме среди своих сверстников, что формирует определенные границы и ценности, ставит новые рамки, нормы и правила, которые значительно отличаются от домашней среды. Родители часто забывают про живое общение не только с детьми, но и с педагогами по причине отсутствия времени из-за работы или личных дел, что приводит к недостатку взаимопонимания [4]. Современные технологии в виде девайсов не могут дать прямого диалога. В результате, ребенок испытывает недостаток комфорта, авторитета и чувства защиты, которые невероятно важны в социальном процессе. Полная изоляция в общении с родителями плохо влияет на способность формирования убеждений, жизненных перспектив и развития, у ребенка возникают проблемы в

психологическом плане. Это может вызывать путаницу и искаженное восприятие информации о росте и поведении. Такое нерегулярное взаимодействие может вызвать трудности в обучении и в процессе воспитания, что в частности приводит к демотивации. В свою очередь, классный руководитель не в силах полностью акцентировать свое внимание на единственном ученике, поскольку большое количество учащихся равным образом нуждаются в наблюдении и в личном подходе. В дополнении социализация во время учебного процесса должна подкрепляться различными новыми методиками обучения, тем самым повышая вовлеченность детей в изучение данного предмета.

Родители и педагоги чаще всего имеют различные взгляды на подход и разные ожидания, поэтому ребенку психологически трудно разобраться, чего от него ожидают, каких результатов и задач он должен достигнуть, чтобы прийти к одному логическому выводу. Выходом из ситуации является оповещение родителей о школьной жизни ребенка, они должны принимать активное участие в ней, посещать родительские собрания и быть в курсе процессов, происходящих в учебном заведении. Педагогам следует прилагать усилия для более глубокого понимания домашней обстановки своих учеников, что позволит им лучше распознавать их личностные особенности и индивидуальные нужды [4].

Деятельность учителей несет в себе значительный груз ответственности, поскольку в сфере обучения и формирования личности на них рассчитывают не только сами ученики, но и их родители. В процессе формирования умений и моральных ориентиров учеников педагоги выполняют ключевую функцию, способствуя их личностному становлению и адаптации к предстоящей самостоятельной жизни. Необходимо отметить, что коммуникация с семьями учащихся представляет собой непрерывный диалог, требующий систематического совершенствования. Учителям необходимо демонстрировать готовность воспринимать критику и внедрять инновационные стратегии в партнерстве с родителями для более эффективного удовлетворения запросов нынешних семей и обеспечения плодотворного сотрудничества на благо образовательного процесса детей.

Очевидно, что в контексте современного социума образовательные учреждения не всегда располагают возможностями и определенно не способны сформировать личность строго по заданным параметрам. Рост числа образовательных сообществ и организаций способствует объединению ресурсов, повышая качество образования через доступные курсы и мероприятия. Учредительное пространство служит важным элементом самореализации и взросления детей. Одновременно возникают инновационные модели, способствующие улучшению жизненного уровня и общественному развитию. Социальная сфера стремительно совершенствуется благодаря цифровизации и интернет-технологиям. Современные гаджеты, разработанные для оптимизации различных аспектов жизни, значительно влияют на формирование личности, приоритетов и образовательный процесс ребенка. Электронный журнал стал эффективным инструментом мониторинга учебной деятельности учащихся. Важно помнить, что ученик получает оценки не только ради одобрения – существенное значение имеет его вовлеченность в классную работу, отношения со сверстниками и предметные предпочтения, что непосредственно связано с родительской коммуникацией и их участием в образовательном процессе. Ценностные ориентиры, заложенные в детстве, и конечные цели учащегося во многом определяются родительским воспитанием и поддержкой

в определении жизненного пути. Современные технологии упрощают обучение, а интернет-ресурсы фактически вытеснили традиционные источники информации. Однако в условиях дистанционного образования формирование социальных и духовных навыков через виртуальное взаимодействие с педагогом становится проблематичным из-за снижения учебной мотивации и ухудшения саморегуляции у детей [3-4]. Никакие технологические решения не способны заменить прямое общение и дать полноценные жизненные знания.

В современном социокультурном контексте актуализируется вопрос о применении воспитательных методов, способных усилить взаимодействие между участниками образовательного процесса и достичь оптимального сотрудничества. Семья и образовательные учреждения, особенно на дошкольном этапе, играют определяющую роль в развитии и социализации детей. Преодоление трудностей в их взаимоотношениях через сотрудничество создает благоприятные условия для раскрытия потенциала каждого ребенка. В современном обществе развитие личности происходит через социализацию, самосовершенствование, обучение и родительское воспитание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарипова, Е.И. Диагностика персонифицированной образовательной среды в аспекте педагогического сопровождения / Е.И. Зарипова, Н.А. Васильева // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. – 2023. – Т. 12, № 4. – С. 21-25.
2. Костикова, Н.А. Анализ опыта реализации коммуникативных стратегий в дистанционной образовательной среде учителями средних общеобразовательных школ / Н.А. Костикова // Проблемы науки и образования на современном этапе общественного развития : сборник научных статей студентов, аспирантов и молодых ученых / Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Выборгский филиал. – Санкт-Петербург: Центр научно-информационных технологий «Астерион», 2013. – С. 30-33.
3. Кузовлева, Н.В. Социальные образовательные стратегии в современной школе на примере класса «лесные кадеты» / Н.В. Кузовлева, Е.В. Барабанщикова // Человек. Общество. Наука. – 2021. – Т. 2, № 3. – С. 114-118. – DOI: 10.53015/2686-8172_2021_2_3_114.
4. Хаджиев, С.М. Стратегии адресной поддержки родителей с разным уровнем осознанной родительской ответственности в общеобразовательной организации / С.М. Хаджиев // Наука и инновации в современном мире : Сборник научных статей / Научный редактор А.С. Старун. Том Часть II. – Москва : Издательство «Перо», 2019. – С. 121-126.

REFERENCES

1. Zaripova, E.I. Diagnostics of personalized educational environment in the aspect of pedagogical support / E.I. Zaripova, N.A. Vasilyeva // Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technology. – 2023. – Vol. 12, No. 4. – P. 21-25.
2. Kostikova, N.A. Analysis of the experience of implementing communication strategies in the distance learning environment by teachers of secondary comprehensive schools / N.A. Kostikova // Problems of science and education at the present stage of social development : collection of scientific articles by students, postgraduates and young scientists / A.I. Herzen Russian State

Pedagogical University, Vyborg branch. – Saint Petersburg: Asterion Center for Scientific and Information Technologies, 2013 – P. 30-33.

3. Kuzovleva, N.V. Social educational strategies in a modern school using the example of the «Forest Cadets» class / N.V. Kuzovleva, E.V. Barabanshchikova // Man. Society. Science. – 2021. – Vol. 2, No. 3. – P. 114-118. – DOI 10.53015/2686-8172_2021_2_3_114.

4. Khadzhiev, S.M. Strategies for targeted support of parents with different levels of conscious parental responsibility in a general education organization/ S.M. Khadzhiev // Science and innovation in the modern world: A collection of scientific articles / Scientific editor A.S. Starun. Volume Part II. – Moscow: Pero Publishing House, 2019. – P. 121-126.

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

DIGITAL TRANSFORMATION OF EDUCATION

Филиппова А.В., магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Filippova A.V., Master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Фесикова О.В., кандидат философских наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Fesikova O.V., PhD in Philosophy, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Мы живем в эпоху цифровой революции. Стремительный процесс развития IT-технологий заставляет трансформировать систему образования, внедряя новые педагогические практики и модели образовательного процесса. В данной статье отмечена важность интегрирования цифровых инструментов в сферу образования. Цифровизация образования рассмотрена как необходимость, вызванная реалиями современного мира. Обращается внимание на существующие препятствия на пути к реформам. В заключение подчеркнуто, что за цифровыми технологиями стоит наше будущее, где образование должно быть гибким и адаптивным, соответствующее сегодняшним критериям.

Ключевые слова: цифровизация, образование, педагогический подход, образовательная платформа.

Abstract. We live in the era of digital revolution. The rapid development of IT technologies forces us to transform the education system by introducing new pedagogical practices and models of the educational process. This article notes the importance of integrating digital tools into education. Digitalization of education is considered as a necessity caused by the realities of the modern world. Attention is drawn to existing problems and obstacles to reforms. In conclusion, it was emphasized that digital technologies are our future, where education must be flexible and adaptive, corresponding to today's criteria.

Keywords: digitalization, education, pedagogical approach, educational platform.

В настоящее время происходит рассвет цифровых технологий. Сложно представить, что всего лишь несколько десятилетий назад этот процесс казался невероятным и даже фантастическим. Люди не подозревали, что смартфоны, компьютеры, интернет станут неотъемлемой частью их жизни. Сегодня цифровые технологии успешно внедряются во все сферы жизнедеятельности человека и являются необходимым элементом современного процесса обучения. Цифровизация образования позволяет применять новые педагогические практики и модели образовательного процесса. Интеграция цифровых инструментов

переопределяет саму философию обучения, стирая границы между теорией и практикой, местом и временем, заставляет переосмысливать роль учителя. Поэтому внедрение инновационных методов в образовании является необходимым условием для подготовки будущих поколений к реалиям цифровой эпохи. Однако, если проанализировать динамику развития образовательной системы, становится очевидно, что ее модернизация не успевает за стремительным рывком IT-технологий [1]. Какие проблемы существуют на пути к реформам образовательных учреждений? Какими темпами происходит цифровая трансформация образования, какого плана изменения мы видим уже сейчас и что ожидаем в перспективе?

В настоящее время во многих школах на уроках применяют цифровые технологии. Учителя используют интерактивные доски, показывают презентации, видеоуроки, ученики выполняют задания на онлайн-платформах, где имеется весь необходимый материал. Журналы и дневники старого формата ушли в прошлое, а в скором времени бумажные учебники, методички и тетради также будут невостребованными [2]. Каждый ребенок знаком с работой искусственного интеллекта. Нейросеть оказывает неоценимую помощь в учебе, но только при грамотном ее использовании. Все больше популярным становится онлайн-образование, оно позволяет ребенку из любой точки планеты заниматься с преподавателем любого уровня и национальной принадлежности. А в скором времени появится возможность заниматься под руководством ИИ [3]. Электронная почта, мессенджеры, видеоконференции позволяют быстро решать вопросы и обмениваться информацией. Большую перспективу открывает введение в уроки элементов геймификации, ведь современные дети не представляют свою жизнь без компьютерных игр. С этим необходимо считаться и использовать это с пользой. Такой подход заинтересует любого ребенка, сделает учебу живее, заставит мыслить и искать решения, выбирать уровень сложности заданий с возможностью проходить заново миссии и накапливать опыт вместо оценок, что дает высокую мотивацию к учебе.

Плюсы цифровых технологий в образовании очевидны. Раньше ученики занимались по одинаковому плану, используя стандартные учебники. Классический подход, при котором педагог ориентируется на «среднего» ученика, не рассчитан на тех, кто не успевает или опережает программу. Сейчас технологии позволяют сделать обучение более гибким. Цифровые платформы умеют адаптироваться под каждого ученика. Например, если тема по математике не дается, программа объяснит по-другому и предложит различные примеры для лучшего восприятия информации. Можно пересмотреть видеоурок, пройти тест еще раз или выбрать сложность задания. Таким образом каждый ученик двигается в удобном для него темпе.

Онлайн-курсы и образовательные приложения учат искать информацию, работать с разными источниками и отделять важное от ненужного. Это развивает умение думать критически и решать самостоятельно поставленные задачи. Ученики не просто запоминают факты, они учатся задавать правильные вопросы, сравнивать источники, создавать междисциплинарные проекты, демонстрируя навыки аналитического мышления.

Современные дети привыкли к ярким картинкам, видео, играм. Сухой текст из учебника не может конкурировать с интерактивными презентациями, 3-D моделями или квестами. Ярким примером тому может быть использование VR-шлемов и очков, с их

помощью ребенок может не только узнавать про различные исторические события, но и оказаться их участником, получая незабываемые впечатления и опыт, который невозможен в реальном мире. Он может также увидеть строение солнечной системы, запуская симуляцию, наблюдать за движением планет, увеличивая масштаб, посмотреть поверхность Марса. Возможно увидеть модели атомов и молекул, строение внутренних органов, когда ученики могут буквально разобрать сердце на слои, наблюдая работу клапанов в реальном времени, даже скучные формулы оживают, если их превратить в интерактивный график [4].

Цифровые технологии снимают барьеры, раскрывают потенциал учеников, превращая класс в пространство для экспериментов. В эпоху цифрового образования переосмысливается роль учителя. Он должен стать наставником, который помогает детям ориентироваться в океане информации. Технологии не заменяют учителей – они освобождают их от рутины. Вместо того, чтобы диктовать лекцию, проверять тетради, учитель отвечает на вопросы, вдохновляет, поддерживает интерес к знаниям, мотивирует, учит понимать мир и находить свое место в нем, способствует формированию личности ребенка, нравственных и духовных ценностей.

Рассматривая существующие и грядущие реформы образования, мы не отрицаем существование недостатков. Дети очень много времени проводят у компьютера и гаджетов, что сказывается на здоровье: снижается зрение, нарушается осанка, повышается нервная возбудимость, возникает зависимость. Нельзя не отметить нарушение социализации, что плохо сказывается на психологическом состоянии ребенка, влияет на становление личности и эмоциональное развитие. Дети мало проводят времени на свежем воздухе, снижается физическая активность, теряются навыки живого общения. Поэтому необходимо грамотно сочетать технологии с обычной жизнью, чтобы цифровые инструменты стали полезным дополнением, а не проблемой.

Мы живем в век компьютерных технологий, поэтому цифровизация образования – это необходимость, вызванная требованиями эпохи. Сейчас, без соответствующих навыков человек не может оплатить коммунальные платежи, записаться к врачу или оформить документы. Детям не только необходимо научиться пользоваться компьютерными навыками в повседневной жизни, именно они станут двигателями дальнейшего прогресса, им предстоит совершать научно-технические открытия и находить инновационные пути решения глобальных проблем современности. Цифровая эпоха открывает перед детьми невероятные возможности. Цифровая революция для них стала повседневностью. Уже сейчас они легко осваивают программирование, 3-D моделирование, робототехнику [5]. Задача взрослых – дать им инструменты для дальнейшего развития.

Россия активно интегрирует цифровые инструменты в образовательный процесс. Существуют государственные программы, такие как «Цифровая образовательная среда». В рамках которой внедряются образовательные платформы: SkySmart, Skillspace, «Фоксфорд», «ЯКласс», сервис «Яндекс. Учебник», онлайн-курсы образовательного центра «Сириус», «Российская электронная школа» и многие другие [6]. Но проблема в том, что технологии внедряются без пересмотра педагогических подходов и служат как поддержка традиционных методов обучения и часто просто дублируют их, вместо трансформации учебных процессов. Инновационные методики остаются редкостью. Основное препятствие – дефицит навыков у

преподавателей и нежелание менять устоявшуюся систему. Многие учителя воспринимают компьютерные технологии как лишнюю нагрузку, не считаясь с тем, что каждая эпоха требует своих подходов к образовательному процессу. Консерватизм часто исходит не только от учителей, но и родителей. «Раньше учились по учебникам и выросли нормальными людьми!» – такие фразы звучат чаще, чем хотелось бы. Но образование должно соответствовать критериям своего времени. Необходимо менять стереотипное мышление родителей и преподавателей, внедрять обучающие практические программы потому, что чаще всего курсы повышения квалификации сводятся к формальным лекциям. Важно обеспечить каждую школу IT-наставником, который поможет настроить программы, объяснит, как работать с цифровыми материалами [7]. Учителя должны быть увлечены процессом наравне с детьми. Парадокс в том, что сейчас дети лучше многих учителей разбираются в компьютерных технологиях и преподаватели часто обращаются к ним за помощью. Учителя чувствуют свою некомпетентность во многих вопросах, поэтому сопротивляются цифровым преобразованиям и скептически оценивают его преимущества. Поэтому преодоление этих предубеждений очень важно для успешной реформы образования.

Еще одной важной проблемой на пути к цифровизации образования является недостаток финансирования и проблемы технического плана, особенно в регионах. Цифровизация требует постоянных вложений: современное лицензированное ПО, обновления серверов, кибербезопасность и другое. Муниципальные бюджеты регионов редко выдерживают эту нагрузку. А без стабильного интернета даже элементарные цифровые инструменты невозможно использовать. Техническое оборудование, поступившее в школы по национальным программам, часто остается бутафорией. Такие проблемы требуют не только финансирования, но и логистики: как обслужить оборудование, если в поселке нет даже дорог? В сельских школах часто не хватает учителей, многие работают на пенсии, так как не кем заменить, а молодые специалисты не спешат обосноваться в глубинке. В таких условиях ни о какой полноценной цифровизации не может быть и речи. Проблемы регионов необходимо решать комплексно на государственном уровне, причем не только в сфере образования.

Таким образом, цифровизация образования – это фундаментальная трансформация, которая предопределяет само понятие обучения, открывает новые горизонты для общества в целом. Реалии стремительно меняющегося мира требуют срочного решения проблем, стоящих на пути к реформам. Каждый понимает, что за цифровыми технологиями стоит наше будущее, где образование должно быть гибким и адаптивным, соответствующее требованиям современного мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимова, О.Б. Цифровая трансформация образования: своевременность учебно-познавательной самостоятельности обучающихся / О.Б. Акимова, М.Д. Щербин // Инновационные проекты и программы в образовании. – 2018. – №1 – С. 27-34.
2. Исмагилов, Н.А. Современные технологии цифровой образовательной среды / Н.А. Исмагилов, И.Р. Хабибуллин, О.В. Азовцева // Молодой ученый. – 2023. – № 12 (459). – С. 155-158.

3. Каракозов, С.Д. Успешная информатизация – трансформация учебного процесса в цифровой образовательной среде / С.Д. Каракозов, А.Ю. Уваров // Проблемы современного образования. – 2016. – №2. – С. 7-19.
4. Пронюшкина, Т.Г. Цифровые технологии в образовании / Т.Г. Пронюшкина, В.О. Лукич // Цифровая гуманитаристика и технологии в образовании (DHTE 2024) : Сборник статей V Международной научно-практической конференции, Москва, 14–15 ноября 2024 года. – Москва: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2024. – С. 157-171.
5. Родичева, А.В. Цифровые технологии в современной школе / А.В. Родичева // Молодой ученый. – 2022. – № 4 (399). – С. 365-368.
6. Ползикова, Н.Б. Современные образовательные технологии / Н.Б. Ползикова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 25. – С. 232-234. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/770565.htm> (дата обращения 01.04.2025).
7. Современные цифровые технологии в образовании / Л.А. Федосеева, Н.А. Дубровин, Е.Л. Ермолаева [и др.] // Современные научные исследования и инновации. – 2020. – № 11 (115). – С. 39.

REFERENCES

1. Akimova, O.B. Digital transformation of education: timeliness of educational and cognitive independence of students / O.B. Akimova, M.D. Shcherbin // Innovative projects and programs in education. – 2018. – No. 1. – P. 27-34.
2. Ismagilov, N.A. Modern technologies of the digital educational environment / N.A. Ismagilov, I.R. Khabibullin, O.V. Azovtseva // Young scientist. – 2023. – No. 12 (459). – P. 155-158.
3. Karakozov, S.D. Successful informatization – transformation of the educational process in the digital educational environment / S.D. Karakozov, A.Yu. Uvarov // Problems of modern education. – 2016. – No. 2. – P. 7-19.
4. Pronyushkina, T.G. Digital technologies in education / T.G. Pronyushkina, V.O. Lukich // Digital Humanities and Technologies in Education (DHTE 2024) : Collection of articles of the V International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 14-15, 2024. – Moscow: Moscow State Psychological and Pedagogical University, 2024. – P. 157-171.
5. Rodicheva, A.V. Digital technologies in the modern school / A.V. Rodicheva // Young scientist. – 2022. – No. 4 (399). – P. 365-368.
6. Polzikova, N.B. Modern educational technologies / N.B. Polzikova // Scientific and methodological electronic journal «Concept». – 2017. – Vol. 25. – P. 232-234. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/770565.htm> (accessed 01.04.2025).
7. Modern digital technologies in education / L.A. Fedoseeva, N.A. Dubrovin, E.L. Ermolaeva [et al.] // Modern scientific research and innovation. – 2020. – No. 11 (115). – P. 39.

Научное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Материалы Всероссийской научно-методической конференции
с международным участием,
посвящённой 80-летию со дня рождения профессора В.В. Постникова,
приуроченной к 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова

Воронеж, 15 апреля 2025 г.

Ответственные редакторы: Н.Ю. Евсикова, С.В. Внукова

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано к изданию 02.07.2025. Объем данных 28,0 Мб
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»
ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8