

№ 5 (119) ▪ 2022

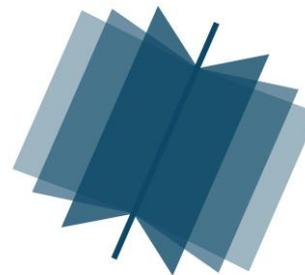
Часть 1 ▪ Май

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЖУРНАЛ**

INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL

ISSN 2227-6017 ONLINE

Екатеринбург
2022



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

**№ 5 (119) 2022
Часть 1
Май**

Дата выхода 17.05.2022
Цена: бесплатно.

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

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

Члены редколлегии:

Филологические науки:

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

Технические науки:

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

Педагогические науки:

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

Психологические науки:

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

Физико-математические науки:

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

Географические науки:

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

Биологические науки:

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

Архитектура:

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

Ветеринарные науки:

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

Медицинские науки:

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

Исторические науки:

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

Культурология:

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

Искусствоведение:

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

Философские науки:

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

Юридические науки:

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

Сельскохозяйственные науки:

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

Социологические науки:

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

Химические науки:

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

Науки о Земле:

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

Экономические науки:

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

Политические науки:

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

Фармацевтические науки:

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Сугак Д.В. ПРИНЦИП МАКСИМУМА ПОНТРЯГИНА В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ БИГАРМОНИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЕМ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ.....	6
---	---

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Болгова Е.А. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМ КОНТУРОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ.....	9
Бормотов А.Н. ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	17
Бубекова А.Г., Гантц И.С. ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МАСТЕР-ДАНЫМИ В БАНКОВСКОЙ СФЕРЕ.....	23
Будевич Е.А., Тимохова О.М., Вычерова Н.Р. АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ЭЛЕМЕНТЫ ЛЕСНЫХ МАШИН В ВИДЕ ГАУССОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ.....	27
Волкова В.К. АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ ПОСЛЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	32
Горячев С.В., Смолякова А.А. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РОССИИ	37
Жанабай Н.Ж., Турсункулулы Т., Утелбаева А.Б., Дуйсенбеков Б. ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ РЕЗЕРВУАРА С УЧЕТОМ ШАГА НАМОТКИ ПРОВОЛОКИ.....	41
Итс Т.А., Сурина А.В. МИГРАЦИОННЫЕ ПОТОКИ МЕГАПОЛИСА: СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.....	50
Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Матюшенко А.И., Журавлев А.С. ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННОГО РЕАГЕНТА-ОСАДИТЕЛЯ	55
Лазарев Д.М., Фаррахов Р.Г., Аубакирова В.Р., Фаткуллин А.Р., Парфенов Е.В. ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА БИОРАЗЛАГАЕМОМ МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ.....	62
Марченко А.Л. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЕБНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА» В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19.....	67
Медведев П.В., Федотов В.А., Бочкарева И.А., Лукьянова Е.С. МОДЕРНИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ТЕСТОПРИГОТОВЛЕНИЯ.....	81
Москвичев А.С., Москвичева Е.В., Тимошенкова И.А. ПРИМЕНЕНИЕ ОВОЩНОЙ МУКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЗГЛЮТЕНОВЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ	84
Норина Н.В. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТА ОСНОВАНИЯ ПРИ ОТРЫВЕ СООРУЖЕНИЯ В ПРЕДПОЛОЖЕНИИ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ	89
Сандуляк А.А., Киселев Д.О., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Кочуров К.А., Красильников Е.А., Харин А.С. ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ В ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ МАСС ВЫДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ.....	97
Симонян В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ И ПРЕССОВАНИЯ МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛЬНОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ.....	102
Шумилин Е.В., Псаров С.А. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОТОПЛЕНИЕ ПО НОЧНОМУ ТАРИФУ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА В Г. ХАБАРОВСКЕ	108

НАУКИ О ЗЕМЛЕ / SCIENCE ABOUT THE EARTH

- Колбина О.Н., Яготинцева Н.В., Сафонова Т.В., Мокряк А.В.
КОНТРОЛЬ И МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ..... 115
- Папаскири Т.В., Баданина А.А.
ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕРРИТОРИИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ АГРОКЛАСТЕРА РЕСПУБЛИКИ КРЫМ..... 120
- Хорошевская В.О.
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА РЕЧНЫХ ВОД, ДРЕНИРУЮЩИХ ДОНЕЦКИЙ И КУЗБАССКИЙ УГОЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ..... 124

ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / GEOLOGY AND MINERALOGY

- Низаметдинов И.Р.
ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВОДЫ НА СОСТАВ ОСТАТОЧНЫХ СТЕКОЛ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОЛИВИНЕ В БАЗАЛЬТАХ ВУЛКАНА МЕНЬШИЙ БРАТ, КАЛЬДЕРА МЕДВЕЖЬЯ (О. ИТУРУП)..... 135
- Мингазова Н.М., Шигапов И.С., Набеева Э.Г.
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОРЕАБИЛИТАЦИИ МАЛЫХ ОЗЕР НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА БАННОВСКОЕ 142

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / BIOLOGY

- Кунешко Н.Ф., Гаврикова Д.И., Голомазова В.А., Ким В.В.
ВЛИЯНИЕ ПЕРЕНЕСЕННОЙ НОВОЙ КОРОНОВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ НА РАЗВИТИЕ, ТЕЧЕНИЕ И ИСХОД БЕРЕМЕННОСТИ..... 146
- Мельник О.А., Никифорова Ю.Ю.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В СОСТАВЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПоста..... 157
- Черкасова Е.Е., Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛУЛЕТАТЬНОЙ ДОЗЫ ДЛЯ НАЗЕМНОГО МОЛЛЮСКА *FRUTICICOLA FRUTICUM* 162

ВЕТЕРИНАРНЫЕ НАУКИ / VETERINARY SCIENCE

- Шубина Т.П., Чопорова Н.В.
МОРФОЛОГИЯ ПЕЧЕНИ У СВИНЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛИВИТАМИННОГО ПРЕПАРАТА 168
- Калязина Н.Ю., Кирдяев В.М., Родина Э.В., Родин В.Н., Явкин Д.Е.
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХВОЙНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ НА РОСТОВЕСОВЫЕ И ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛОТояДНЫХ..... 171

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / CHEMISTRY

- Derevyanko M.S., Cheverikin V.V., Bajenova I.A., Kuzovchikov S.V., Kondratiev A.V.
PREPARATION OF AMORPHOUS OXIDES Al_2O_3 AND Fe_2O_3 BY A MODIFIED SOL-GEL METHOD 175

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.042>

**ПРИНЦИП МАКСИМУМА ПОНТРЯГИНА В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
БИГАРМОНИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЕМ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ**

Научная статья

Сугак Д.В.*

ORCID: 0000-0002-5405-5360,

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (dima_sou[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассмотрена задача оптимального управления бигармоническим уравнением с фазовыми ограничениями. Сформулировано и доказано необходимое условие оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина. Этот результат может быть полезен как для организации последующей вычислительной процедуры типа метода последовательных приближений, так и для качественного анализа задачи, возможно, не приводящего к окончательному ответу, но устанавливающего важные свойства решения, то есть оптимального процесса. Отметим также, что бигармонические уравнения, описывающие здесь поведение объекта управления, постоянно возникают в задачах математической теории упругости и связанных с ними задачах оптимизации. Наличие фазовых ограничений в постановке рассматриваемой задачи оптимального управления как правило существенно осложняет процесс отыскания ее решения.

Ключевые слова: принцип максимума Понтрягина, бигармоническое уравнение, оптимальный процесс.

**PONTRYAGIN'S MAXIMUM PRINCIPLE FOR A STATE-CONSTRAINED OPTIMAL CONTROL PROBLEM
GOVERNED BY A BIHARMONIC EQUATION**

Research article

Sugak D.V.*

ORCID: 0000-0002-5405-5360,

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

* Corresponding author (dima_sou[at]mail.ru)

Abstract

The article considers the problem of optimal control of biharmonic equation with constraint on the state. The necessary condition of optimality in the form of the Pontryagin's maximum principle was formulated and proved. This result can be useful both for organizing a subsequent computational procedure of successive approximations method, and for qualitative analysis of the problem, perhaps not leading to a final answer, but establishing important components of the solution, meaning an optimal process. It must also be noted that the biharmonic equations describing the features of the optimal control object constantly arise in problems of the mathematical theory of elasticity and related problems of optimization. Phase limitations in setting the optimal control within the problem in question, tend to make it difficult to find a solution.

Keywords: Pontryagin's maximum principle, biharmonic equation, optimum process.

Введение

Принцип максимума [1] в математической теории управления, сформулированный и доказанный Л.С. Понтрягиным и его сотрудниками В.Г. Болтянским, Р.В. Гамкрелидзе и Е.Ф. Мищенко для задач оптимального управления системами с сосредоточенными параметрами, то есть системами, описываемыми обыкновенными дифференциальными уравнениями, является одним из самых известных и самых цитируемых результатов в современной математике. Необходимо отметить, что открытие принципа максимума произошло под влиянием запросов прикладных задач, оказавшихся полностью недоступными для решения методами классического вариационного исчисления. Непригодность вариационного исчисления в данной ситуации легко объясняется тем, что подавляющее большинство прикладных технических задач описывались дифференциальными уравнениями, линейными относительно управляющих параметров. Тем самым принцип максимума Понтрягина связал классическое вариационное исчисление с огромным количеством современных прикладных исследований оптимизационных задач. Среди них здесь особо отметим задачи с распределенными параметрами, то есть задачи оптимизации в математической физике, которые сегодня становятся все более актуальными.

Благодаря прикладному и общенаучному значению перехода теории оптимального управления от приложений в задачах классической механики к приложениям в гидродинамике, газодинамике и обширном поле других физических исследований, вскоре после основополагающей публикации принципа максимума Понтрягина [1] появилось большое количество его «перенесений» на различные прикладные задачи оптимального управления для систем с распределенными параметрами. В данной статье рассмотрена одна из таких задач. Предполагается, что поведение объекта управления описывается бигармоническим дифференциальным уравнением [2]. Данный класс уравнений в частных производных является частью более широкого класса полигармонических уравнений [2], [3] и активно используется во многих задачах математической теории упругости [4]. Следует также отметить, что в статье рассматривается случай фазовых ограничений, которые заметно усложняют задачу. Такие ограничения требуют, чтобы фазовый вектор системы не покидал заданного множества. Задачи оптимального управления уравнениями в частных производных при наличии фазовых ограничений вызывают повышенный интерес в настоящее время. В подтверждение

этого факта можно указать, например, следующие публикации в ведущих международных математических журналах [5], [6], [8], [9].

Постановка задачи и формулировка основного результата

Пусть $\Omega = \{x\}$ – открытое ограниченное подмножество \mathbb{R}^3 с границей S класса C^2 . Рассмотрим объект управления с состоянием $y(x) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ и управлением $u(x) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, описываемый следующей системой соотношений

$$\begin{cases} \Delta^2 y = f[x, y(x), u(x)], u(x) \in K, x \in \Omega \\ y(x)|_S = 0 \end{cases} \tag{1}$$

Здесь K – заданное непустое множество, Δ – оператор Лапласа, функция $f[x, y(x), u(x)] : \Omega \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Первое соотношение в системе (1) есть бигармоническое дифференциальное уравнение в частных производных относительно $y(x)$. Предположим, что состояние $y(x)$ должно удовлетворять ограничениям

$$g_i [x, y(x)] \leq 0, \forall x \in \Omega, i=1, \dots, Q \tag{2}$$

На множестве всех пар $(y(x), u(x))$, удовлетворяющих (1) и (2) рассмотрим задачу оптимального управления

$$\int_{\Omega} R(x, y(x), u(x)) dx \rightarrow \min \tag{3}$$

Обозначим через $M(\Omega)$ пространство всех вещественных борелевских зарядов [10] в Ω . Пусть $C_0^\infty(\Omega \rightarrow \mathbb{R}) := \{\varphi(\cdot) \in C^\infty(\Omega \rightarrow \mathbb{R}) : \varphi(x) = 0 \text{ при } x \notin M, \text{ где } M \subset \text{int } \Omega - \text{некоторое компактное множество}\}$. Здесь $C^\infty(\Omega \rightarrow \mathbb{R})$ есть пространство бесконечно дифференцируемых на Ω функций. Символом $W_0^{q,l}(\Omega \rightarrow \mathbb{R})$ обозначим замыкание пространства $C_0^\infty(\Omega \rightarrow \mathbb{R})$ в $W^{q,l}(\Omega \rightarrow \mathbb{R})$. Напомним, что $W^{q,l}(\Omega \rightarrow \mathbb{R})$ – банахово пространство, состоящее из всех элементов $\psi \in L^q(\Omega)$, имеющих обобщенные производные всех видов [11] до порядка l включительно, суммируемые по Ω со степенью q . Считаем, что в (2) функции $g_i[x, y(x)] : \Omega \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ непрерывны по (x, y) вместе с производной $\frac{\partial g_i}{\partial y}$, $i = 1, \dots, Q$. Считаем, что в (3) для почти всех $x \in \Omega$ функция $R[x, y(x), u(x)] : \Omega \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ непрерывна по (y, u) вместе с производной $\frac{\partial R}{\partial y}$. Считаем, что для почти всех $x \in \Omega$ функция $f(x, y, u)$ непрерывна по (y, u) вместе с производной $\frac{\partial f}{\partial y}$.

Теорема 1.

Пусть $(y^0(x), u^0(x))$ – оптимальный процесс в задаче управления (1)-(3). Тогда существуют функция $\psi(\cdot) \in W_0^{2,4}(\Omega \rightarrow \mathbb{R})$, заряды $\mu_i(dx) \in M(\Omega)$, $i = 1, \dots, Q$, число $\lambda \in \mathbb{R}$ такие, что выполняются следующие соотношения

$$H(x, y^0(x), u^0(x)) = \max_{v \in K} H(x, y^0(x), v) \tag{4}$$

для почти всех $x \in \Omega$.

$$\lambda \geq 0, \mu_i(dx) \geq 0, \text{supp } \mu_i(dx) \subset \{x: g_i(x, y^0(x)) = 0\}, \quad \forall i = 1, \dots, Q \tag{5}$$

$$\lambda + \int_{\Omega} |\psi(x)| dx + \sum_{i=1}^Q \mu_i(\Omega) > 0 \tag{6}$$

Здесь $H(x, y, u) = \psi(x)f(x, y(x), u(x)) - \lambda R(x, y(x), u(x))$ – функция Гамильтона.

Доказательство Теоремы 1.

Задача оптимального управления (1)-(3) представляет собой частный случай более общей задачи оптимального управления, рассмотренной в [12]. Поясним, что в [12] исследовалась задача, в которой объект управления описывался системой уравнений произвольного порядка эллиптической в одной из наиболее широких трактовок этого понятия, а именно эллиптической в смысле Даггиса - Ниренберга. Системы такого типа охватывают большинство встречающихся в приложениях эллиптических систем, в том числе и системы бигармонических уравнений. Соотношения (4)-(6) в утверждении сформулированной здесь теоремы 1 представляют собой необходимое условие оптимальности в форме

принципа максимума Понтрягина, а их справедливость следует из доказанной в [12, §3] теоремы 3.1. Отметим здесь, что доказательство соотношений (4)-(6) теоремы 1 основано на проверке выполнения условий 3.1-3.8 в [12, §3], которые в свою очередь являются предположениями теоремы 3.1 в [12, §3]. В случае управляемого бигармонического уравнения в задаче (1)-(3) нетрудно проверить, что условия 3.1-3.8 [12, §3] выполнены.

Заключение

В статье рассмотрена задача оптимального управления, в которой поведение объекта управления описывается бигармоническим уравнением. В постановке задачи присутствуют фазовые ограничения, требующие, чтобы фазовый вектор системы управления не покидал заданного множества. Сформулировано и доказано необходимое условие оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина в рассматриваемом случае.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе и др. – М.: Наука, 1983. -392 с.
2. Михлин С.Г. Линейные уравнения в частных производных / С.Г. Михлин. – М., Высшая школа, 1977. – 431 с.
3. Векуа И.Н. Новые методы решения эллиптических уравнений / И.Н. Векуа. – М.: Физматлит, 1948. -296 с.
4. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. -708 с.
5. Casas E. Second-Order and Stability Analysis for State-Constrained Elliptic Optimal Control Problems with Sparse Controls / E. Casas, F. Troltzsch // SIAM Journal on Control and Optimization. 2014. Vol. 52. -pp. 1010 - 1033.
6. Gugat M. Penalty Techniques for State-Constrained Optimal Control Problems with the Wave Equation / M. Gugat // SIAM Journal on Control and Optimization. 2010. Vol. 48. -pp. 3026 - 3051.
7. Casas E. Critical cones for sufficient second order conditions in PDE constrained optimization / E. Casas, M. Mateos // SIAM J. Optim. 2020. Vol. 30. -pp. 585 - 603
8. Bonnans J. Asymptotic Expansion for the Solutions of Control Constrained Semilinear Elliptic Problems with Interior Penalties / J. Bonnans, F.Silva // SIAM J. Control Optim. 2011. Vol. 49. -pp. 2494 - 2517.
9. Antil H. Optimal control of fractional elliptic PDEs with state constraints and characterization of the dual of fractional-order Sobolev spaces / H. Antil, D. Verma, M. Warma // Journal of optimization theory and applications. 2020. Vol. 186. -pp. 1 - 23.
10. Макаров Б.М. Лекции по вещественному анализу / Б.М. Макаров, А.Н. Подкорытов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 688 с.
11. Владимиров В.С. Уравнения математической физики / В.С. Владимиров. – 5-е издание. – М.: Наука, 1988. - 512 с.
12. Сугак Д.В. Принцип максимума Понтрягина для задачи оптимального управления системой эллиптического типа высокого порядка с фазовыми ограничениями / Д.В. Сугак // Вестник молодых ученых. Серия: Прикладная математика и механика. №3. – 2000. – с. 57 – 69.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pontryagin L.S. Matematicheskaja teorija optimal'nyh processov [Mathematical theory of optimal processes] / L.S. Pontryagin, V.G. Boltyansky, R.V. Gamkrelidze et al. – М.: Nauka, 1983. -392 p. [in Russian]
2. Mikhlin S.G. Linejnye uravnenija v chastnyh proizvodnyh [Linear partial differential equations] / S.G. Mikhlin. – М., Higher School, 1977. – 431 p. [in Russian]
3. Vekua I.N. Novye metody reshenija jellipticheskikh uravnenij [New methods for solving elliptic equations] / I.N. Vekua. – М.: Fizmatlit, 1948. -296 p [in Russian]
4. Muskhelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity] / N.I. Muskhelishvili. – М.: Nauka, 1966. -708 p. [in Russian]
5. Casas E. Second-Order and Stability Analysis for State-Constrained Elliptic Optimal Control Problems with Sparse Controls / E. Casas, F. Troltzsch // SIAM Journal on Control and Optimization. 2014. Vol. 52. -pp. 1010 - 1033.
6. Gugat M. Penalty Techniques for State-Constrained Optimal Control Problems with the Wave Equation / M. Gugat // SIAM Journal on Control and Optimization. 2010. Vol. 48. -pp. 3026 - 3051.
7. Casas E. Critical cones for sufficient second order conditions in PDE constrained optimization / E. Casas, M. Mateos // SIAM J. Optim. 2020. Vol. 30. -pp. 585 - 603
8. Bonnans J. Asymptotic Expansion for the Solutions of Control Constrained Semilinear Elliptic Problems with Interior Penalties / J. Bonnans, F.Silva // SIAM J. Control Optim. 2011. Vol. 49. -pp. 2494 - 2517.
9. Antil H. Optimal control of fractional elliptic PDEs with state constraints and characterization of the dual of fractional-order Sobolev spaces / H. Antil, D. Verma, M. Warma // Journal of optimization theory and applications. 2020. Vol. 186. -pp. 1 - 23.
10. Makarov B.M. Lekcii po veshhestvennomu analizu [Lectures on real analysis] / B.M. Makarov, A.N. Podkorytov. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. - 688 p [in Russian]
11. Vladimirov V.S. Uravnenija matematicheskoi fiziki [Equations of mathematical physics] / V.S. Vladimirov. - 5th edition. – Moscow: Nauka, 1988. - 512 p. [in Russian]
12. Sugak D.V. Princip maksimuma PONTRYAGINA dlja zadachi optimal'nogo upravlenija sistemoj jellipticheskogo tipa vysokogo porjadka s fazovymi ogranichenijami [Pontryagin maximum principle for optimal control of a high-order elliptic type system with phase constraints] / D.V. Sugak // Vestnik molodyh uchenyh. Serija: Prikladnaja matematika i mehanika [Bulletin of Young Scientists. Series: Applied Mathematics and Mechanics]. No. 3. – 2000. – pp. 57-69. [in Russian]

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.043>

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМ КОНТУРОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Научная статья

Болгова Е.А.*

ORCID: 0000-0002-0737-1846,

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

* Корреспондирующий автор (bolgova_katya6[at]mail.ru)

Аннотация

В работе представлена методика формирования точного решения задачи гидродинамического расчета трибосистемы с нестандартным, адаптированным к условиям трения опорным профилем ползуна и направляющей с металлическим покрытием. На основе использования уравнений: движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» с учетом сил инерции; уравнении неразрывности и уравнении, определяющего профиль расплавленного контура поверхности направляющей с металлическим покрытием, учитывая скорость механической энергии, получены аналитические зависимости для основных рабочих характеристик пары трения для экстремального и не экстремального случая.

Ключевые слова: гидродинамика, опора скольжения, расплавленная поверхность направляющей, адаптированный профиль, экстремальный случай.

IMPROVING THE DURABILITY OF PLAIN BEARER WITH NONLINEAR SHAPE AND METAL COVERING

Research article

Bolgova E.A.*

ORCID: 0000-0002-0737-1846,

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

* Corresponding author (bolgova_katya6[at]mail.ru)

Abstract

The work presents an adequate hydrokinetic calculation method of tribosystem with slide surface support profile and metal covered runner, adjusted to friction. Based on the following equations: ideal liquid movement for "thin layer", inertial force accounted for; continuity, metal covered runner surface fused shape profile, mechanical energy accounted for, - analytical dependence of basic working characteristics for friction pair for extreme and non-extreme cases was drawn out.

Keywords: fluid dynamicist, sliding support, runner fused surface, adjusted profile, extreme case.

Введение

Общезвестно, что работоспособность машин и механизмов в значительной степени зависит от конструкции узлов. Для обеспечения устойчивого гидродинамического режима смазывания в условиях смазочного голодания, особенно при пуске и выбегах, а также в случаях перекосов валов, можно обеспечить использованием новых моделей течения применяемых смазочных материалов с нестандартным опорным профилем подшипниковой втулки и металлическим или пористым покрытием рабочей поверхности. В современном машиностроении в качестве модели жидкого смазочного материала в опорах скольжения широко используются смазочные материалы, обладающие ньютоновскими и неньютоновскими реологическими свойствами, [1], [2], [12]. [13] а также смазочные материалы, обусловленные расплавом покрытия рабочих поверхностей. В приведенных расчетных моделях [14], [15], [23], [24] не учитывается влияние нелинейных факторов, кроме того рассматриваемые подшипники имеют традиционно линейный контур опорной поверхности. Разработанная расчётная модель подшипников скольжения, учитывающая нелинейные факторы и наличие расплава на одной из рабочих поверхностей, является одним из перспективных направлений современной трибологии. Данная статья посвящена исследованию выше изложенных особенностей, что является на наш взгляд актуальным.

Постановка задачи

Рассмотрим установившееся течение несжимаемой жидкости в рабочем зазоре нелинейной опоры скольжения. Предполагается, что нестандартная поверхность неподвижна, а опорное кольцо с металлическим покрытием движется со скоростью u^* (рис.1).

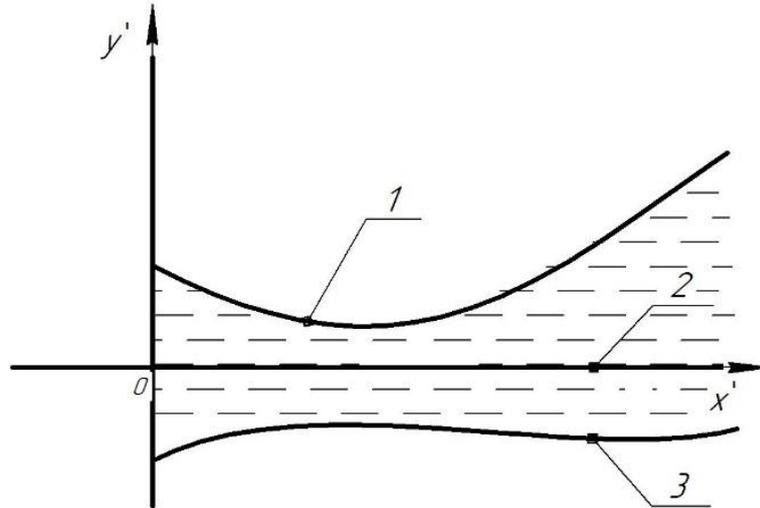


Рис. 1 – Схематичное изображение опоры скольжения:
 1 – адаптированный профиль; 2 – опорное кольцо (направляющая); 3 – профиль расплавленного контура
 металлического покрытия

Уравнение контуров: нелинейного опорного профиля, опорного кольца и расплавленной поверхности покрытия задается в виде:

$$1: y' = h_0 + x'tg\alpha - a'\sin\omega x'; 2: y' = 0; 3: y' = -\beta' f\left(\frac{x'}{l}\right) \quad (1)$$

Для решения используем общеизвестные уравнения: нелинейное уравнение течения жидкости для случая «тонкого слоя», уравнение неразрывности, а также уравнение описывающее расплавленный контур направляющей.

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial y'^2} &= \frac{dp'}{dx'} + \rho v_{x'} \frac{\partial v_{x'}}{\partial x'} + \rho v_{y'} \frac{\partial v_{x'}}{\partial y'}, \\ \frac{\partial v_{x'}}{\partial x'} + \frac{\partial v_{y'}}{\partial y'} &= 0, \quad u^* L' \frac{d\Phi'}{dx'} = -2\mu \int_{-\Phi' x'}^{h x'} \left(\frac{\partial v_{y'}}{\partial y'} \right)^2 dy' \end{aligned} \quad (2)$$

Переход к безразмерным величинам, для удобства решения задачи, осуществлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} v_{x'} &= u^* v, \quad v_{y'} = u^* \varepsilon u, \quad p' = p^* p, \quad x' = lx \\ y' &= h_0 y, \quad \varepsilon = \frac{h_0}{l}, \quad p^* = \frac{\mu u^* l}{h_0^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая (3) система уравнений (2) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{dp}{dx} + R_e \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \\ \frac{d\Phi}{dx} &= K \int_{-\Phi x}^{h x} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy \end{aligned} \quad (4)$$

где:

$$R_e = \frac{\rho u^* h_0^2}{\mu l}, \quad K = -\frac{2\mu u^* l}{L' h_0^2}, \quad \Phi(x) = \frac{\beta'}{h_0} \Phi' \left(\frac{x'}{l} \right), \quad h(x) = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x$$

$$\eta = \frac{\text{tg}\alpha}{h_0}, \quad \eta_1 = \frac{a'}{h_0}.$$

Система (4) решается с учетом граничных условий:

$$\begin{aligned} v = 0, u = 0 & \text{ при } y = h(x); \\ v = -1, u = 0 & \text{ при } y = -\Phi(x), \\ p(0) = p(1) & = \frac{p_a}{p^*}, \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим экстремальный случай, когда $L' \rightarrow \infty$ $\frac{d\Phi(x)}{dx} \rightarrow 0$,

Обозначим

$$v(x, y) = \frac{\partial \psi(x, y)}{\partial y} + V(x, y), \quad u(x, y) = -\frac{\partial \psi(x, y)}{\partial x} + U(x, y) \quad (6)$$

Тогда система (4) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 \psi \varepsilon}{\partial y^3} + \frac{\partial^2 v \varepsilon}{\partial y^3} = \frac{dp}{dx} + R_e \left[\left(\frac{\partial \psi \varepsilon}{\partial y} + V \varepsilon \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi \varepsilon}{\partial y} + V \varepsilon \right) + \right. \\ \left. + \left(-\frac{\partial \psi \varepsilon}{\partial y} + U \varepsilon \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \psi \varepsilon}{\partial y} + V \varepsilon \right) \right] \\ \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения системы (7) введем автомодальную переменную :

$$\xi = \frac{y + \frac{h_0^*}{h_0}}{H(x)},$$

$$\text{где } H(x) = \left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right) (1 + \tilde{\eta}x - \tilde{\eta}_1 \sin \omega x); \quad \tilde{\eta} = \frac{\eta}{1 + \frac{h_0^*}{h_0}}, \quad \tilde{\eta}_1 = \frac{\eta_1}{1 + \frac{h_0^*}{h_0}}$$

Тогда (6) примет вид:

$$\begin{aligned} v = 0, u = 0 & \text{ при } \xi = 1 \\ v = -1, u = 0 & \text{ при } \xi = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Используя известный метод Слезкина-Тарга, точное решение системы (7) с точностью до $O(R_e \tilde{\eta}^2), O(R_e \tilde{\eta}_1^2)$ ищется следующим аналитическим выражением:

$$\begin{aligned} \psi = \tilde{\psi}(\xi), \quad \tilde{V}(x, y) = \tilde{v}(\xi), \quad U(x, y) = \tilde{u}(\xi) \cdot H'(x), \\ \frac{dp}{dx} + (R_e \tilde{\eta} - R_e \tilde{\eta}_1 \omega \cos \omega x) \left(\frac{\alpha_1}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^2 \tilde{H}^3 x} + \frac{\alpha_2}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^2 \tilde{H}^2 x} + \frac{\alpha_3}{\tilde{H} x} \right) = \\ = \frac{\tilde{C}_1}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^2 \tilde{H}^2 x} + \frac{\tilde{C}_1}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^3 \tilde{H}^3 x} \end{aligned} \quad (9)$$

Где

$$\begin{aligned} \alpha_1 = -\int_0^1 \tilde{\psi}'^2 \varepsilon d\xi; \quad \alpha_2 = -\int_0^1 \tilde{v} \tilde{\psi}' \varepsilon + \tilde{v} \tilde{\psi}'' \varepsilon - \xi \tilde{u} \tilde{\psi}'' \varepsilon d\xi, \\ \alpha_3 = \int_0^1 \tilde{u} \tilde{v}' - \tilde{v} \tilde{v}' \xi d\xi, \quad A = R_e \tilde{\eta}, \quad \tilde{H} x = 1 + \tilde{\eta} x - \eta \sin \omega x \end{aligned}$$

Подставляя (9) в (7) с учетом (8) получим:

$$\begin{aligned} \psi = \tilde{\psi}(\xi), \quad \tilde{V}(x, y) = \tilde{v}(\xi), \quad U(x, y) = \tilde{u}(\xi) \cdot H'(x), \\ \tilde{\psi}''' \xi = \tilde{C}_2, \quad \tilde{u}'' \xi = \tilde{C}_1, \quad \tilde{u}' \varepsilon - \xi \tilde{v}' \varepsilon = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}' = 0, \quad \tilde{v} = 0, \quad \tilde{u} = 0 \quad \text{при } \xi=1; \\ \tilde{\psi} = 0, \quad \tilde{v} = -1, \quad u = 0 \quad \text{при } \xi=0; \end{aligned}$$

$$\int_0^1 \tilde{u} \xi d\xi = 0, \quad (11)$$

Решение задачи (10) – (11) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}' \xi = \frac{\tilde{C}_2}{2} \xi^2 - \xi, \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(1 - \frac{\tilde{C}_1}{2}\right) \xi - 1, \quad \tilde{C}_1 = -6 \\ \tilde{u} = -3\xi^3 + 4\xi^2 - \xi \end{aligned} \quad (12)$$

Для принятого нами приближения, уравнение, для гидродинамического давления, получим следующее аналитическое выражение:

$$\begin{aligned} p = \tilde{C}_1 \left[\frac{1}{2} \tilde{\eta} x^2 - \frac{1}{2} \tilde{\eta} x + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega x - 1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega x - 1 x \right] + \\ + R_e \tilde{\eta}_1 \sin \omega x - x \sin \omega \left[\frac{\alpha_1}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^2} + \frac{\alpha_2}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)} + \alpha_3 \right] \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом формул (12) и (13) для несущей способности и сил трения получим:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{\mu u^* l^2}{h_0^2} \int_0^1 \left(p - \frac{p_0}{p^x} \right) dx = \tilde{C}_1 \left[-\frac{\tilde{\eta}}{12} + \frac{\tilde{\eta} \sin \omega}{\omega^2} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega - 1 \frac{1}{2} \right] + \\
 &\quad + R_e \tilde{\eta}_1 \left(\frac{-\cos \omega - 1}{\omega} - \frac{\sin \omega}{2} \right) \left[\frac{\alpha_1}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^2} + \frac{\alpha_2}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)} + \alpha_3 \right] \\
 L_{TP} &= \frac{\mu u^* l^2}{h_0} \int_0^1 \left[\frac{\tilde{\psi}''}{H} \frac{0}{x} + \frac{\tilde{v}'}{H} \frac{0}{x} \right] dx = -\frac{\tilde{C}_2}{2} \int_0^1 \frac{1 - 2\tilde{\eta}x + 2\tilde{\eta}_1 \sin \omega x}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^2} dx + \\
 &\quad + 4 \int_0^1 \frac{1 - \tilde{\eta}x + \tilde{\eta}_1 \sin \omega x}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)} dx = -\frac{\tilde{C}_2}{2} \frac{\left(1 - \tilde{\eta} - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega - 1\right) dx}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)^2} + \\
 &\quad + 4 \frac{\left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega - 1\right)}{\left(1 + \frac{h_0^*}{h_0}\right)}
 \end{aligned} \tag{14}$$

В не экстремальном случае, то есть при промежуточных значениях L' для определения контура расплавленной поверхности, направляющей воспользуемся третьим уравнением системы (2), предварительно осредним интегрально по промежутку $-\Phi(x), h(x)$. Для нахождения функции характеризующей контур расплавленного покрытия получаем следующее уравнение:

$$\Phi(x) = \frac{h_0^*}{h_0} + K \int_0^x \frac{dx}{1 + \eta x + \Phi x} \tag{15}$$

Решая это уравнение методом последовательных приближений и полученное решение осредним по промежутку 0,1 будем иметь:

$$\int_0^1 \Phi(x) dx = \tilde{\alpha}^* K \tag{16}$$

Здесь $y = \tilde{\alpha}^* K$ - безразмерное уравнение расплавленного контура направляющей.

Заключительным этапом теоретических исследований является численный анализ полученных моделей. Анализ его результатов показал, что при учете числа Рейнольдса, толщины расплава покрытия и нестандартного опорного профиля, несущая способность, может быть повышена в диапазоне исследованных нагрузочно-скоростных режимов на 12-14%. При этом коэффициент трения снижается на 12-13%.

Экспериментальные исследования проводились с целью подтверждения эффективности и достоверности полученных теоретических моделей. В первом случае исследовалось металлическое покрытие, во втором дополнительно модифицированная опорная поверхность. Исследования проводились на стенде с использованием настольно-сверлильного станка (модель НС – 12). Покрытие поверхности опорного кольца из сплава Вуда (Ві – 50%, Рb – 25%, Sn – 12,5%, Со – 12,5%) имеющего температуру плавления $T \approx 68^\circ$.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов исследований подшипника скольжения с металлическим покрытием опорного кольца и нестандартным опорным профилем

№	Режим		Теоретические результаты		Экспериментальные исследования	
	σ МПа	v м/с	Металлическое покрытие	Покрытие с адаптированным профилем	Металлическое покрытие	Покрытие с адаптированным профилем
1	2	2	0,00215	0,00184	0,00234	0,00203
2	4		0,00191	0,00177	0,00214	0,00196
3	6		0,00122	0,00011	0,00143	0,00141
4	8		0,00145	0,00136	0,00167	0,00157
5	10		0,00165	0,00145	0,00181	0,00167

Анализ полученных результатов подтверждает эффективность теоретических моделей и доказывает преимущества исследованных подшипников, обеспечивающих повышение несущей способности и снижение коэффициента трения.

По результатам экспериментального исследования полученный гидродинамический режим характеризуется после приработки (колебания) коэффициент трения 0,0011 – 0,00215 независимо от условия нагружения. При этом величина износа не превысила 0,0095мм.

Обозначения

v'_x, v'_y – компоненты вектора скорости, p' – гидродинамическое давление, μ – динамический коэффициент вязкости, u^* – скорость скольжения направляющей, L' – удельная теплота плавления на единицу объема, h_0^* – заданная толщина расплава.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

- Mukutadze M. A. Working out of an analytical model of an axial bearing taking into account dependence of viscous characteristics of micropolar lubrication on pressure and temperature / M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, K. S. Solop // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – № 14. – Vol. 12.– pp. 4644-4650.
- Расчетная модель радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на микрополярной смазке с учетом ее вязкостных характеристик от давления / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова и др. // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4 (27). – С. 22.
- Расчетная модель упорного подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на неньютоновских смазочных материалах с адаптированной опорной поверхностью / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова и др. // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4 (27). – С. 23.
- Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки / М. А. Мукутадзе, Б. М. Флек, Н. С. Задорожная и др. // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3 (26). – С. 9.
- Akhverdiev K. S. Hydrodynamic calculation of a thrust plain bearing that operates with viscoelastic lubricant under turbulent friction conditions / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, I. S. Semenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2011. – № 4. – Vol. 40. – pp. 359-365.
- Стратифицированное течение трехслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью / К. С. О. Ахвердиев, А. Ч. Эркенов, Е. Е. Александрова и др. // В сборнике: Трибология и надежность. Сбор.научн. трудов X Международной конференции. Федеральное агентство ж.-д. трансп., ФГБОУ ВПО "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I", Межведомственный науч. совет по трибологии при РАН, Российский нац. ком. по трибологии; под общ. ред. К.Н. Войнова. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 15-24.
- Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью / К. С. Ахвердиев, Е. В. Александрова, Е. Е. Кручинина и др. // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (45). – Т. 10. – С. 217-223.
- Гидродинамический расчет радиального подшипника скольжения, работающего в турбулентном режиме трения при неполном заполнении зазора вязкоупругой смазкой / К. С. О. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, В. А. Замшин и др. // Вестник машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 11-17.
- Ахвердиев К.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом зависимости вязкости и электропроводимости от температуры / К. С. Ахвердиев, Е. О. Лагунова, М. А. Мукутадзе // Вестник Донского государственного технического университета. – 2009. – № 3 (42). – Т. 9.– С. 529-536.
- Математическая модель гидродинамической смазки бесконечно широких опор, работающих в турбулентном режиме на микрополярной смазке / К. С. Ахвердиев, А. Ю. Вовк, М. А. Мукутадзе и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. – № 9. – С. 12-15.

11. Мукутадзе М. А. Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки. Автореферат дис. доктора технических наук / РГУПС. Ростов-на-Дону, 2015.
12. Гидродинамический расчет радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на вязкопластичной смазке, обладающей микрополярными свойствами / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, А. Ю. Вовк и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 4 (32). – С. 131-138.
13. Математическая модель гидродинамической смазки радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на микрополярной смазке / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, М. А. Савенкова и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 1 (29). – С. 147-15.
14. Мукутадзе М. А. Гидродинамическая модель клиновидной опоры скольжения с легкоплавким металлическим покрытием / М. А. Мукутадзе, Д. У. Хасьянова, А. М. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2020. – № 4. – С. 51-58.
15. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal / M. A. Mukutadze, V. V. Vasilenko, A. M. Mukutadze et al. // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering. – 2019. – С. 012021.
16. Mukutadze M. A. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces / M. A. Mukutadze, A. M. Mukutadze, V. V. Vasilenko // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Novosibirsk, 2019. – pp. 012031.
17. Mukutadze M.A. Radial friction bearing with a fusible coating in the turbulent friction mode / M. A. Mukutadze, D. U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2019. – VOL. 48. – № 5. – PP. 421-430.
18. Akhverdiev K. S. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant / K. S. Akhverdiev, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Advances in Engineering Research. Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). – 2018. – PP. 246-253.
19. Mukutadze M. A. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature / M. A. Mukutadze, D. U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – VOL. 47. – № 4. – PP. 356-361.
20. Mukutadze M. A., Development of the design model of a hydrodynamic lubricating material formed during melting of the axial bearing, in the presence of forced lubrication / M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, V. V. Vasilenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – VOL. 47. – № 3. – PP. 271-277.
21. Mathematical model of a radial sliding bearing with a porous layer on its operating surface with a low-melting metal coating on shaft surface / K. S. Akhverdiev, E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020". – 2021. – PP. 012005
22. Кохановский В. А. Матричные материалы антифрикционных композитов / В. А. Кохановский, М. А. Мукутадзе // Вестник Донского государственного технического университета. 2001. – Т. 1. – № 2. – С. 51-56.
23. Lagunova E. O. Calculation of a radial slider bearing with a fusible coating / E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Journal of Friction and Wear. – 2019. – Т. 40. – № 1. – С. 88-94.
24. Mukutadze M. A. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature / M. A. Mukutadze, D. U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Т. 47. – № 4. – С. 356-361.
- Список литературы на английском языке / References in English**
1. Mukutadze M. A. Working out of an analytical model of an axial bearing taking into account dependence of viscous characteristics of micropolar lubrication on pressure and temperature / M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, K. S. Solop // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – № 14. – PP. 4644-4650.
2. Raschetnaja model' radial'nogo podshipnika skol'zhenija s povyshennoj nesushhej sposobnost'ju, rabotajushhego na mikropoljarnoj smazke s uchetom ee vjazkostnyh harakteristik ot davlenija. [Calculation model of a radial sliding bearing with increased bearing capacity, operating on a micropolar lubricant, taking into account its viscosity characteristics from pressure] / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova et al. // Inzhenernyj vestnik Dona. [Engineering vestnik of the Don]. – 2013. – No. 4 (27). – p. 22. [in Russian]
3. Raschetnaja model' upornogo podshipnika skol'zhenija s povyshennoj nesushhej sposobnost'ju, rabotajushhego na nen'jutonovskih smazochnyh materialah s adaptirovannoj opornoj poverhnost'ju [Calculation model of a thrust sliding bearing with increased bearing capacity, operating on non-Newtonian lubricants with an adapted bearing surface] / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova et al. // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering vestnik of the Don]. – 2013. – No. 4 (27). – p. 23. [in Russian]
4. Raschetnaja model' gidrodinamicheskoj smazki neodnorodnogo poristogo podshipnika konechnoj dliny, rabotajushhego v ustojchivom nestacionarnom rezhime trenija pri nalichii prinuditel'noj podachi smazki [Computational model of hydrodynamic lubrication of a nonuniform porous bearing of finite length operating in a stable non-stationary friction mode in the presence of forced lubrication supply] / M. A. Mukutadze, B. M. Fleck, N. S. Zadorozhnaya et al. // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering vestnik of the Don]. – 2013. – No. 3 (26). – p. 9. [in Russian]
5. Akhverdiev K. S. Hydrodynamic calculation of a thrust plain bearing that operates with viscoelastic lubricant under turbulent friction conditions / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, I. S. Semenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2011. – Vol. 40. – № 4. – PP. 359-365.
6. Stratificirovannoe techenie trehslojnoj smazki v zazore upornogo podshipnika, obladajushhego povyshennoj nesushhej sposobnost'ju [Stratified flow of a three-layer lubricant in the gap of a thrust bearing with increased bearing capacity] / K. S. O. Akhverdiev, A. Ch. Erkenov, E. E. Alexandrova et al. // In the collection: Tribology and reliability. Collection of scientific papers of the X International Conference. Federal Agency of Railway Transport, St. Petersburg State University of Railways of

Emperor Alexander I, Interdepartmental Scientific. Council on Tribology at the Russian Academy of Sciences, Russian National Com. on tribology; under the general editorship of K.N. Voynov. – Saint Petersburg, 2010. – pp. 15-24. [in Russian]

7. Stratificirovanoe techenie dvuslojnoj smazki v zazore upornogo podshipnika, obladajushhego povyshennoj nesushhej sposobnost'ju [Stratified flow of a two-layer lubricant in the gap of a thrust bearing with increased bearing capacity] / K. S. Akhverdiev, E. V. Alexandrova, E. E. Kruchinina et al. // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Vestnik of the Don State Technical University]. – 2010. – Vol. 10. – No. 2 (45). – pp. 217-223. [in Russian]

8. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika skol'zhenija, rabotajushhego v turbulentnom rezhime trenija pri nepolnom zapolnenii zazora vjzokouprugoj smazkoj [Hydrodynamic calculation of a radial sliding bearing operating in a turbulent friction mode with incomplete filling of the gap with viscoelastic lubricant] / K. S. O. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, V. A. Zamshin et al. // Vestnik of Mechanical Engineering. – 2009. – No. 7. – pp. 11-17. [in Russian]

9. Akhverdiev K. S. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika pri nalichii jelektromagnitnogo polja s uchetom zavisimosti vjzskosti i jelektroprovodimosti ot temperatury [Hydrodynamic calculation of a radial bearing in the presence of an electromagnetic field taking into account the dependence of viscosity and electrical conductivity on temperature] / K. S. Akhverdiev, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Vestnik of the Don State Technical University]. – 2009. – Vol. 9. – No. 3 (42). – pp. 529-53. [in Russian]

10. Matematicheskaja model' gidrodinamicheskij smazki beskonečno širokih opor, rabotajushhij v turbulentnom rezhime na mikropoljarnoj smazke [Mathematical model of hydrodynamic lubrication of infinitely wide supports operating in turbulent mode on micropolar lubrication] / K. S. Akhverdiev, A. Yu. Vovk, M. A. Mukutadze et al. // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2007. – No. 9. – pp. 12-15. [in Russian]

11. Mukutadze M. A. Razrabotka sistemy raschetnyh modelej podshipnikov skol'zhenija na osnove razvitiya gidrodinamicheskij i reodinamicheskij teorii smazki [Development of a system of calculation models of sliding bearings based on the development of the hydrodynamic and rheodynamic theory of lubrication] M. A. Mukutadze abstract dis. Doctors of Technical Sciences / Rostov-on-Don, 2015. [in Russian]

12. Gidrodinamicheskij raschet radial'nogo podshipnika, rabotajushhego v nestacionarnom rezhime na vjzokoplastichnoj smazke, obladajushhej mikropoljarnymi svojstvami [Hydrodynamic calculation of a radial bearing operating in a non-stationary mode on a viscoplastic lubricant with micropolar properties] K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, A. Yu. Vovk et al. // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. [Vestnik of the Rostov State Transport University]. – 2008. – No. 4 (32). – pp. 131-138. [in Russian]

13. Matematicheskaja model' gidrodinamicheskij smazki radial'nogo podshipnika, rabotajushhego v nestacionarnom rezhime na mikropoljarnoj smazke [Mathematical model of hydrodynamic lubrication of a radial bearing operating in non-stationary mode on micropolar lubrication] / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, M. A. Savenkova et al. // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. [Vestnik of the Rostov State Transport University]. – 2008. – No. 1 (29). – pp. 147-15. [in Russian]

14. Mukutadze M. A. Gidrodinamicheskaja model' klinovidnoj opory skol'zhenija s legkoplavkim metallicheskim pokrytiem [Hydrodynamic model of a wedge-shaped sliding support with a fusible metal coating] / M. A. Mukutadze, D. U. Khasyanova, A. M. Mukutadze // Problems of mechanical engineering and machine reliability. – 2020. – No. 4. – pp. 51-58. [in Russian]

15. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal / M. A. Mukutadze, V. V. Vasilenko, A. M. Mukutadze et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – pp. 012021.

16. Mukutadze M. A. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces / M. A. Mukutadze, A. M. Mukutadze, V. V. Vasilenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Novosibirsk, 2019. – C. 012031.

17. Mukutadze M. A. Radial friction bearing with a fusible coating in the turbulent friction mode / M. A. Mukutadze, D. U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2019. – Vol. 48. – № 5. – Pp. 421-430.

18. Akhverdiev K. S. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant / K. S. Akhverdiev, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Advances in Engineering Research. Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). – 2018. – PP. 246-253.

19. Mukutadze M. A. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature / M. A. Mukutadze, D. U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Vol. 47. – № 4. – PP. 356-361.

20. Mukutadze M. A., Development of the design model of a hydrodynamic lubricating material formed during melting of the axial bearing, in the presence of forced lubrication / M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, V. V. Vasilenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Vol. 47. – № 3. – PP. 271-277.

21. Mathematical model of a radial sliding bearing with a porous layer on its operating surface with a low-melting metal coating on shaft surface / K. S. Akhverdiev, E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Cep. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020". – 2021. – PP. 012005

22. Kohanovsky V. A. Matrichnye materialy antifrikcionnyh kompozitov [Matrix materials of antifriction composite] / V. A. Kohanovsky, M. A. Mukutadze // Vestnik of the Don State Technical University. – 2001. – Vol. 1. – No. 2. – pp. 51-56. [in Russian]

23. Lagunova E. O. Calculation of a radial slider bearing with a fusible coating / E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Journal of Friction and Wear. – 2019. – Vol. 40. – № 1. – pp. 88-94.

24. Mukutadze M. A. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature / M. A. Mukutadze, D. U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Vol. 47. – № 4. – pp. 356-361

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.044>

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

Бормотов А.Н.*

ORCID: 0000-0001-7069-6603,

Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

* Корреспондирующий автор (aleks21618[at]yandex.ru)

Аннотация

В работе показан вклад вида и гранулометрического состава наполнителя в результат получения требуемых эксплуатационных показателей композитов специального назначения. Исследованы критерии, влияющие на качество наполнителя, на его функциональную принадлежность. Установлены необходимые и достаточные критерии формирования оптимального гранулометрического состава функционально отобранных наполнителей, позволяющие получать композиты с заданными параметрами структуры и свойств. Предложенные методики апробированы при разработке практической технологии получения радиационно-защитных композитов с заданными эксплуатационными свойствами на основе оптимального гранулометрического состава различных фракций полиминерального отхода после химической полировки стекла.

Ключевые слова: композиционные материалы, математическое моделирование, оптимальная структура, оптимизация свойств.

OPTIMIZATION OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF COMPOSITE MATERIALS

Research article

Bormotov A. N.*

ORCID: 0000-0001-7069-6603,

Penza State Technological University, Penza, Russia

* Corresponding author (aleks21618[at]yandex.ru)

Abstract

The article shows the impact of type and granulometric composition of filler to the obtaining the required performance indicators of special-purpose composites. The research studies criteria that influence the quality of filler, its functional belonging. The necessary and sufficient criteria for the formation of an optimal granulometric composition of functionally selected fillers, allowing to obtain composites with specified parameters of structure and properties, have been established. The proposed methods have been tested in the development of a practical technology for producing radiation-shielding composites with specified performance properties on the basis of the optimal granulometric composition of various fractions of polymineral waste after chemical glass polishing.

Keywords: composite materials, mathematical modeling, optimal structure, optimization of properties.

Введение

Модернизация традиционных технологий и усовершенствование новых, основанных на использовании значительных нагрузок, а также интенсивное использование агрессивных химических веществ, заставляет создавать и совершенствовать эффективные и долговечные строительные материалы и композиты, гарантирующие безопасность окружающей среды и эффективность производств. Наибольшую актуальность в настоящее время приобретает экологическая безопасность различных промышленных и бытовых захоронений, локализация аварий, купирование и инкапсуляция опасных отходов, защита оборудования и персонала от неблагоприятного воздействия окружающей среды. Решение этих проблем связано с созданием и совершенствованием эффективных строительных композитов со строго заданными свойствами и параметрами структуры.

Такая задача невозможна без учета многих экологических критериев, характеристик материала, параметров структуры и свойств, особенностей технологии и рецептуры, то есть композит должен быть рассмотрен системно, как сложную техническую систему, которая имеет управляемые параметры и испытывает различные экстремальные воздействия.

В связи с тем, в композитах наполнители и заполнители могут занимать до 95% объема материала, данные фракции оказывают важнейшее влияние на эксплуатационные свойства композиционных материалов. Поэтому оптимизация гранулометрического состава – это один из основных способов управления эксплуатационными свойствами композитов и параметрами их структуры.

Методы и принципы исследования

В качестве основного наполнителя и заполнителя для композитов с экстремальными свойствами (свехтяжелые для защиты от радиации) принимались отходы производства оптического стекла (ОПОС) марки ТФ-110 со средней плотностью $\rho_0 = 5100 \text{ кг/м}^3$, состоящие в % по массе: $\text{As}_2\text{O}_3 - 0,30$; $\text{Na}_2\text{O} - 0,50$; $\text{K}_2\text{O} - 1,27$; $\text{Si}_2\text{O} - 27,00$; $\text{PbO} - 70,93$. Характеристика гранулометрического состава ОПОС: фракция 5,0-2,5 мм – 1 м²/кг; фракция 2,5-1,25 мм – 3 м²/кг; фракция 1,25-0,63 мм – 5 м²/кг; фракция 0,63-0,315 мм – 14 м²/кг; фракция 0,315-0,14 – 42 м²/кг; фракция 0,14-дно – 100 м²/кг.

В качестве наполнителя для контрольных составов применяли строительный кварцевый песок по ГОСТ 8736-2014 с плотностью 2650 кг/м³, удельной поверхностью 31,5 м²/кг и модулем крупности 1,6 [1].

При изучении эксплуатационных и физико-механических свойств композитов применяли современные методы исследований, основанные на достижениях физической химии, физики и действующих нормативно-технических документов.

Удельную поверхность определяли на приборе ПСХ-10М по методике, изложенной в [2].

Определение плотности проводили с использованием метода гидростатического взвешивания по [3].

Насыпную плотность заполнителей и наполнителей определяли, просыпая их через воронку специальной конструкции и взвешивая затем определённый объём материала [4].

Гранулометрический состав определяли ситовым анализом [5]. Этот метод заключается в разделении определённой навески материала по фракциям путём просева через набор стандартных сит и определении остатка на каждом из них, выраженного в процентах. Размер ячеек, в мм: 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14.

При подборе оптимального гранулометрического состава был использован шеститочечный симплекс-решётчатый план второго порядка. Результатом анализа эксперимента, выполненного по такому плану, является построение концентрационного треугольника Гиббса-Розенбома, позволяющему установить корреляционную зависимость между составом и свойствами смеси наполнителей и заполнителей.

Регрессионный анализ таких моделей выполняют с проверки гипотез о равенстве нулю отдельных коэффициентов. Данная проверка выполняется по критерию Стьюдента [6]. Это позволяет исключить незначимые коэффициенты из модели, которые обусловлены ошибками эксперимента. Это упрощает модель и сокращает «информационный шум». Сравнивая абсолютное значение коэффициента с доверительным интервалом, можно определить значимые коэффициенты, получив уточнённое уравнение регрессии со значимыми коэффициентами.

Далее проверяется адекватность модели экспериментальным данным, по которым она построена. Данная проверка выполняется по критерию Фишера [6]. Проверка адекватности сводится к проверке нуль-гипотезы о равенстве истинной дисперсии, обусловленной неадекватностью модели, и истинной дисперсии, соответствующей совокупности экспериментальных величин в любой точке [6].

Основные результаты

Мастикой называют, определенным образом подобранную и интенсивно перемешанную, смесь вяжущего (связующего), наполнителя (заполнителя) и различных модификаторов, которая в результате различных процессов твердеет и образует камневидное тело. Именно от свойств и характеристик мастики зависят физико-механические и эксплуатационные свойства материалов. Следовательно, мастики в композитах должны обладать наилучшими реологическими и физико-механическими свойствами.

В теории композиционных материалов доказано [7], [8], [9], что важнейшими показателями, оказывающими влияние на свойства дисперсно-упрочненных композитов, являются вид, дисперсность и объёмная доля наполнителя. Причем зависимость показателей структуры композита от указанных факторов имеет экстремальный характер (закон створа). Например, для получения материалов, стойких в сильно агрессивных средах или при действии ионизирующих излучений, необходимо учитывать устойчивость компонентов композита к действию агрессивной среды. Также стойкостью должны обладать и наполнитель, и вяжущее, и соединения, которые образуются на границе раздела фаз при их взаимодействии [10].

Таким образом, для радиационно-защитных материалов необходимо использовать наполнители, которые эффективно поглощают ионизирующее излучение; для радиационно-стойких композитов необходимо использовать такие минералы, которые поглощают малое количество энергии ионизирующих излучений, и поэтому имеют малые структурные изменения, что и делает их радиационно-стойкими; кислотостойкие композиты должны использовать в качестве наполнителя минералы, стойкие к воздействию растворов кислот различной концентрации и температуры; термостойкие композиты должны наполняться термостойкими наполнителями и т.д.

Некоторые исследователи [11], [12], [13] предлагают использовать непрерывный фракционный состав наполнителей или упрочняющих (армирующих) элементов. Такой подход имеет ряд технико-экономических достоинств, однако при заполнении пустот более мелкой фракцией, образованных более крупной фракцией, неизбежно произойдёт раздвижка более крупных зёрен, отразится на увеличении пористости и количества вяжущего. При создании композитов повышенной плотности для экстремальной защиты такой подход не эффективен.

В работе [8] доказано, что прерывистый гранулометрический состав эффективней, чем непрерывная гранулометрия.

На сегодняшний день есть множество теорий и методик подбора гранулометрического состава, что говорит об отсутствии у исследователей единого взгляда на данную проблему.

В данной работе авторы обобщают экспериментальный и практический опыт создания высокоплотных композитов. В основе методологии получения смеси наполнителей с наименьшей пористостью и наибольшей насыпной плотностью лежит идея прерывистой гранулометрии. Оптимизация состава выполнялась методами планирования эксперимента. При выборе факторов математического плана и их пределов варьирования была использована гипотеза компоновать многофракционные смеси так, чтобы соотношение диаметров зёрен смежных фракций было в пределах 1:4 – 1:5. При таком соотношении фракций максимально возможный объём пустот, образуемый более крупной фракцией, заполняется более мелкой фракцией практически без последующей раздвижки зёрен. Поэтому в качестве факторов математического плана были выбраны следующие фракции: $X_1 = < 0,14$ мм; $X_2 = 0,315 - 0,63$ мм; $X_3 = 1,25 - 2,5$ мм, соотношение диаметров которых $d_3 : d_2 : d_1 = 4$.

При выборе интервалов варьирования факторов X_1, X_2, X_3 учитывали то, что в природном состоянии в песках или в других сыпучих материалах количество средних фракций в 1,5-2 раза больше, чем количество крупных и мелких фракций. Такое же количественное соотношение было принято и между фракциями X_1, X_2 и X_3 .

При сплошном заполнении объёма, когда отдельные зёрна наполнителей касаются друг друга (непосредственно или через прослойки связующего), дальнейшее уменьшение пустотности и сокращение расхода связующего в объёме возможно лишь за счёт размещения зёрен меньших размеров в пустотах предыдущей фракции. Такое уплотнение

структуры сопровождается заметным упрочнением макроструктуры в результате увеличения числа контактов отдельных зёрен в объёме изделия. Поэтому справедливо предположить, что смесь, имеющая минимальную пустотность без связующего, сохранит минимальную пустотность и после совмещения с полимерной матрицей. Исходя из этого предположения, достаточно оптимизировать гранулометрический состав по насыпной плотности.

Для проведения эксперимента был выбран симплекс-решётчатый план второго порядка, позволяющий построить полное квадратичное уравнение регрессии вида:

$$Y = A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + A_3 \cdot X_3 + A_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + A_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + A_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

где $A_1, A_2, A_3, A_{12}, A_{13}, A_{23}$ – статистические величины, определяемые по экспериментальным данным;

$$X_1 = \begin{cases} 0,5 = 15 V \\ 1 = 30 V \end{cases} \text{ – фракция } < 0,14 \text{ как фактор математического плана;}$$

$$X_2 = \begin{cases} 0,5 = 28 V \\ 1 = 36 V \end{cases} \text{ – фракция } 0,315 - 0,63 \text{ как фактор математического плана;}$$

$$X_3 = \begin{cases} 0,5 = 10 V \\ 1 = 20 V \end{cases} \text{ – фракция } 1,25 - 2,5 \text{ как фактор математического плана.}$$

Расчёты коэффициентов уравнения регрессии (1), функции дисперсии предсказания и проверка адекватности уравнения выполнены по стандартной методике [6].

Окончательное уравнение регрессии имеет вид:

$$\rho \ X_1 X_2 X_3 = 7,87 \cdot X_1 + 7,89 \cdot X_2 + 7,9 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,02 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (2)$$

По уравнению (2) был построен концентрационный треугольник Розенбома (рис. 1). Как видно из рис. 1, оптимальное соотношение фракций наполнителя и заполнителя составляет $X_1:X_3 = 2:3$ по объёму. При этом фракция $< 0,14$ мм выступает в качестве наполнителя, а фракция $1,25-2,5$ мм – в качестве заполнителя. Отсутствие предполагаемой средней фракции можно объяснить тем, что при свободной укладке зёрна средней фракции, располагаясь между зёрнами крупной фракции, несколько раздвигают их, увеличивая пустотность смеси. В идеализированной смеси, состоящей из шаровидных частиц одной крупности, объём пустот, как известно, не зависит от размера частиц и изменяется в пределах от 47,6 до 25,9% в зависимости от взаимного расположения частиц.

При анализе рисунка 1 установлено, что пустотность реальных полифракционных смесей зависит от отношения размеров предыдущей и последующей фракции, а также от числа фракций. Наименьшая пустотность смесей реализуется при двух фракциях с соотношением диаметров 1:16 и не превышает 16% (отношение $X_1:X_3 = 1:16$).

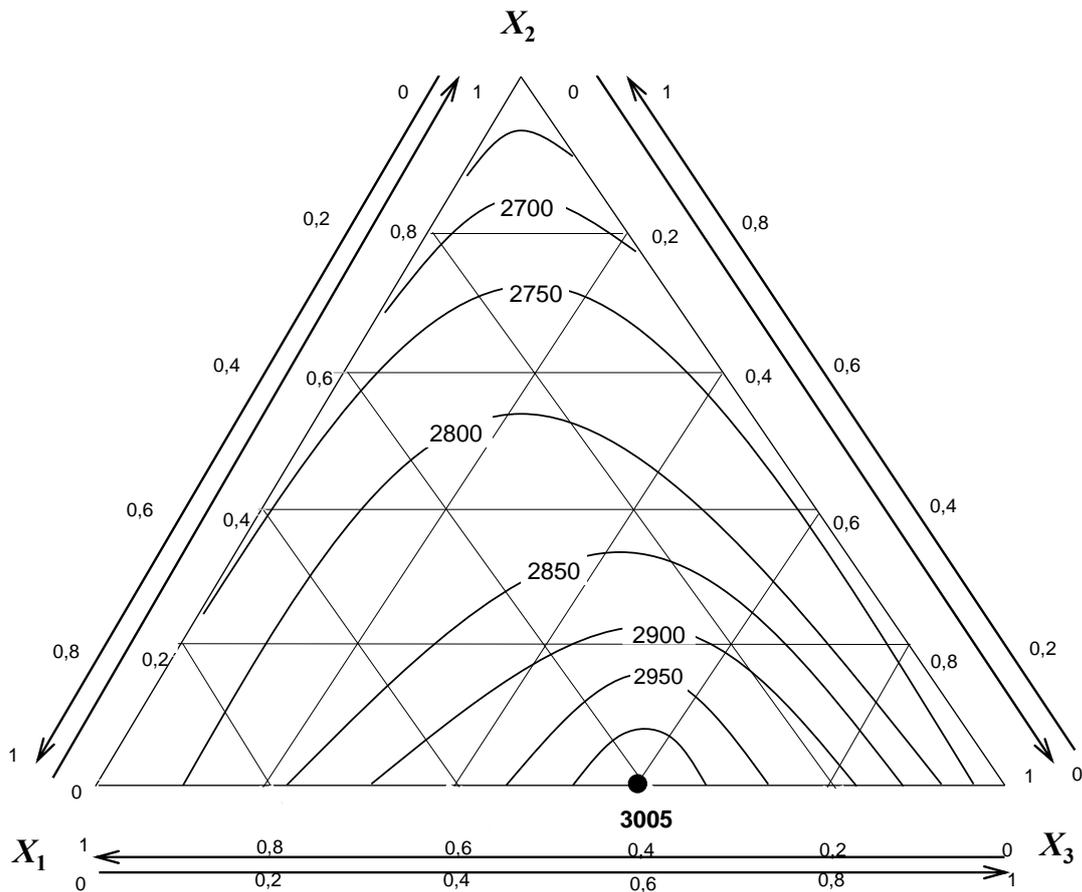


Рис. 1 – Зависимость насыпной плотности от гранулометрического состава

Теоретическая максимальная насыпная плотность, рассчитанная по уравнению (2), составляет 3005 кг/м^3 , при пустотности 15,85 %, а практическая максимальная насыпная плотность, полученная в ходе эксперимента, равна 2995 кг/м^3 при пустотности 16%. Как видно из приведенных данных, ошибка эксперимента составляет 0,33%.

На основании выше сказанного, можно сделать вывод, что наиболее пригодным для получения особо плотных композитов для защиты от радиации или действия химически агрессивных сред является двухфракционная смесь наполнителей ТФ-110 с соотношением фракций: $< 0,14:1,25-2,5 = 2:3$.

Обсуждение

Необходимо отметить, что химический состав наполнителя (заполнителя) для композиционных материалов, стойких к действию особо агрессивных сред, является не единственным условием высоких эксплуатационных свойств и долговечности композитов. Кроме указанного, наполнители должны: хорошо смачиваться вяжущим (связующим); быть инертным к вяжущему или образовывать соединения, более устойчивые в агрессивных средах, чем исходные компоненты; иметь близкий по значению с матрицей вяжущего температурный коэффициент линейного расширения; иметь модуль упругости, характерный для твердых тел с вязким разрушением; обладать достаточной стойкостью к нагрузкам и эксплуатационным воздействиям.

Однако, наполнителя, обладающего всей совокупностью указанных свойств одновременно, скорее всего, не существует. Применяемые в практике строительного материаловедения наполнители и заполнители обладают лишь частью указанных свойств. В этой связи можно использовать комплексные наполнители или смеси наполнителей, где каждый компонент таких смесей позволяет регулировать либо отдельный процесс структурообразования, либо формирование определенных эксплуатационных свойства материала. В качестве примера таких комплексных наполнителей можно привести: смеси минералов, оптимально сочетающие химические элементы большой и малой атомной массы (смесь барита и угольной сажи, смесь барита и магнетита, смесь отходов тяжелых флюитов, смесь отходов производства оптических стекол и др.) [14].

В значительной степени разрешить данное противоречие позволяет системный подход к подбору наполнителя и его гранулометрического состава. А именно, необходимо осуществлять выбор вида и гранулометрического состава наполнителя из специально отобранных групп минералов, удовлетворяющим заданным функциональным требованиям. В качестве критериев отбора необходимо использовать значимые рецептурно-технологические факторы, оказывающие влияние на основные структурно-чувствительные свойства композита.

Основные структура и свойства композитов зависят от большого множества рецептурно-технологических параметров. В работе [15] на примере радиационно-защитных композитов выполнена классификация и декомпозиция факторов, построена иерархическая структура критериев и показана возможность их учета при синтезе композитов с заданными параметрами. Практическое использование необходимых закономерностей основывается на принципе Парето: примерно 20% рецептурно-технологических параметров определяют примерно 80% качества структуры и

свойств композитов [16]. Данный подход позволяет выявить группы значимых рецептурно-технологических параметров, которые оказывают определяющее влияние на структуру и свойства композита.

Известно, что композиты от механических смесей минералов и различных веществ отличаются наличием четкой границы раздела фаз и её определяющим влиянием на процессы структурообразования [17]. Качество структуры композитов оценивается интегральным показателем макроскопической прочности материала, которая зависит от площади поверхности раздела фаз, которая, в свою очередь, определяется объемной степенью наполнения и дисперсностью частиц наполнителя. Кроме того, эти же факторы влияют на экономическую эффективность наполнителя, а именно: увеличение объемной степени наполнения, с одной стороны, снижает расход вяжущего, а увеличение удельной поверхности наполнителя, с другой стороны, сопровождается возрастанием энергозатрат на его измельчение [17].

В этой связи, для эффективной практической технологии получения композитов с заданными эксплуатационными свойствами необходимо и достаточно именно для указанных рецептурно-технологических факторов установить зависимости их совместного влияния на параметры структуры и свойств композита (например, плотность, прочность и т.д.).

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов. Наполнители и заполнители оказывают определяющее влияние на формирование структуры и эксплуатационных свойств композитов. Все многообразие минералов и потенциальных наполнителей необходимо разделять на функциональные группы, исходя из их пригодности для выполнения заданных функций. Для подбора оптимального гранулометрического состава достаточно использовать самые значимые критерии, которые определяются в результате декомпозиции и анализа иерархической структуры рецептурно-технологических параметров, оказывающих определяющее влияние на параметры качества структуры композитов или их эксплуатационные показатели. Для композитов, стойких к действию ионизирующих излучений и агрессивных сред такими критериями являются объемная степень наполнения, удельная поверхность наполнителя, соотношение диаметров фракций наполнителя и их соотношение между собой. Учет указанных критериев позволит получать оптимальные гранулометрические составы из функциональных групп наполнителей, что, в свою очередь, является необходимым условием получения эффективных композитов с заданными параметрами структуры и свойств.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. – М.: ФГУП "ВНИИПИИСтромсырье", 2015.
2. ГОСТ 21043-87 (СТ СЭВ 5499-86). Руды железные и концентраты. – М.: Издательство стандартов, 1987.
3. ГОСТ 15139-69 (СТ СЭВ 891-78). Методы определения плотности (объемной массы). – М.: Издательство стандартов, 1981.
4. ГОСТ 11035.1-93. Определение насыпной плотности формовочного материала, который просыпается через специальную воронку. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1995.
5. ГОСТ 2093-82. Ситовый метод определения гранулометрического состава. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
6. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. / Вознесенский В.А. и др. – Киев, 1989. – 119 с.
7. Соломатов В. И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов // Материалы юбилейной конференции: Успехи строительного материаловедения. – М.: МИИТ, 2001. – С. 41-56.
8. Моделирование процессов структурообразования дисперсных систем / А. П. Прошин, А. М. Данилов, А. Н. Бормотов и др. // Труды Международной конференции: Идентификация систем и задачи управления SICPRO'05 – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. – С. 700-724.
9. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение: Учеб. пособие для строит. спец. Вузов / И. А. Рыбьев. – М.: Высш. шк., 2002. – 701 с.
10. Бормотов А. Н. Моделирование влияния модифицирующих добавок на реологические показатели композитов / А. Н. Бормотов, А. А. Горохова // Международный научно-исследовательский журнал. – №4 (106). – Часть 1. – 2021. – С. 51-56. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.008.
11. Keon-SooJang Mechanics and rheology of basalt fiber-reinforced polycarbonate composites / Keon-SooJang // Polymer. – 2018. – Vol. 147. – Pp. 133-141. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.06.004.
12. Fuchs L. Numerical modeling of the effect of composite rheology on internal deformation in down-built diaphragms / L. Fuchs, H. Koyi, H. Schmeling / Tectonophysics. – 2015. – Vol. 646. – Pp. 79-95. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.01.014.
13. Tang Z. Optimization of rheological parameters and mechanical properties of Engineered Cementitious Composites (ECC) using regression-based models / Z. Tang, Ch. Litina, A. Al-Tabbaa / Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 310. – P. 125281. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125281.
14. Бормотов А. Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин, Е. В. Королев: монография. – Пенза, Изд-во ПГТА, 2011. – 352 с.
15. Разработка и управление качеством строительных материалов с регулируемой структурой и свойствами для защиты от радиации / А. П. Прошин, А. М. Данилов, А. Н. Бормотов и др. // Труды II Международной конференции: Идентификация систем и задачи управления SICPRO'03 – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2003. – С. 2437-2460.

16. Принцип Парето в управлении качеством материалов. / А. П. Прошин, А. Н. Бормотов, А. М. Данилов и др. // Изв. вузов. Строительство. – Новосибирск, 2002. – №11 – С. 42-48.

17. Синергетика композиционных материалов. / А. П. Прошин, А. Н. Бормотов, А. М. Данилов и др. – Липецк: НПО ОРИУС, 1994. – 152 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST 8736-2014. Pesok dlya stroitel'nyh rabot [Sand for construction work]. – М.: FGUP "VNIPIIstromsyre", 2015. [in Russian]

2. GOST 21043-87 (ST SEV 5499-86). Rudy zheleznye i koncentraty [Iron ores and concentrates]. – М.: Publishing house of standarts, 1987. [in Russian]

3. GOST 15139-69 (ST SEV 891-78). Metody opredeleniya plotnosti (ob'emnoj massy) [Methods for determining density (bulk mass)]. – М.: Publishing House of Standards, 1981. [in Russian]

4. GOST 11035.1-93. Opredelenie nasypnoj plotnosti formovochного материала, kotoryj prosypaetsya cherez special'nyuyu voronku [Determination of the bulk density of the molding material that wakes up through a special funnel]. – М.: ИПК Publishing House of Standards, 1995. [in Russian]

5. GOST 2093-82. Sitovyy metod opredeleniya granulometricheskogo sostava [The sieve method for determining the granulometric composition]. – М.: ИПК Publishing House of Standards, 2001. [in Russian]

6. Chislennyye metody resheniya stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach na EVM [Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer] / Voznesenskij V. A. et al. – Kiev, 1989. – 119 p. [in Russian]

7. Solomatov V. I. Elementy obshchej teorii kompozicionnyh stroitel'nyh materialov [Elements of the general theory of composite building materials] / V. I. Solomatov // Materialy yubilejnoj konferencii: Uspekhi stroitel'nogo materialovedeniya [Materials of the jubilee conference: Successes of construction materials science]. – М.: МИИТ, 2001. – Pp. 41-56. [in Russian]

8. Modelirovanie processov strukturoobrazovaniya dispersnyh sistem [Modeling of the processes of structure formation of dispersed systems] / A. P. Proshin, A. M. Danilov, A. N. Bormotov et al. // Trudy Mezhdunarodnoj konferencii: Identifikaciya sistem i zadachi upravleniya SICPRO`05 [Proceedings of the International Conference: Identification of systems and management tasks SICPRO`05]. – М.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova, 2004. – Pp. 700-724.

9. Ryb'ev I. A. Stroitel'noe materialovedenie: Ucheb. posobie dlya stroit. spec. vuzov [Construction materials science: Textbook for construction specialties of universities] / I. A. Ryb'ev. – М.: Vyssh. shk., 2002. – 701 p. [in Russian]

10. Bormotov A. N. Modelirovanie vliyaniya modifiziruyushchih dobavok na reologicheskie pokazateli kompozitov [Modeling of the effect of modifying additives on the rheological parameters of composites] / A. N. Bormotov, A. A. Gorohova // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Scientific Research Journal]. – No 4 (106). – Part 1. – 2021. – Pp. 51-56. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.008. [in Russian]

11. Keon-SooJang Mechanics and rheology of basalt fiber-reinforced polycarbonate composites / Keon-SooJang // Polymer. – 2018. – Vol. 147. – Pp. 133-141. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.06.004.

12. Fuchs L. Numerical modeling of the effect of composite rheology on internal deformation in down-built diapers / L. Fuchs, H. Koyi, H. Schmeling / Tectonophysics. – 2015. – Vol. 646. – Pp. 79-95. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.01.014.

18.13. Tang Z. Optimization of rheological parameters and mechanical properties of Engineered Cementitious Composites (ECC) using regression-based models / Z. Tang, Ch. Litina, A. Al-Tabbaa / Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 310. – P. 125281. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125281.

14. Bormotov A. N. Matematicheskoe modelirovanie i mnogokriterial'nyj sintez kompozicionnyh materialov [Mathematical modeling and multicriteria synthesis of composite materials] / A. N. Bormotov, I. A. Proshin, E. V. Korolev : monografiya. – Penza, Publishing House PGTA, 2011. – 352 p. ISBN: 978-5-98903-159-7. [in Russian]

15. Razrabotka i upravlenie kachestvom stroitel'nyh materialov s reguliruemymi strukturami i svoystvami dlya zashchity ot radiacii [Development and quality management of building materials with regulated structure and properties for protection from radiation] / A. P. Proshin, A. M. Danilov, A. N. Bormotov et al. // Trudy II Mezhdunarodnoj konferencii: Identifikaciya sistem i zadachi upravleniya SICPRO`03 [Proceedings of the II International Conference: Identification of systems and management tasks SICPRO`03] – М.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2003. – Pp. 2437-2460.

16. Princip Pareto v upravlenii kachestvom materialov [Pareto principle in materials quality management]. / A. P. Proshin, A. N. Bormotov, A. M. Danilov et al. // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. – Novosibirsk, 2002. – №11. – Pp. 42-48. [in Russian]

17. Синергетика композиционных материалов [Synergetics of composite materials] / A. N. Bobryshev, V. N. Kozomazov, L. O. Babin et al. – Липецк: НПО ОРИУС, 1994. – 152 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.045>

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МАСТЕР-ДААННЫМИ В БАНКОВСКОЙ СФЕРЕ

Научная статья

Бубекова А.Г.^{1,*}, Гантц И.С.²

^{1,2} Российский технологический университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (aleks21618[at]yandex.ru)

Аннотация

В работе рассматриваются особенности управления основными данными компании, которое поддерживается системой Master Data Management (MDM). Основные данные помогают компании накапливать важную информацию о своей деятельности, решать важные вопросы и строить стратегические планы, но проблема их заключается в том, что они ведутся в различных источниках, формируются несколькими сотрудниками и департаментами, что приводит к дублированию и неполной картине. Данные проблемы помогает решить MDM-система. Для рассмотрения особенностей управления основными данными компании проведен анализ соответствующего процесса и рассмотрен клиентский домен мастер-данных, который имеет название Customer Data Integration (CDI).

Ключевые слова: мастер-данные, золотая запись, система управления мастер-данными, управление основными данными.

SPECIFICS OF MASTER DATA MANAGEMENT IN BANKING SPHERE

Research article

Bubekova A.G.^{1,*}, Gantc I.S.²

Russian Technological University, Moscow, Russia

* Corresponding author (aleks21618[at]yandex.ru)

Abstract

The article studies the specifics of basic data management of a company, which is supported by Master Data Management (MDM). Basic data help companies to gather important information about their activities, solve important tasks and make strategic plans, but the problem is that it is maintained in different sources, is formed by a number of employees and departments, which leads to its duplication and incomplete painting. MDM-system helps to solve these problems. To analyze the main data management specifics of a company, a study of the relevant process was conducted and the client domain master-data, which has the name of Customer Data Integration (CDI), was considered.

Keywords: master data, golden record, Master Data Management, basic data management.

Введение

В основу всех ключевых бизнес-процессов компании заложена потребность в достоверных, качественных данных. Более точная информация о клиентах компании, предоставляемых ею продуктах позволяет достигать поставленных целей организации, так как такая информация помогает проводить более точную аналитику, а в дальнейшем принимать важнейшие решения. Поэтому компаниям важно совершенствовать процесс управления основными данными, формировать унифицированные и консолидированные справочники, который подойдет для всех департаментов компании.

Описание процесса

Управление основными данными (Master Data Management) обеспечивает унифицированное представление данных в нескольких системах для удовлетворения аналитических потребностей глобального бизнеса. MDM создает уникальные представления основных и справочных данных, независимо от того, описывает ли он клиентов, продукты, поставщиков, местоположения или любой другой важный атрибут.

Большинство компаний полагаются на "мастер-данные", которые совместно используются в операционных и аналитических системах. Эти данные включают в себя информацию о клиентах, поставщиках, учетных записях или организационных подразделениях и используются для классификации и определения транзакционных данных.

В данной работе рассматривается такой домен мастер-данных, как клиенты. Клиенты являются основным звеном организации, так как они являются важным источником прибыли, они формируют спрос на услуги организации, производят их оценку, формируют рейтинг компании во внешней среде, клиенты являются стимулом для роста и производительности, без них бы не было смысла продолжать деятельность организации. Следовательно, важно иметь достоверные, полные, актуализированные и корректные данные о клиентах, чтобы проводить различную аналитику и в ходе нее выстраивать стратегию для продвижения.

На Рисунке 1 представлено дерево процесса «управления мастер-данными».



Рис. 1 – Дерево процесса управления мастер-данными

Управление мастер-данными исходя включает в себя импорт данных из внутренних источников компании, а также из внешних источников, таких как налоговая, федеральная адресная система и другие для обогащения внутрибанковских данных. Вторым этапом идет обработка данных из внутренних источников компании, это их стандартизация, очистка и обогащения дополнительной информацией. В дальнейшем происходит сопоставление данных и формирование единой версии объектов, т.е. золотой записи клиента.

Анализ в данном процессе включает в себя поиск проблемных карточек клиентов во внутрибанковских системах, поиск дублей, устаревших данных, различные проверки из внешних систем источников и другую аналитику.

В Таблице 1 представлена информация о входных и выходных данных подпроцессов.

Таблица 1 – Определение ресурсных потоков (входов/выходов) предмета исследования «управления мастер-данными»

Наименование подпроцесса	Основные ресурсы	
	Преобразуемые	Преобразованные
1. Импорт данных		
1.1. Получение данных из внутренних систем источников	Включение etl-процесса	Необработанные клиентские данные из внутренних источников
1.2. Получение данных из внешних источников	Включение etl-процесса	Необработанные клиентские данные из внешних источников
2. Повышение качества данных		
2.1. Очистка данных	Необработанные клиентские данные из внутренних источников; Необработанные клиентские данные из внешних источников	Очищенные клиентские данные
2.2. Обогащение данных	Очищенные клиентские данные	Обогащенные клиентские данные
2.3. Внесение изменений	Обогащенные клиентские данные	Обработанные клиентские данные
3. Создание мастер-записи		
3.1. Сопоставление данных	Обработанные клиентские данные	Найденные дубликаты
3.2. Объединение данных	Найденные дубликаты	Золотая запись
4. Анализ	Золотая запись	Аналитические отчеты

К нормативным документам процесса «управления мастер-данными» можно отнести правила очистки, обогащения, сопоставления данных, правила формирования золотой записи и единые правила компании по управлению клиентскими данными.

Рассмотрение CDI-системы

Для автоматизации процесса «управления мастер-данными» используется MDM-система (Master Data Management) – совокупность процессов и инструментов, используемая для осуществления непрерывного управления основными данными предприятия.

Основные данные помогают организации накапливать важную информацию о ее деятельности, но проблема их заключается в том, что те же клиентские данные ведутся в различных источниках, в банках заявки на кредит и, следовательно, информация о заемщике ведется в одной системе, после одобрения кредита карточка клиента формируется в иной системе. Также клиентские карточки заносятся в CRM-системы. В итоге в каждой системе хранятся определенные данные по клиентам, где-то эта информация уже может устареть, в связи с этим в основных данных компании накапливаются ошибки, появляются дубликаты и теряется вся история по клиенту или продукту. Данные проблемы позволяет устранить MDM-система, она формирует консолидированный и унифицированный источник информации по основным данным компании. Для управления непосредственно клиентскими данными существует тип MDM системы – CDI (Customer data integration). CDI дает компаниям последовательное и точное представление об их отношениях с клиентами.

На Рисунке 2 изображена контекстная диаграмма модели «to be» процесса «управления мастер-даннными», представленная в нотации IDEF0.



Рис. 2 – Контекстная диаграмма «to be» процесса «управления мастер-даннными»

На Рисунке 3 представлена декомпозиция процесса «управления мастер-даннными».

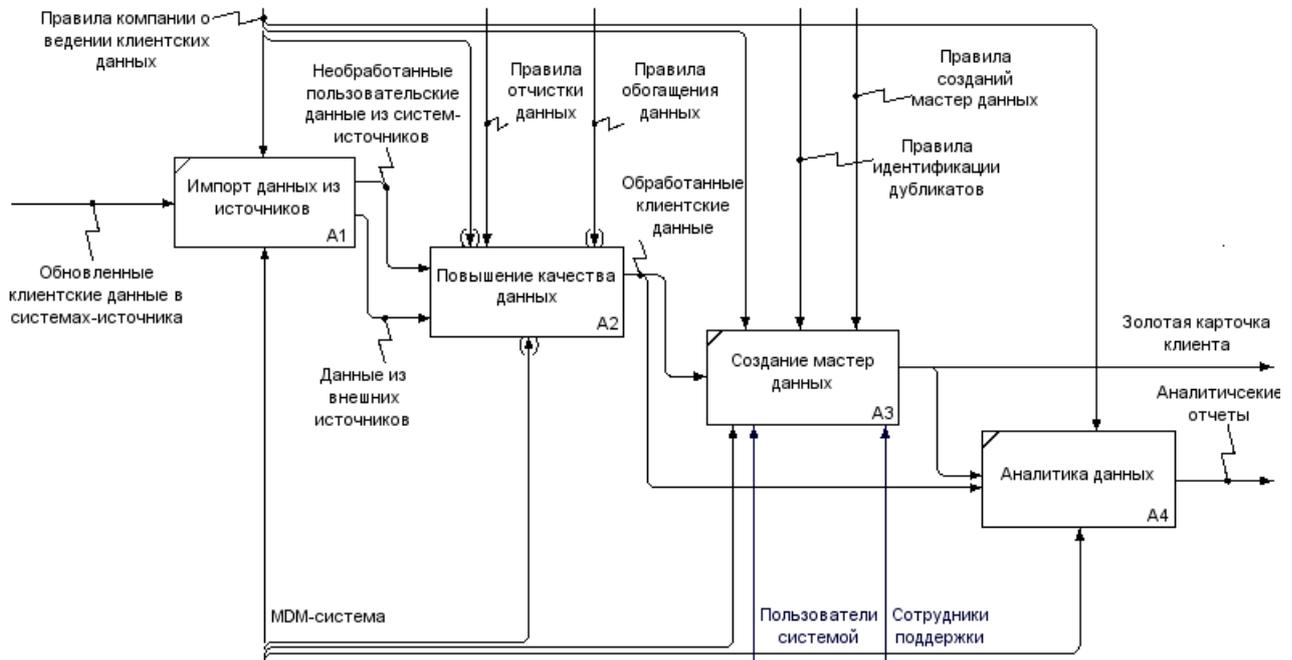


Рис. 3 – Декомпозиция модели «to be» процесса «управления мастер-даннными»

После внедрения CDI-системы в организацию, ежедневно из внутренних и внешних систем загружаются данные в схему stage для дальнейшей обработки, результат которой сохраняется на слой core, в дальнейшем они сопоставляются и формируется золотая карточка клиента.

Из CDI-системы данные могут импортироваться в различные банковские системы, такие как корпоративное хранилище данных, системы CRM, ERP. Для этого существует схема export. Получается, что CDI-система содержит три схемы, это схема stage, в которой хранятся данные из систем источников, схема core, в которой хранятся очищенные клиентские данные и сформированные золотые записи. Последняя схема – это схема export, это схема в которой хранятся пакеты импортируемых данных.

Система CDI собирает все данные о банковских клиентах в одном месте из различных систем, которыми пользуются разные департаменты организации, это делает информацию более доступной для всех отделов банка. Данные, собираемые CDI-системой, включают в себя личные, финансовые данные, уровни риска, поведение потребителей и общие отношения с компанией. Получается, что благодаря системе CDI в компании появляется унифицированный источник информации о банковских клиентах, сотрудниках различных подразделений доступна вся историчность клиентов, обогащенные и очищенные данные.

Заключение

В статье были рассмотрены особенности построения системы управления клиентскими данными, позволяющей единообразно работать с данными компании. Приведены результаты анализа ключевых бизнес-процессов управление мастер-данными в виде модели «to be», в которой демонстрируются решения ключевых проблем в работе с клиентскими данными.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что внедрение системы CDI решает такие проблемы, как отсутствие унифицированного и консолидированного источника информации о клиентских данных, устраняет противоречивость, недостоверность и некорректность этих данных. Внедренная система предоставляет компании надежный источник информации, который устраняет различные риски, такие как операционные, кредитные и другие. Это все дает возможность сотрудникам и самой компании видеть полную картину по клиентам.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Fundamentals of Data Warehouses / M. Jarke, M. Lenzerini, Y. Vassiliou et al. – Berlin :Springer Verlag, 1995. – DOI:10.1007/978-3-662-05153-5.
2. Bovee M. A Conceptual Framework and BeliefFunction Approach to Assessing Overall Information Quality. / M. Bovee, R. Srivastava, and B. Mak // In: Proceedings of the 6th International Conference on Information Quality. – Boston: MA, 2001.
3. Krawczyk H. Visual GQM approach to quality-driven development of electronic documents. / H. Krawczyk, B. Wiszniewski //In: Proceedings of the Second International Workshop on Web Document Analysis (WDA2003). – 2003.
4. Svolba G. “Data Quality for Analytics Using SAS”. / G. Svolba. – SAS Press, 2012. – pp. 182-192.
5. Loshin. D. Master Data Management / D. Loshin. – Morgan Kaufmann Publishers. – pp. 94-96, ISBN 978-012-374-225-4.
6. Why does the quality of health care continue to lag? / I.M. Nembhard, J.A. Alexander, T.J. Hoff et al. // Insights from management research. – Academy of Management Perspectives, 2009. – No 23. – pp. 24-42.
7. Mosadeghrad A. M. Obstacles to TQM success in health care systems / Mosadeghrad A. M. // Int J Health Care Qual Assur. – 2013. – No. 26. – pp. 147–73.
8. Hellstrom A. Process management in healthcare: investigating why it’s easier said than done. / A. Hellstrom, S. Lifvergren, J. Quist // Journal of Manufacturing Technology Management. – 2010. – No. 21. – pp. 499–511.
9. Lee K. C. Six Sigma management activities and their influence on corporate competitiveness. / K. C. Lee, B. Choi // Total Quality Management & Business Excellence. – 2006. – No. 17 (7). – pp. 893–911.
10. Six Sigma: definition and underlying theory / R. G. Schroeder, K. Linderman, C. Liedtke et al. // Journal of Operations Management. – 2008. – No. 26. – pp. 536–554.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.046>

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ЭЛЕМЕНТЫ ЛЕСНЫХ МАШИН В ВИДЕ ГАУССОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Научная статья

Будевич Е.А.¹, Тимохова О.М.², Вычерова Н.Р.^{3,*}

¹ ORCID: 0000-0003-1072-7687;

² ORCID: 0000-0003-3179-6382;

³ ORCID: 0000-0001-9631-4300;

^{1, 2, 3} Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

* Корреспондирующий автор (nvycherova[at]ugtu.net)

Аннотация

В статье проанализировано разнообразие технологических операций (таких как нагрузка на крутящий момент, нагрузка на ось автомобиля, нагрузка на детали трансмиссии и др.) и движения лесных машин, в ходе которого технологическое оборудование испытывает нагрузки, которые являются случайными функциями времени t , т. е. случайными процессами.

Результаты моделирования одного из распространённых видов нагрузок, т.е. крутящего момента (КМ), в тексте представленного стационарным гауссовским процессом $\tilde{M}(t)$, являются исходной информацией для прогнозирования усталостной долговечности деталей ЛМ на стадии проектирования без проведения натурных испытаний и осциллографирования случайных процессов нагрузок.

Представленный алгоритм моделирования можно применить для моделирования нагруженности и прогноза ресурса элементов новой лесной техники.

Ключевые слова: гауссовские случайные процессы, алгоритм моделирования.

MODELING ALGORITHM OF LOADS ON FOREST MACHINES ELEMENTS IN FORM OF GAUSSIAN RANDOM PROCESSES

Research article

Budevich E. A.¹, Timohova O. M.², Vycherova N. R.^{3,*}

¹ ORCID: 0000-0003-1072-7687;

² ORCID: 0000-0003-3179-6382;

³ ORCID: 0000-0001-9631-4300;

^{1, 2, 3} Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

* Corresponding author (nvycherova[at]ugtu.net)

Abstract

The article analyzes the variety of technological operations (such as load on torsion torque, load on vehicle axle, load on transmission parts, etc.) and the movement of forest machines, during which the technological equipment is under load, that are chance time t functions, t.e. chance processes.

Results of one of the common load types modeling, i.e. torsion torque (TT), are presented by the stationary Gaussian process, and $\tilde{M}(t)$ are the basic information for prediction of fatigue design life of FM parts at the design stage without full-scale tests and oscillation of random load processes.

The presented modeling algorithm can be used to simulate the load and predict the resource of elements of new forest technology.

Keywords: Gaussian random processes, chance processes, modeling algorithm.

Введение

Из-за разнообразия технологических операций и движения лесных машин (ЛМ) по дорогам и волокам случайного профиля, многие детали трансмиссии, ходовой системы и технологического оборудования испытывают нагрузки, которые являются случайными функциями времени t , т. е. случайными процессами. Одним из распространенных видов нагрузок является крутящий момент (КМ), который представим стационарным гауссовским процессом $\tilde{M}(t)$, обладающим свойством эргодичности (специальное свойство некоторых динамических систем, состоящее в том, что в процессе эволюции почти каждое состояние с определённой вероятностью проходит вблизи любого другого состояния системы). При этом условии достаточно рассмотреть не множество реализаций ансамбля, а одну реализацию КМ достаточной продолжительности. Вышеуказанные воздействия относят к категории случайных колебаний, опасность их состоит в том, что они приводят к повышенному росту усталостных трещин.

Существующие методы статистического анализа нагруженности основаны на записи осциллограмм. Такой путь требует больших затрат времени и средств на проведение натурных тензометрических испытаний, и информация получается с большим опозданием.

Для преодоления этих трудностей предложен алгоритм статистического моделирования случайных процессов нагружения деталей ЛМ, реализация которого возможна только на ПЭВМ [1, С. 72].

Методы и принципы исследования

Алгоритм моделирования $\tilde{M}(t)$ состоит в следующем. Задаем приближенно возможными границами КМ: нижней – M_H и верхней – M_B . С помощью математической функции $RND(x)$ (язык программирования QBasic) генерируем последовательность случайных чисел $\{r_i\}_n$ двойной точности, равномерно распределенных в открытом интервале от 0 до 1. По этим значениям моделируем равномерное распределение КМ по соотношению:

$$\{M_{*i}\}_n = M_H + (M_B - M_H) * r_i \quad (1)$$

где n – объем смоделированной выборки.

На основании (1) находим выборочное математическое ожидание (МО) – \bar{M} и стандартное отклонение (СО) – S для КМ:

$$\bar{M} = (1/n) \sum_{i=1}^n M_{*i} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{1/(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (M_{*i} - \bar{M})^2} \quad (3)$$

Затем попарно вычисляем последовательность статистически независимых случайных чисел Z_1, Z_2, \dots, Z_3 [3, С. 205], используя соотношения:

$$\begin{aligned} Z_i &= -2 \ln r_i^{1/2} \cdot \cos 2\pi \cdot r_{i+1}, \\ Z_{i+1} &= -2 \ln r_i^{1/2} \cdot \sin 2\pi \cdot r_{i+1} \quad i=1, 2, 3, 5, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Полученная по (4) случайная числовая последовательность $\{r_i\}_n$ имеет нормированное нормальное распределение (среднее ноль, дисперсия единица) [4, С. 347]. Используя (4), моделируем распределение КМ по нормальному закону:

$$M_{i \ n} = \bar{M} + Z_{i \ n} \cdot S \quad (5)$$

Затем строим случайную выборочную функцию – $\tilde{M} \ t$. Для этого значения M_1, M_2, \dots, M_n , полученные по (5), откладываем на n последовательных ординатах, расположенных через равные интервалы $\Delta t = \tau$ (шаг квантования) по оси времени t . Ординаты реализаций $M \ t_1, M \ t_2, \dots, M \ t_n$, в эти моменты времени можно рассматривать как реальную осциллограмму записи КМ [5, С. 207]. По этим значениям вычисляем выборочную коррелирующую функцию (КФ) для КМ по формуле:

$$K_* \ \tau = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} [M \ t_i - \bar{M}] \cdot [M \ t_{i+\tau} - \bar{M}], \quad (6)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$

Функция (6) удовлетворяет условию: при $m \rightarrow \infty$ и $n \rightarrow \infty$, $K_* \ \tau \rightarrow 0$.

Моделирование на ПЭВМ показывает, что дискретные значения $K_* \ \tau$ носят колебательный характер [6, С. 340], поэтому для ее аппроксимации (сглаживания) выбираем наиболее распространенное аналитическое выражение:

$$K \ \tau = S^2 \cdot \exp -\alpha |\tau| \cdot [\cos \beta \tau + \alpha / \beta \sin \beta |\tau|] \quad (7)$$

где α и β – коэффициенты, $\alpha > 0$.

Коэффициенты α и β в (7) находим приближенное, в соответствии с рекомендациями [2, С. 236–240], по формулам:

$$\beta = \pi / (\tau_1 - \tau_3), \quad \gamma = [3\tau_3 - \tau_1], \quad \alpha = \beta \cdot \text{tg} \gamma \quad (8)$$

где τ_1, τ_2 – соответственно значения первого и второго пересечения КФ оси τ ; τ_2 – соответствует первому минимуму КФ (в последующих расчётах не используется).

Применяя формулу Винера-Хинчина [7, С. 36], запишем общее выражение функции спектральной плотности $S_* \ \omega$, которая описывает частотный состав смоделированного стационарного процесса $\tilde{M} \ t$:

$$S_* \omega = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \exp -i\omega\tau K \tau d\tau \quad (9)$$

где i – мнимая единица; ω – круговая частота колебаний, с-1.
 Для выражения (7), (9) принимает вид:

$$S_* \omega = \left[2S^2 \cdot \alpha / \pi \right] \alpha^2 + \beta^2 \cdot \left[\omega^2 - \beta^2 \alpha^2 + 4\alpha^2 \omega^2 \right]^{-1} \quad (10)$$

По (10) можно построить график спектральной плотности для $\tilde{M} t$.

На основании смоделированного гауссовского процесса $\tilde{M} t$ с КФ (7), при найденных α и β определяем средние частоты по нулям – $\bar{\omega}_0$, по экстремумам – $\bar{\omega}_\ominus$ и точкам перегиба – $\bar{\omega}_\Pi$:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_0 &= \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \\ \bar{\omega}_\ominus &= 2\sqrt{2\alpha^2 + \beta^2} - \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \\ \bar{\omega}_\Pi &= 2\sqrt{12\alpha^4 + 2\alpha^2\beta^2 + \beta^4} \cdot 2\alpha^2 + \beta^2^{-1} - 2\sqrt{2\alpha^2 + \beta^2} + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \end{aligned} \quad (11)$$

а также параметр сложности структуры процесса $k = \bar{\omega}_\ominus / \bar{\omega}_0$:

$$k = 2\sqrt{2\alpha^2 + \beta^2} \cdot \alpha^2 + \beta^2^{-1} - 1 \quad (12)$$

Приведем результаты моделирования КМ в виде стационарного гауссовского процесса $\tilde{M} t$ [8, С. 136], для карданного вала трактора ЛТ-154 при движении на III-й передаче. Для этого составлена программа (язык Qbasic). Нижняя и верхняя границы для КМ соответственно равны: МН=250 Нм, МВ=740 Нм. При этих данных по (1) смоделирована выборка объемом $n=4000$ значений и по (2) – (3) вычислены характеристики: $\bar{M} = 526,2$ Нм, $S=141,4$. Затем по (4) смоделируем последовательность $\{t_i\}_n$, а по (5) выборочное распределение КМ по нормальному закону [9, С. 76]. Частичные реализации КМ, полученные по (5), представлены в таблице 1. На основании смоделированных данных, по (6) определяем выборочные значения КФ – $K^*(\tau)$, которые представлены в таблице 2, при шаге квантования $\Delta t = \tau = 1$ с, при этом полученные значения: $\tau_1=2,6$ с, $\tau_2=4$ с и $\tau_3=5,5$ с, по которым по (8) вычислены параметры аппроксимации (7): $\alpha=3,9$ с-1, $\beta=1,1$ с-1.

Таблица 1 – Частичные реализации КМ

t, с	Mi, Нм						
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,0	21	642,7	42	217,9	63	484,9
1	501,9	22	462,7	43	464,2	64	788,4
2	525,3	23	219,4	44	500,0	65	553,6
3	600,2	24	578,4	45	499,8	66	659,3
4	610,6	25	495,8	46	754,1	67	731,7
5	563,6	26	503,5	47	427,1	68	538,6
6	502,5	27	430,6	48	478,7	69	444,9
7	655,4	28	384,7	49	545,1	70	608,8
8	439,5	29	667,3	50	425,1	71	544,3
9	517,1	30	582,8	51	483,9	72	669,0
10	279,4	31	410,9	52	430,1	73	461,2
11	579,5	32	532,8	53	503,9	74	581,0
12	407,4	33	547,4	54	592,7	75	326,9
13	333,6	34	324,9	55	434,6	76	658,4
14	339,4	35	346,0	56	713,6	77	842,3
15	448,9	36	528,2	57	531,3	78	444,9
16	415,0	37	780,3	58	392,8	79	699,4
17	660,4	38	394,5	59	153,3	80	544,8
18	449,2	39	600,0	60	478,6	81	184,2
19	727,9	40	411,8	61	673,3	82	526,1
20	427,6	41	554,5	62	549,6	83	642,2

Таблица 2 – Выборочные значения $K_* \tau$

i	τ, c	$K_* \tau, (Hm)^2$	i	τ, c	$K_* \tau, (Hm)^2$
1	0	19919,2	12	11	-151,1
2	1	248,9	13	12	49,9
3	2	29,9	14	13	-98,8
4	3	-17,2	15	14	-28,2
5	4	-209,3	16	15	-70,8
6	5	-137,9	17	16	65,7
i	τ, c	$K_* \tau, (Hm)^2$	i	τ, c	$K_* \tau, (Hm)^2$
7	6	126,5	18	17	-0,175
8	7	123,3	19	18	131,1
9	8	10,2	20	19	-168,9
10	9	36,3	21	20	70,9
11	10	-64,9	22	21	-19,9

При этих α и β по (11) – (12) получено: $\bar{\omega}_0 = 4,1 \text{ с}^{-1}$, $\bar{\omega}_\Omega = 7,2 \text{ с}^{-1}$, $\bar{\omega}_H = 12,3 \text{ с}^{-1}$; $k = 1,76$. Для средних значений интервалов времени между нулями, экстремумами и точками перегиба имеем: $\bar{\tau}_0 = \pi / \bar{\omega}_0$; $\bar{\tau}_\Omega = \pi / \bar{\omega}_\Omega$; $\bar{\tau}_H = \pi / \bar{\omega}_H$; численные значения равны: $\bar{\tau}_0 = 0,77 \text{ с}$; $\bar{\tau}_\Omega = 0,44 \text{ с}$; $\bar{\tau}_H = 0,26 \text{ с}$. Таким образом, в результате численного моделирования на ПЭВМ найдены статистические характеристики и параметры энергетического спектра стационарного гауссовского процесса $\tilde{M} t$. Многократное повторение выборок заданного объема $n=4000$, при новых наборах случайных чисел, не меняет полученных статистик для $\tilde{M} t$, поэтому на основании теоремы Чебышева их можно рассматривать как истинные [10], [11].

Выводы

Результаты моделирования $\tilde{M} t$ являются исходной информацией для прогнозирования усталостной долговечности деталей ЛМ на стадии проектирования без проведения натурных испытаний и осциллографирования случайных процессов нагрузок. Аналогичным образом моделируются и другие виды случайного нагружения деталей ЛМ: растяжение-сжатие, изгиб, изгиб с кручением. При ряде допущений алгоритм позволяет моделировать случайные процессы, когда амплитуды нагрузок подчинены аномальным распределениям. В этом случае меняются отдельные блоки программы.

Алгоритм можно применить для моделирования нагруженности и прогноза ресурса элементов новой лесной техники.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Ермаков С. М. Статистическое моделирование / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 296 с.
2. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1968. – 464 с.
3. Михайлов Г. А. Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло / Г. А. Михайлов. – Новосибирск: Наука, 1974. – 304 с.
4. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы / С. М. Ермаков – 2-е изд., доп. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 473 с.
5. Александров В. А. Моделирование технологических процессов лесных машин / В. А. Александров, А. В. Александров. – 3-е изд., перераб. – СПб.: Лань, 2016. – 368 с.
6. Светлицкий В. А. Статистическая механика и теория надёжности / В. А. Светлицкий. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 504 с.
7. Любимов И. И. Динамика колесной нагрузки при колебаниях автомобиля / И. И. Любимов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2004. – № 4 (5). – С. 33-38.
8. Гусев А. С. Расчёт конструкций при случайном воздействии / А. С. Гусев, В. А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1984. – 204 с.

9. Александров В. А. Динамические нагрузки в лесосечных машинах / В. А. Александров. – Л.: ЛГУ, 1984. – 152 с.
10. Брауде В. И. Вероятностные методы расчёта грузоподъёмности машин / В. И. Брауде. – Л.: ЛГУ, 1978. – 230 с.
11. Ветцель Е. С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е. С. Ветцель, Л. А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – С. 331-350.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ermakov S. M. Statisticheskoe modelirovanie [Statistical modeling] / S. M. Ermakov, G. A. Mihajlov - 2nd edition, enlarged. – М.: Nauka, Main editorial of physics and mathematics literature, 1982. – 296 p. [in Russian]
2. Sveshnikov A. A. Prikladnye metody teorii sluchajnyh funktsij [Applicative methods of arbitrary function theory] / A. A. Sveshnikov. – 2nd edition, re-visited and enlarged. – М.: Main editorial of physics and mathematics literature, 1968. – 464 p. [in Russian]
3. Mihajlov G. A. Nekotorye voprosy teorii metodov Monte-Karlo [Some questions on the Monte Carlo method theory] / G. A. Mihajlov. – Novosibirsk: Nauka publishing house, 1974. – 304 p. [in Russian]
4. Ermakov S. M. Metod Monte-Karlo i smezhnye voprosy [Monte Carlo method and related questions] / S. M. Ermakov. – 2nd edition revised. – М.: Nauka Main editorial of physics and mathematics literature, 1975. – 473 p. [in Russian]
5. Aleksandrov V. A. Modelirovanie tekhnologicheskikh processov lesnyh mashin [Modeling of technological processes of forest machines] / V. A. Aleksandrov, A. V. Aleksandrov. – 3rd edition, revised. – SPB.: Lan' publishing house, 2016. – 368 p. [in Russian]
6. Svetlickij V. A. Statisticheskaya mekhanika i teoriya nadyozhnosti [Statistical mechanics and reliability theory] / V. A. Svetlickij. – М.: Bauman MSTU Publishing house, 2002. – 504 p. [in Russian]
7. Lyubimov I. I. Dinamika kolesnoj nagruzki pri kolebaniyah avtomobilya [Dynamics of the wheel load in case of automobile fluctuations] / I. I. Lyubimov // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of SSTU]. – 2004. – № 4 (5). – P. 33-38. [in Russian]
8. Gusev A. S. Raschyot konstruktsij pri sluchajnom vozdeystvii [Calculation of structures at random impact] / A. S. Gusev, V. A. Svetlickij. – М.: Mashinostroenie publishing house, 1984. – 204 p. [in Russian]
9. Aleksandrov V. A. Dinamicheskie nagruzki v lesosechnykh mashinakh [Dynamic loads in forestry machines] / V. A. Aleksandrov. – Л.: LGU 1984. – 152 p. [in Russian]
10. Braude V. I. Veroyatnostnye metody raschyota gruzopod"yomnosti mashin [Probabilistic methods of calculating the load capacity of machines] / V. I. Braude. – Л.: LGU 1978. – 230 p. [in Russian]
11. Vetcel E. S. Teoriya sluchajnyh processov i eyo inzhenernye prilozheniya [theory of random processes and its supplements] / E. S. Vetcel, L. A. Ovcharov. – М.: Higher school publishing house, 2000. P. 331-350. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.047>

АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ ПОСЛЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Научная статья

Волкова В.К.*

ORCID: 0000-0002-8166-9114,

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

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

Аннотация

В статье изложены результаты рентгеноструктурного анализа композитов на основе ПТФЭ и экспериментального исследования изменения их параметров в результате воздействия высоких температур. В зоне трения поверхностей композитов ПТФЭ возникают температуры, превосходящие температуру стеклования полимера. Установлено, что такие температуры могут привести к изменению как структуры, так и триботехнических свойств материала, следовательно, возникает вопрос о границах температурного интервала, в котором параметры надмолекулярной организации композитов остаются стабильными. В рамках данного исследования определены пределы устойчивости структуры аморфно-кристаллических композитов. Из приведенных сравнительных результатов можно сделать вывод, что наиболее чувствительным к температурному воздействию из рассмотренных структурных параметров оказывается степень кристалличности матрицы.

Ключевые слова: полимер, композит, матрица, рентгенограмма, параметр, степень кристалличности.

ANALYSIS OF STRUCTURAL CHANGES IN PTFE-BASED COMPOSITE MATERIALS AFTER THERMAL IMPACT

Research article

Volkova V.K.*

ORCID: 0000-0002-8166-9114,

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

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

Abstract

The article presents the results of PTFE-based composites x-ray crystallography analysis and experimental research of their parameters changes after high temperature exposure. Temperature of PTFE-based composites friction zone is higher than that of polymer vitrification. It is established that such temperatures may cause changes in both structure and tribotechnical qualities of the material, which begs the question of a temperature range, within which the parameters of composites supramolecular structures would stay stable. In this study, the range of amorphocrystalline composites stability is determined. The carried out comparative research suggests that the most thermal impact sensible structural parameter is the degree of matrix crystallization.

Keywords: polymer, composite, matrix, x-ray diagram, parameter, degree of crystallization.

Введение

Для создания сложных по составу полимерных композиционных материалов, отличающихся повышенными механическими свойствами, в материал основного полимерного материала вводят активные модификаторы в виде волокнистых и кристаллических наполнителей. В области триботехники особое место занимают композиты политетрафторэтилена (ПТФЭ) из-за низких значений коэффициента сухого трения и высокой износостойкости. Варьирование наполнителей по виду, концентрации и размерам частиц приводит к формированию в ПТФЭ структур с заданными улучшенными характеристиками. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал, отражающий влияние как вида наполнителя, так и его массовое содержание на теплофизические [1], [7], механические [2], триботехнические [3], [5] и физические [8], [9] свойства композитов на основе ПТФЭ. Отметим, что в настоящее время перспективным методом модификации структуры и свойств полимерных материалов является наполнение полимеров наночастицами [10].

В зоне трения поверхностей композитов ПТФЭ возникают высокие температуры, превосходящие температуру стеклования полимера. Установлено, что такие температуры могут привести к изменению как структуры, так и триботехнических свойств материала [4], [6]. Однако, вопрос воздействия высокой температуры на параметры структуры полимерных композитов ПТФЭ, таких как степень кристалличности и параметры элементарной ячейки в современной литературе освещён недостаточно.

Цель исследований

Поскольку структура и свойства материала напрямую связаны между собой всегда остаётся актуальным вопрос о границах температурного интервала, в котором параметры надмолекулярной организации композитов остаются стабильными к повышению температуры. Целью настоящей работы явилось решение вопроса о пределах температурных интервалов, установленных по результатам рентгенографических исследований, для которых наблюдается устойчивость к тепловым воздействиям целого ряда аморфно-кристаллических композитов.

Методы и принципы исследования

Состав образцов представлен в табл. 1. В качестве наполнителей ПТФЭ использовались измельчённое углеродное волокно (УВ), бронза (Б) и дисульфид молибдена (MoS_2). Углеродное волокно в композите К-1 было заменено коксом в К-2. По химическому составу композиты мало отличаются, в основном они имеют металлические наполнители. К-1 в отличие от К-2 содержит волокнистый УВ.

Таблица 1 – Химический состав композитов на основе ПТФЭ

Наполнители	ПТФЭ, масс. %	УВ, масс. %	кокс, масс. %	Б, масс. %	MoS_2 , масс. %
ПТФЭ	100	-	-	-	-
К-1	80-82	5-7	-	9-10	3
К-2	75-77	-	5	8-9	10

Рентгенограммы были получены на стандартной установке ДРОН-3 с применением высокотемпературной приставки, конструкция которой позволяла выдерживать заданную температуру в течение времени, необходимого для съёмки рентгенограммы. Стабильность температуры поддерживалась с точностью $\pm 5^\circ$. Необходимую для съёмки температуру стабилизировали в течение 30 минут. Температуру определяли при использовании платин – платиноиридиевой термодпары. Для каждого композита исследуемый температурный интервал был равным: от начальной температуры 295 К вплоть до температур разбухания материала композитов (675 К).

Основные результаты и обсуждение

Из-за сложного аморфно-кристаллического состояния надмолекулярной организации композитов ПТФЭ рентгенограммы (рентгенодифракционные спектры) имеют сложный вид (рис.1): они содержат дифракционные максимумы интенсивности (I) от кристаллических областей матрицы ПТФЭ и наполнителей, а также участки аморфных гало. Эти области рентгенограммы и являются характерными для определения структурных параметров. Среди них постоянные кристаллической ячейки $a=b, c$ (относительная точность определения 2 %), среднее межслоевое расстояние S_{AM} (относительная точность определения 2 %) и степень кристалличности χ (относительная погрешность определения составляет 5 %) аморфной матрицы. Методика расчётов этих величин приводится в работе [2]. Ненаполненный ПТФЭ имеет параметры гексагональной ячейки: $a = 0,564$ нм, $c = 1,68$ нм, $\gamma = 120^\circ$. Степень кристалличности матрицы составляет (60 – 70) %.

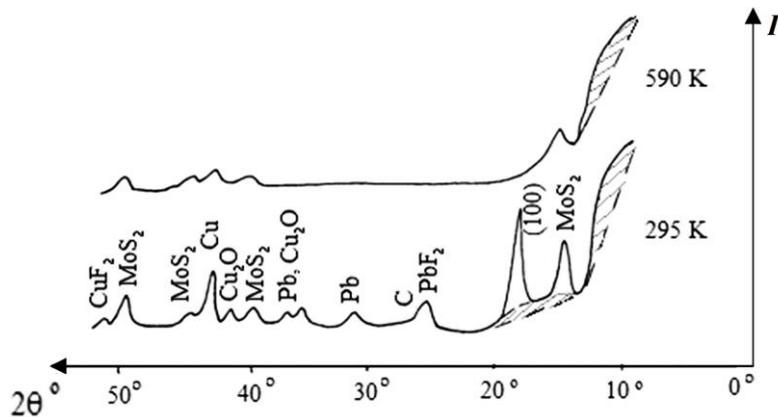


Рис. 1 – Рентгенограммы композита К-1 при разных температурах

Полученные значения всех структурных величин исходной матрицы ПТФЭ соответствуют литературным данным. Металлические наполнители уменьшают исходную степень кристалличности ПТФЭ почти в 2 раза и уменьшают значение среднего межслоевого расстояния на 5 %.

Анализ рентгенограмм показал, что исследуемый температурный интервал для чистого и наполненного ПТФЭ можно разбить на три различных интервала, границы которых зависят от присутствия наполнителей (табл. 2).

Таблица 2 – Температурные интервалы (К)

Композиты	Первый	Второй	Третий
ПТФЭ	295-375	375-600	600-675
К-1	295-510	510-555	555-675
К-2	295-475	475-555	555-675

В первом температурном интервале аморфно-кристаллическое состояние матрицы композитов практически не изменяется: параметры кристаллической ячейки практически не изменяются, хотя и наблюдается их линейное увеличение при повышении температуры, но в пределах погрешности. Структуру аморфной фазы матрицы следует считать высокоупорядоченной: на рентгенограммах наблюдается два порядка чётких аморфных гало. Для чистого

ПТФЭ этот температурный интервал занимает всего 80 К выше комнатной температуры. Введение наполнителей в ПТФЭ значительно увеличивает верхнюю границу первого интервала: на 100 К для К-2 и на 135 К для К-1. Здесь следует отметить положительную роль волокнистого наполнителя.

Во втором температурном интервале наблюдаемые изменения во внешнем виде рентгенограмм заключаются в постепенном и значительном уменьшении интенсивности основного дифракционного максимума (100) ПТФЭ. Он полностью исчезает в ПТФЭ при температуре 600 К и в композитах при 555 К. Уменьшение интенсивностей дифракционных максимумов при нагревании можно объяснить теорией рассеяния рентгеновских лучей веществом: при повышении температуры уменьшается интегральная интенсивность рефлексов.

Кроме того, в указанном температурном интервале исчезает аморфное гало 3-го порядка, и при дальнейшем нагревании на рентгенограммах присутствует только аморфное гало 2-го порядка. Это говорит о том, что при более высоких температурах аморфная составляющая матрицы становится менее упорядоченной.

Отмеченные изменения в виде рентгенограмм, рассматриваемые для второго температурного интервала, связаны с возникновением и течением двух процессов: плавлением кристаллитов и переходом матрицы ПТФЭ из аморфно-кристаллического состояния в полностью аморфное состояние. Введение наполнителей уменьшает границы этого интервала более, чем в 3 раза: если для ПТФЭ он приходится на довольно широкий интервал значений в 225 К, то у композитов он составляет величину порядка 60–80 К. Здесь также отметим наиболее выгодное для этого температурного интервала присутствие в ПТФЭ волокнистого наполнителя. Процесс плавления кристаллитов быстрее заканчивается у композитов (555 К) по сравнению с ненаполненным ПТФЭ (600 К).

В третьем температурном интервале матрица материала композитов происходит нагрев полностью аморфной матрицы вплоть до температуры «разбухания» материала, при которой выделяются газообразные продукты. Эта критическая температура оказалась примерно одинаковой. При нагревании в третьем температурном интервале центр тяжести единственного аморфного гало и занимаемая им площадь систематически смещаются в сторону уменьшения дифракционных углов: кривая рассеяния становится похожей как от полностью неупорядоченной структуры (т.е. жидкости).

На рис. 2 представлена диаграмма изменений структурных параметров кристаллической и аморфной составляющих матрицы композитов ПТФЭ в одинаковой температурной области, охватывающей первый и второй температурные интервалы.

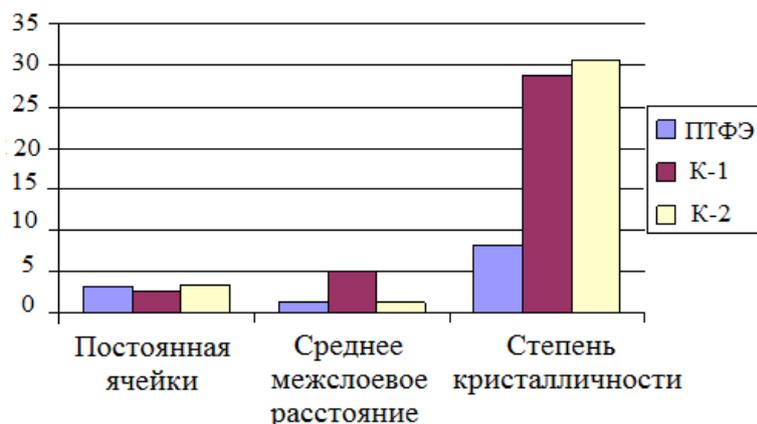


Рис. 2 – Диаграмма относительных изменений структурных параметров (%)

Постоянная кристаллической ячейки $a=b$ при нагревании увеличивается на 3,18 %, 2,56 % и 3,3 % соответственно для ненаполненного ПТФЭ, К-1 и К-2. Это увеличение можно объяснить тем, что при нагревании возрастают расстояния между узлами кристаллической решётки. Это расстояние в макромолекуле ПТФЭ соответствует интервалу между атомами углерода и фтора (C–F).

Для среднего межслоевого расстояния S_{AM} аморфной составляющей матрицы тенденция в увеличении S_{AM} эти изменения выражены менее заметно: 1,31 %, 5,0 % и 1,29 % соответственно для ненаполненного ПТФЭ, К-1 и К-2. Видно, что исключение составляет композит К-2 с волокнистым наполнителем. Отметим, что значение величины S_{AM} относится к расстоянию между атомами C–C в макромолекуле ПТФЭ. Это расстояние в 3 раза превосходит расстояние между атомами C–F в макромолекуле ПТФЭ, поэтому температурные изменения величины S_{AM} в относительных величинах являются менее значительными.

Наиболее чувствительным параметром к температурному нагреву оказалась степень кристалличности χ , которая для ПТФЭ возросла на 8,31 %, для композита К-1 – на 28,9 %, для композита К-2 – на 30,7 %. Здесь более сильное влияние оказал металлический наполнитель. Увеличение степени кристалличности можно объяснить увеличением объёма кристаллических областей за счёт увеличения параметров кристаллической ячейки в общем объёме материала композитов.

Отметим также, что при нагревании уменьшается интенсивность линий металлических наполнителей. Уменьшение интенсивности их рефлексов можно объяснить изменением геометрии дифрагирующих внутри объёма материала рентгеновских лучей, которое связано с искажением структуры нагретой матрицы. Подтверждением этому является восстановление исходных параметров структуры при охлаждении образцов от температур плавления кристаллитов до комнатной температуры и затем новом нагреве. Нагревание же образцов до температур, превышающих температуру плавления кристаллитов (т.е. в состоянии с полностью аморфной матрицей), с последующим охлаждением до комнатной температуры вызывало необратимые изменения в их структуре: интенсивность рефлексов наполнителей

оставалась заниженной, особенно рефлексов меди и молибдена. Наиболее стабильным к нагреванию оказался дисульфид молибдена. Изменялась также степень кристалличности матрицы композитов по сравнению с её исходным состоянием.

Заключение

Установлено, что при высокотемпературном нагревании композитов ПТФЭ можно выделить три неравнозначных температурных интервала: первый – с практически неизменной исходной структурной организацией; второй – с перестройкой структурной организации из аморфно-кристаллического состояния в полностью аморфное состояние, которая сопровождается процессом плавления кристаллитов ПТФЭ и значительным увеличением значений структурных параметров; и третий – с образованием полностью аморфной матрицы, упорядочение в которой при нагревании уменьшается.

Границы указанных интервалов зависят от содержания наполнителей, которые увеличивают в композитах по сравнению с чистым ПТФЭ границы первого интервала на 100 К, соответственно сужая границы второго температурного интервала. Это является положительным эффектом для эксплуатации изделий из исследуемых композитов.

При нагревании вплоть до температур образования полностью аморфной матрицы структурные параметры композитов ПТФЭ линейно возрастают при увеличении температуры. Наиболее чувствительным к температурному воздействию из рассмотренных структурных параметров оказывается степень кристалличности матрицы.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Волкова, В. К. Теплофизические свойства композиционных материалов с полимерной матрицей и твердых растворов / В. К. Волкова // – М.: Наука образования, 2011. – 104 с.
2. Машков, Ю. К. Структура и износостойкость модифицированного политетрафторэтилена / Ю. К. Машков, Л. Ф. Калистратова, З. Н. Овчар. // – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. – 143 с.
3. Машков, Ю. К. Модификация структуры и свойств композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / Ю. К. Машков, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова и др. // – Омск.: Изд-во СибАДИ, 2005. – 170 с.
4. Машков, Ю. К. Структурная многоуровневая модификация полимерного композиционного материала при синтезе и фрикционном нагружении / Ю. К. Машков, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова // – Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 2. – С. 103-108.
5. Машков, Ю. К. Структура и свойства политетрафторэтилена, модифицированного природным скрытокристаллическим графитом / Ю. К. Машков, А. А. Гладенко, Л. Ф. Калистратова и др. // – Трение и износ. – 2000. – Т. 2. – № 1. – С. 47-51.
6. Машков, Ю. К. Методологические аспекты теории синтеза и эволюции структуры ПТФЭ-композитов. / Ю. К. Машков, Л. Ф. Калистратова // Материаловедение. – 2016. – № 4. – С. 39-43.
7. Суриков, В. И. Предельные концентрации наполнителей и некоторые свойства межфазного слоя в композитах на основе политетрафторэтилена. / В. И. Суриков, В. К. Волкова и др. // – ОмГТУ. – Омск, 1997. – 15 с. – Деп. в ВИНТИ 14.03.97, № 791-В97.
8. Калистратова, Л. Ф. Упорядочение аморфной фазы полимерной матрицы: структурные и рентгенографические характеристики. / Л. Ф. Калистратова, В. К. Волкова и др. // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 41-49.
9. Volkova, V. K. The creation of the phonon spectrum according to the specific heat for composite materials. / V. K. Volkova, D. A. Suleymenova, N. Y. Afonichev // International Research Journal. – 2017. – № 5-3 (59). – С. 144-146.
10. Машков, Ю. К. Изменение структуры и износостойкости ПТФЭ-нанокompозитов при различных методах структурной модификации. / Ю. К. Машков, А. С. Рубан и др. // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 2. – С. 188-193.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Volkova, V. K. Teplofizicheskie svoystva kompozicionnykh materialov s polimernoj matriciej i tverdykh rastvorov [Thermophysical qualities of composite materials with polymeric matrix and solid solutions] / V. K. Volkova. – M.: Nauka obrazovaniya, 2011. – 104 p. [in Russian]
2. Mashkov, Yu. K. Struktura i iznosostojkost' modifitsirovannogo politetraforetilena [Structure and endurance of modified polytetrafluoroethylene] / Yu. K. Mashkov, L. F. Kalistratova, Z. N. Ovchar. – Omsk.: Omsk State Technical University Publishing House, 1998. – 143 p. [in Russian]
3. Mashkov, Yu. K. Modifikaciya struktury i svoystv kompozicionnykh materialov na osnove politetraforetilena [Modification of structure and qualities of polytetrafluoroethylene-based materials] / YU. K. Mashkov V. I. Surikov, L. F. Kalistratova et al. – Omsk.: The Siberian State Automobile And Highway University Publishing House, 2005. – 170 p. [in Russian]
4. Mashkov, Yu. K. Strukturnaya mnogourovnevaya modifikaciya polimernogo kompozicionnogo materiala pri sinteze i frikcionnom nagruzhenii [Structural multilevel modification of polymeric composite material during synthesis and frictional loading] / Yu. K. Mashkov V. I. Surikov, L. F. Kalistratova // Fizicheskaya mezomekhanika [Physical mesomechanics]. – 2002. – Vol. 5. – № 2. – P. 103 – 108. [in Russian]

5. Mashkov, Yu. K. Struktura i svojstva politetraftoretilena, modificirovannogo prirodnyim skrytokristallicheskim grafitom [Structure and qualities of polytetrafluoroethylene modified with natural cryptocrystalline graphite] / Yu. K. Mashkov, A. A. Gladenko, L. F. Kalistratova et al. // *Trenie i iznos* [Friction and endurance]. – 2000. – Vol. 2. – № 1. – P. 47 – 51. [in Russian]
6. Mashkov, Yu. K. Metodologicheskie aspekty teorii sinteza i evolyucii struktury PTFE-kompozitov. [Methodological aspects of the theory of synthesis and PTFE-based composites structural evolution] / Yu. K. Mashkov, L. F. Kalistratova // *Materialovedenie* [Materials science]. – 2016. – № 4. – P. 39-43. [in Russian]
7. Surikov, V. I. Predel'nye koncentracii napolnitelej i nekotorye svojstva mezhfaznogo sloya v kompozitah na osnove politetraftoretilena. [Concentrational limits of fillers and some qualities of interfacial layer in polytetrafluoroethylene-based composites] / V. I. Surikov, V. K. Volkova et al. // Omsk State Technical University. – Omsk, 1997. – 15 p. – Dep. in VINITI 14.03.97, № 791-V97. [in Russian]
8. Kalistratova, L. F. Uporyadochenie amorfnoj fazy polimernoj matricy: strukturnye i rentgenograficheskie harakteristiki. [Streamlining of polymeric matrix amorphous phase: structural and x-rays characteristics] / L. F. Kalistratova, V. K. Volkova et al. // *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies]. – 2021. – Vol. 7. – № 1. – P. 41-49.
9. Volkova, V. K. The creation of the phonon spectrum according to the specific heat for composite materials./ V. K. Volkova, D. A. Suleymenova, N. Y. Afonichev // *International Research Journal*. – 2017. – № 5-3 (59). – P. 144-146.
10. Mashkov, Yu. K. Izmenenie struktury i iznosostojkosti PTFE-nanokompozitov pri razlichnyh metodah strukturnoj modifikacii. [Structural and endurance changes in PTFE-based composites after different methods of structural modification] / Yu. K. Mashkov, A. S. Ruban et al. // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines]. – 2017. – Vol. 5. – № 2. – P. 188-193. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.048>

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РОССИИ

Обзорная статья

Горячев С.В.¹, Смолякова А.А.^{2,*}

^{1,2} Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

* Корреспондирующий автор (anna.smolyakova.2017[at]mail.ru)

Аннотация

Рассматриваемая тема в статье освещает актуальную на сегодняшний день проблему использования энергии ветра как основного источника питания потребителей. Ветроэнергетика в данный момент является одним из наиболее перспективных возобновляемых источников альтернативной энергии. В статье рассматривается анализ использования ветроэнергетических систем в России на территории Приволжского федерального округа в контексте состояния и перспектив развития. Исследованы основные направления повышения эффективности функционирования ветроэнергетических установок, а также целесообразность развития данной отрасли. На основе проведенного анализа можно проводить исследования по устранению той или иной проблемы ветряной энергетики. Реализация проведенных на этой базе работ может вывести ветряную энергетику на новый уровень развития.

Ключевые слова: ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, ресурсы, энергетические системы.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF WIND ENERGY SYSTEMS IN RUSSIA

Review article

Goryachev S.V.¹, Smolyakova A.A.^{2,*}

^{1,2} Orenburg State University, Orenburg, Russia

* Correspondent author (anna.smolyakova.2017@mail.ru)

Abstract

The topic under consideration in the article highlights the relevant problem of wind energy use as a main source of power for consumers. Wind power is currently one of the most promising renewable sources of alternative energy. The article analyzes the use of wind energy systems in Russia on the territory of the Volga Federal District in the context of its state and prospects of development. The main directions of wind power plants operations efficiency, as well as expediency of development of this industry, were studied. Based on the analysis made, research can be carried out to eliminate a particular wind energy problem. The implementation of the work done on this basis may lead the wind energy to a new level of development.

Keywords: wind energy, renewable sources of energy, resources, energy system.

Введение

Ветер может быть использован в нашей стране или в других странах мира при применении самых разных технологий. Сейчас получают все большее распространение возобновляемые источники получения энергии (ВИЭ), в том числе и в нашей стране. ВИЭ представляют на сегодня альтернативный источник энергии в сравнении с ископаемым топливом, загрязняющим атмосферу, а точнее, ее нижний слой. Использование энергии ветра позволяет исключить осуществление выброса углекислого газа - парниковых газов. Кроме того, в данном случае не производится ни одно другое загрязняющее вещество, которые могут быть связаны с ископаемым топливом.

Основная часть

ВИЭ - основной на сегодняшний день источник будущего для всех стран мира. Среди прочих существующих сейчас и относимых к числу возобновляемых источников энергии солнце, ветер, приливы. Из всех них ветер наиболее эффективен [1]. Генерация электрической энергии из возобновляемых источников в РФ сейчас увеличивается. С течением времени существующая доля возобновляемых источников энергии в энергобалансе РФ увеличилась с показателя 7,8%, по данным за 2015 г., до показателя 20,3%, по данным, полученным за 2021 г. На конец 2021 г. в нашей стране в общей сложности установили порядка 3996,6 МВт мощностей, производящих возобновляемые источники энергии. При этом стоит отметить то, что сейчас на долю ветра уже приходится порядка 69% от всей мощности с установленной мощностью 2035,6 МВт. В итоге РФ оказалась сейчас пятой по величине из числа тех, кто производит энергию ветра [5, С. 27].

Существующие сейчас различные альтернативные энергетические системы очень важны для дальнейшего развития экономики. Их необходимо использовать все чаще. Это обусловлено тем, что в настоящее время отмечаются не совсем стабильные цены на энергоносители. Кроме того, стоит отметить также наблюдаемое сейчас увеличение спроса потребителей на электроэнергию, ряд экологических проблем, которые связаны с использованием привычных источников, в частности, проблема изменения климата. Сейчас ежегодно РФ потребляет всё большее и большее количество энергии, чтобы в итоге обеспечить рост экономики. Развитие сферы ветроэнергетики сейчас необходимо, чтобы начать активно применять на постоянной основе возобновляемые, а возможно, и бесконечные источники получения энергии. В настоящее время создаются все новые конструкции различных ветровых установок. При этом в них устраняются все минусы, которые были в прежних моделях.

Среди плюсов ветроэнергетики следует отметить неисчерпаемость имеющихся в наличии ресурсов (если есть атмосфера и светит солнце, происходит перемещение воздуха, используемое для того, чтобы можно было получить необходимую энергию) [3, С. 8-9]. Среди прочих плюсов следует также отметить экологичность. Это обеспечивается за счет того, что ветровые электрические станции не производят выброс в атмосферу вредных веществ. Но при этом их все же нельзя отнести к числу абсолютно экологически чистых. Причина этого в том, что подобные установки шумные, особенно это плохо ночью. Нужно отметить в числе прочего то, что деятельность электростанций на ветру важно

прерывать из-за сезонного перелета птиц. Среди их плюсов создания то, что для промышленных установок требуется не более 14 суток, при этом принимают в расчет время, которое тратится на то, чтобы можно было приготовить платформу. Что касается бытовых ветрогенераторов для частных домов, то в данном случае времени затрачивается еще меньше.

Среди преимуществ в данном случае следует отметить бесконечность данного ресурса. К основным минусам относится то, что деятельность ветровых электрических станций является весьма зависимой от текущего времени года, а также от погоды. Ввиду таких изменений в итоге меняется скорость ветра. Поскольку его энергия кинетическая, она связана со скоростью. Чем она больше, тем в итоге ветровые установки способны произвести больше энергии. В итоге необходимо утилизировать станции и иные источники получения энергии и использовать специальные аккумуляторы, потребляющие большое количество энергии в дни, когда хорошо дует ветер, а затем возвращают энергию, когда наблюдается штиль. Ветряная электростанция не может находиться на любой территории. Необходимы только такие районы, в которых постоянно дует ветер.

Рассмотрим далее существующее климатическое распределение скорости, с которой дует ветер в ПФО [7, С.42-44]. ПФО является разнородным в физико-географическом смысле. Он расположен на возвышенности с долинами рек, в восточной части этого региона находится Уральское предгорье. В ПФО 3 разных растительные зоны, а именно - степная, лесная, а также лесостепная. Годовые ветровые потоки здесь определяются на основе структуры барического поля. Далее на рис. 1 отражены средние многолетние показатели скорости ветра.

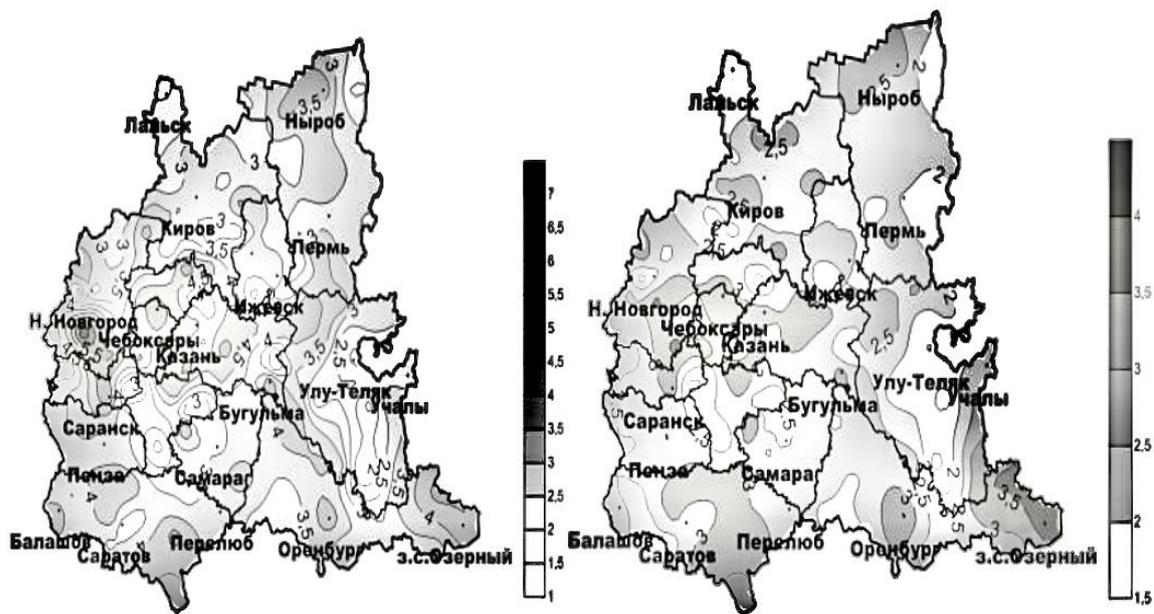


Рис. 1 – Средняя многолетняя скорость ветра (м/с) на уровне флюгера:
слева – январь; справа – июль

Что касается существующих показателей пространственного распределения скоростей ветра, то они являются разнородными – самые большие показатели отмечены в центральной части ПФО, а именно – в Чебоксарах, Саранске, Казани и т. д. Что касается максимальных показателей скорости ветра (а именно ≈ 7 м/с), то они отмечаются на ст. Арзамас (находящейся на территории Нижегородской области), в северной части ПФО в зоне лесов существующие средние показатели скорости ветра составляют около 3 м/с, в восточной части ПФО в РБ (Предуралье) скорость ветра уменьшается до показателя 2 м/с, при этом скорость ветра увеличивается ближе к месту расположения границы РФ (до показателя 4,5 м/с).

В РФ в настоящее время создана своя определенная энергетическая стратегия дальнейшего развития вплоть до 2030 г., в ней внимание уделяется в том числе дальнейшему развитию сферы ветроэнергетики [8]. Преимущество ветровых электростанций, в первую очередь, заключается в их экономической эффективности, в возможности достаточно быстрого ввода мощностей. Кроме того, следует отметить возможность наращивать ВЭС на основании модульной схемы. Эффективные с энергетической точки зрения ветровые зоны, где рационально применение на практике ВЭС, находятся в том числе на арктическом побережья, на Волге и на территории Д. Востока и т. д. Имеющиеся в наличии природный потенциал ветра – среднее значение ветровой энергии перемещения воздушных масс над территорией за несколько лет. Из существующих рассуждений относительно экономического фактора можно сделать вывод о том, что в дальнейшем работать над развитием ветроэнергетики будет более всего целесообразно лишь на территориях, на которых показатели средней скорости ветра - от 3 – 5 м/с, а лучше и больше. В случае, если показатели скорости ветра составляют 7 м/с и больше, то в таком случае отлично подойдут ветроэнергетические установки (ВЭУ), имеющие большую мощность, а также показатели производительности. Требуемые условия с целью определения площадок размещения ВЭУ отражены далее в табл. 1 [3].

Таблица 1 – Необходимые условия для определения площадки для размещения ВЭУ

Критерий	Значение
средние показатели скорости ветра	больше 5 м/с
длительность периода «рабочих» скоростей	9 - 25 м/с
показатели периодичности энергетических затиший	(меньше 3 м/с) 20 – 30%
малочисленные показатели коэффициентов вариации	меньше 0,3
малая повторяемость, либо отсутствие “буревых” скоростей ветра	не больше 20 м/с
отсутствие, либо малая повторяемость “ураганной” скорости ветра	не больше 33 м/с

С учетом этих данных, в итоге можно прийти к выводу о том, что сейчас довольно сложно прийти к однозначному выводу по поводу рациональности реализации большой доли ветроэнергетики в энергосистеме РФ [10]. Развитие альтернативных источников получения энергии сейчас во всем мире, в том числе в нашей стране является в общем-то неизбежным, так как запасы органического ископаемого топлива не являются безразмерными и все равно с течением времени полностью исчезнут. Ветроэнергетика имеет множество своих явных преимуществ, если проводить ее сравнение с существующей традиционной энергетикой. Применение на практике ветрогенераторов вызывает свои сложности, но эту проблему в будущем можно решить, занимаясь исследованием данного направления.

Заключение

Если суммировать сказанное выше, то можно прийти к выводу о том, что дальнейшее развитие и: увеличение доли ветроэнергетики в российской энергосистеме является целесообразным, но в любом случае это потребует законодательной помощи, а также вложения финансов. Помощь в этом должно оказать государство. Поскольку российская экономика весьма энергоемкая и имеет высокий потенциал энергоэффективности, сейчас все большей является роль развития в ТЭК ветроэнергетики.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Быстрицкий Г. Ф. Основы энергетики / Г. Ф. Быстрицкий. – Москва: ИНФРА-М, 2005. – 278 с.
2. Безруких П. П. Ветроэнергетика / П. П. Безруких. – Москва: Интехэнерго-Издат, 2014. – 304 с.
3. Войцех О. Г. Новые перспективные ветроэлектрогенераторы / О. Г. Войцех // Инженер. – 2005. – № 11. – С.8-9.
4. Безруких П. П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии / П. П. Безруких, Д. С. Стребков. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. – 264 с.
5. Абдурашитов Ш. Р. Общая энергетика: учеб. Пособие / Ш. Р. Абдурашитов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 334 с.
6. Алхасов А. Б. Возобновляемая энергетика. / А. Б. Алхасов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 256 с.
7. Бежан А. В. Развитие ветроэнергетики в мире / А. В. Бежан, В. А. Минин // Энергия: экон., техн., экол. – 2007. – № 6. – С.42-44.
8. Доклад о реализации Энергетической стратегии развития России на период до 2030 года / Министерство Энергетики РФ. – 64 с.
9. Сапохин Д. А. Перспективы развития ветроэнергетики в России / Д. А. Салопихин, Д. П. Омельченко, К. А. Чебанов // Neftegaz.RU. – 2016. – № 11-12 (59-60) – С. 50-54.
10. Карамян О. Ю. Технологическое развитие российского топливно-энергетического комплекса под влиянием экономических санкций / О. Ю. Карамян, К. А. Чебанов, Ж. А. Соловьева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18983> (дата обращения: 09.05.2022).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bystritsky G. F. Osnovy energetiki [Fundamentals of energy] / G. F. Bystritsky. – Moscow: INFRA-M, 2005. – 278 p. [in Russian]
2. Bezrukikh P. P. Vetroenergetika [Wind Energy] / P. P. Bezrukikh. – Moscow: Intehenergo-Izdat, 2014. – 304 p. [in Russian]
3. Wojciech O. G. Novyye perspektivnyye vetroelektrogeneratory [New promising wind power generators] / O. G. Voytsekh // Inzhener [Engineer]. – 2005. – No 11. – pp.8-9. [in Russian]
4. Bezrukikh P.P. Vozobnovlyayemaya energetika: strategiya. resursy. tekhnologii [Renewable energy: strategy, resources, technologies] / P. P. Bezrukikh . D. S. Strebkov. – M.: GNU RESH, 2005.– 264 p. [in Russian]

5. Abdurashitov Sh. R. Obshchaya energetika: ucheb. Posobiye [General energy: studies stipend] / Sh. R. Abdurashitov. – 2nd ed., reprint. and add. – Ufa: UGATU, 2006. – 334 p. [in Russian]
6. Alkhasov A. B. Vozobnovlyayemaya energetika [Renewable energy] / A. B. Alkhasov. – M.: FIZMATLIT, 2010. – 256 p. [in Russian]
7. Bezhan A. V. Razvitiye vetroenergetiki v mire [Development of wind power in the world] / A. V. Bezhan. V. A. Minin // Energiya: ekon., tehn., ekol. – 2007. – No. 6. – p.42-44. [in Russian]
8. Doklad o realizatsii Energeticheskoy strategii razvitiya Rossii na period do 2030 goda [Report on the implementation of the Energy Development Strategy of Russia for the period up to 2030] / Ministerstvo Energetiki RF [Ministry of Energy of the Russian Federation]. – 64 p. [in Russian]
9. Sapokhin D. A. Perspektivy razvitiya vetroenergetiki v Rossii [Prospects for the development of wind power in Russia] / D. A. Salopikhin, D. P. Omelchenko, K. A. Chebanov // Neftegaz.RU. – 2016. – № 11-12 (59-60) – pp. 50-54. [in Russian]
10. Karamyan O. Yu. Tekhnologicheskoye razvitiye rossiyskogo toplivno-energeticheskogo kompleksa pod vliyaniem ekonomicheskikh sanktsiy [Technological development of the Russian fuel and energy complex under the influence of economic sanctions] O. Yu. Karamyan, K.A. Chebanov, Zh. A. Solovyeva // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]. – 2015. – № 1; [Electronic resource]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18983> (accessed: 09.05.2022). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.049>

ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ РЕЗЕРВУАРА С УЧЕТОМ ШАГА НАМОТКИ ПРОВОЛОКИ

Научная статья

Жанабай Н.Ж.^{1,*}, Турсункулулы Т.², Утелбаева А.Б.³, Дуйсенбеков Б.⁴

¹ ORCID: 0000-0002-8153-1449;

² ORCID: 0000-0001-6215-7677;

³ ORCID: 0000-0002-4771-9835;

⁴ ORCID: 0000-0002-3476-5218;

^{1, 2, 3, 4} Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

* Корреспондирующий автор (Nurlan.Zhanabay777[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос влияния предварительного напряжения на эксплуатационные условия вертикального стального резервуара. Для численной реализации исследований разработаны компьютерные модели в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench в расчетном модуле статического анализа Static Structural. В качестве эксплуатационных нагрузок модели рассматриваются случаи полного и половинного заполнения резервуара жидкостью, а также случай резервуара без жидкости.

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния стального вертикального цилиндрического резервуара с предварительно-напряженной обмоткой при эксплуатационных нагрузках с постоянной по высоте толщиной стенки. В качестве эксплуатационных нагрузок рассматривались случаи полного и половинного заполнения резервуара жидкостью, а также случай резервуара без жидкости, где также моделировалось три варианта создания предварительных напряжений в конструкции. Для первого варианта обмотка наносилась с одним интервалом в длину диаметра нити между витками 1:1, для второго – с двойным интервалом 1:2, а для третьего – с тройным интервалом 1:3.

Вследствие проведенных исследований получено напряженно – деформированного состояния упрочненного стального вертикального цилиндрического резервуара с предварительно-напряженной обмоткой трех видов при эксплуатационных нагрузках. Полученные результаты позволяют выбрать наиболее эффективную обмотку для обеспечения сейсмостойкости конструкции. Эти исследования являются начальным и неотъемлемым этапом анализа сейсмостойкости стального вертикального цилиндрического резервуара для нефти-нефтепродуктов.

Ключевые слова: Резервуар, оболочка, сейсмостойкость, конструкция, предварительное напряжение.

INFLUENCE OF PRESTRESS ON WORKING CONDITIONS OF CONTAINER WITH WIRE WINDING PITCH

Research article

Zhanabay N.ZH.^{1,*}, Tursunkululy T.², Utelbaeva A.B.³, Dujsenbekov B.⁴

¹ ORCID: 0000-0002-8153-1449;

² ORCID: 0000-0001-6215-7677;

³ ORCID: 0000-0002-4771-9835;

⁴ ORCID: 0000-0002-3476-5218;

^{1, 2, 3, 4} Auevov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan

* Corresponding author (Nurlan.Zhanabay777[at]mail.ru)

Abstract

The article considers the influence of prestressing on operating conditions of a vertical steel tank. For numerical implementation of research, computer models have been developed in the program system of finite element analysis of ANSYS Workbench in the calculation module of static analysis Static Structural. Full and half liquid filling of the container, as well as an empty container, served as operational loads of the model.

Studies of stress-strain state of steel vertical cylindrical container with pre-stressed winding wire at operating loads with constant wall thickness in height have been conducted. Full and half liquid filling of the container served as operational loads, as well as a case of an empty reservoir, which was also simulated in three variants with three pre-stresses in the design. For the first variant, the winding was applied with one interval in the diameter thread length between coils of 1:1, for the second - with a double interval of 1:2, and for the third - with a triple interval of 1:3.

As a result of the carried out studies, the stress-strain state of a strengthened steel vertical cylindrical tank with a pre-stressed winding of three types under operational loads was established. The obtained results make it possible to select the most efficient winding to ensure seismic stability of the structure. These studies are the initial and integral part of seismic stability analysis of a steel vertical cylindrical container for petroleum products.

Keywords: Container, shell, seismic capacity, construction, prestress.

Введение

Развития сырьевой экономики нефтедобывающих стран в основном зависит от объемов добычи сырья, где возникает острый вопрос хранения. В свою очередь конструкция предназначенные для хранения должны реализовываться в основном на технически надежных решениях. Вместе с этим поддержанию подобных конструкций в рабочем состоянии тоже является весьма актуальной задачей, как и мире в целом, так и в нашей Республике в частности.

Резервуары относятся к тонкостенным стальным конструкциям, затраты на которые требуют больших вложений. Посредственное и несерьезное отношение к данному вопросу может привести к необратимым процессам, как разрушение, что может привести к экологически негативной обстановке, а также опасностью для жизни людей [1], [2],

[7], [8]. Учитывая вышеназванные обстоятельства строительство и проектирование подобных конструкций должны основываться на технически возможных новых, инновационных и экономически эффективных возможностях. Тем более, что Республики Казахстан резервуары, построенные или запланированные к строительству территории находятся в сейсмически активных районах, где охват территории составляет примерно 30%.

Одно из решений повышения сейсмостойкости резервуаров является применение предварительного напряжения, что также является одним из путей повышения не сущей способности и снижения металлоёмкости [9], [10], [11], [12]. Идея данного способа заключается в создании в стенке оболочки начальных напряжений путем навивки на корпус оболочки с определенным предварительным усилием высокопрочного профиля. Напряженная обмотка создает в стенке оболочки напряжения обратные по знаку к эксплуатационным напряжениям, которые идут в резерв несущей способности конструкции или приводят к экономии материалов за счет снижения толщины стенки оболочки [13], [14]. Вместе с тем, повышается эффективность работы оболочки за счет выравнивания кольцевых и продольных напряжений в стенке оболочки. Предварительное напряжение может быть также использовано для повышения или восстановления несущей способности конструкций.

Одним из важных достоинств подобных конструкций является возможность регулирования напряженным состоянием конструкции подбором конструктивных параметров предварительного напряжения: усилия, шага и угла навивки нити обмотки, которое осуществляется за счет навивки высокопрочного профиля (проволоки, ленты, стекловолокна, стеклопластика и т.д.).

Вместе с тем анализ исследований [15], [16], [17] показал, что исследования по применению предварительного напряжения в оболочечных, как антисейсмическое мероприятие в конструкциях явно недостаточно. Практически нет исследований по влиянию параметров предварительного напряжения (шаг, усилие натяжения, угол навивки и толщина обмотки) на напряженно-деформированное состояние резервуара и на динамические характеристики системы при статических и динамических воздействиях.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований предварительно напряженных тонколистовых конструкций приводит к выводу, что предварительные напряженные конструкций могут быть отнесены к системам активной защиты на динамические нагрузки.

Целью исследования является выявление особенностей работы напряженно-деформированного состояния предварительно напряженного резервуара. Это даст возможность установления действительной работы, а также влияния конструктивных параметров предварительного напряжения на общую работу модели резервуара. Полученные результаты позволят практически в последующем оценивать применения предварительного напряжения, как антисейсмическое мероприятие.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Исследовать напряженно-деформированного состояния стенки модели предварительно напряженного резервуара при различных эксплуатационных условиях в среде ANSYS;
- 2) Исследовать предварительное напряжение в предварительно напряженном вертикальном стальном резервуаре в среде ANSYS.

При выполнении данного исследования использованы методы теории упругости и пластичности, метод конечных элементов, методы компьютерного моделирования в среде ANSYS.

В работе исследуется статическое напряженно-деформированное состояние вертикальных цилиндрических резервуаров с различным уровнем заполнения. Численному анализу подвергается влияние уровня заполнения резервуара, а также проведено моделирование на статические нагрузки, а также проведена намотки при различном шаге (интервале).

Предполагается, что оболочка изготовлена из изотропного материала, который находится в области упругости. Напряжения и деформации удовлетворяют закону Гука.

Для решения этой задачи наиболее эффективно применение метода конечных элементов, который реализуется использованием программного комплекса ANSYS.

Численное исследование напряженно-деформированного состояния конструкций резервуара, как и любой другой конструкций, требует замены реальной конструкций ее математической моделью. Выбранная математическая модель должна обладать основными свойствами рассчитываемой натурной конструкций и одновременно быть достаточно простой и пригодной для инженерных расчетов.

Выбор расчетной схемы для численного моделирования предварительно напряженного вертикального цилиндрического резервуара при известных параметрах при использовании конечно-элементных пакетов программы ANSYS не представляется сложной задачей. Поэтому, для их моделирования использовалась трехмерная геометрическая модель, которая позволяет точно учитывать указанные особенности конструкции.

Исследование напряженно-деформированного состояния стенки модели предварительно напряженного резервуара при различных эксплуатационных условиях в среде ANSYS

В работе исследуется модель типового стального вертикального цилиндрического резервуара объемом 3 000 м³. Внутренний диаметр резервуара имеет величину 18,38 м, а высота стенки резервуара составляет 11,92 м. Для модели принимается постоянная по высоте толщина стенки, равная 5 мм.

После принятия исходных данных и корректировки программы под поставленные задачи было получены нижеследующие обобщающие результаты исследования.

Анализ результатов показывает, что при всех случаях нагружения деформационный процесс протекает в упругой области, т.к все расчетные значения эквивалентных напряжений не достигают предела текучести $\sigma_{0,2} = 245$ МПа материала корпуса резервуара.

На рисунках 1-3 представлены результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу для резервуара с постоянной толщиной стенки при 3-х уровне жидкости.

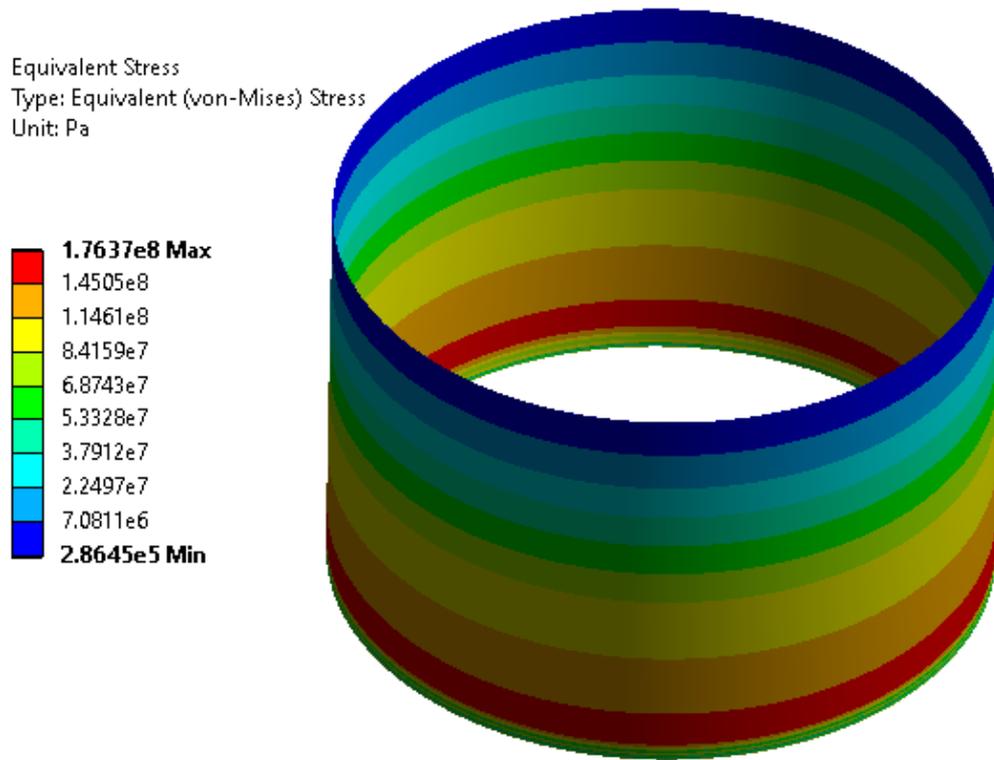


Рис. 1 – Эквивалентные напряжения по Мизесу для резервуара с постоянной толщиной стенки при максимальном уровне заполнения нефтью-нефтепродуктами

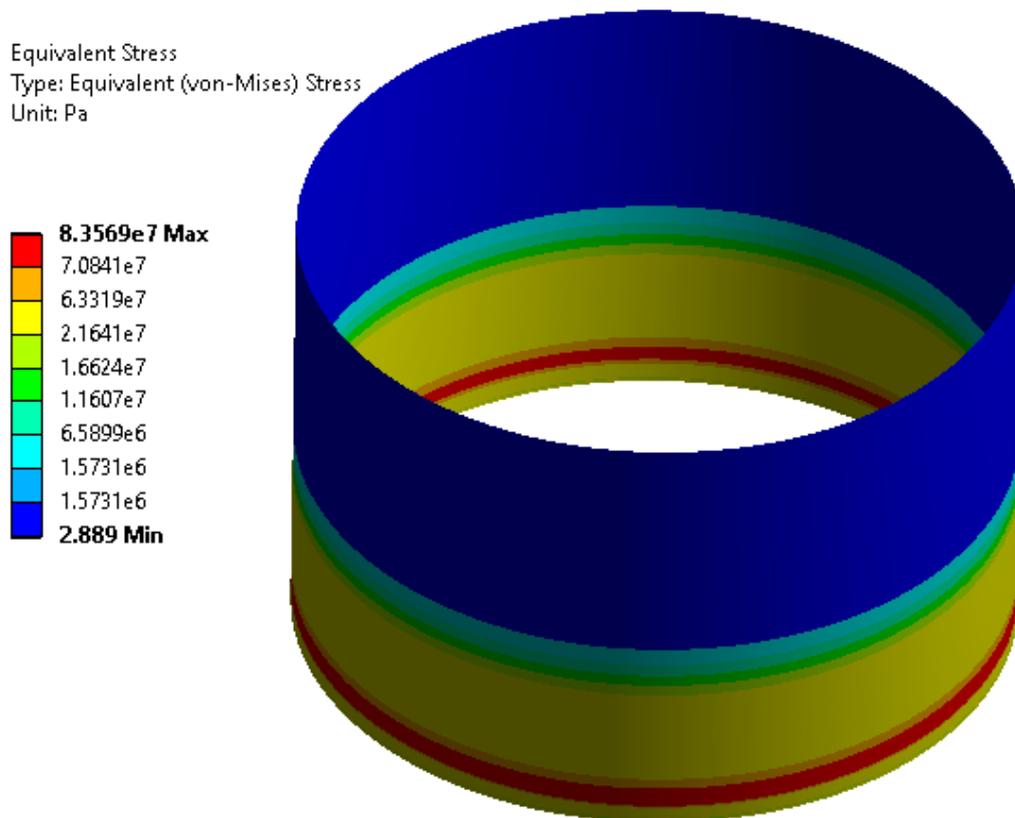


Рис. 2 – Эквивалентные напряжения по Мизесу для резервуара с постоянной толщиной стенки при половинном уровне заполнения нефтью-нефтепродуктами

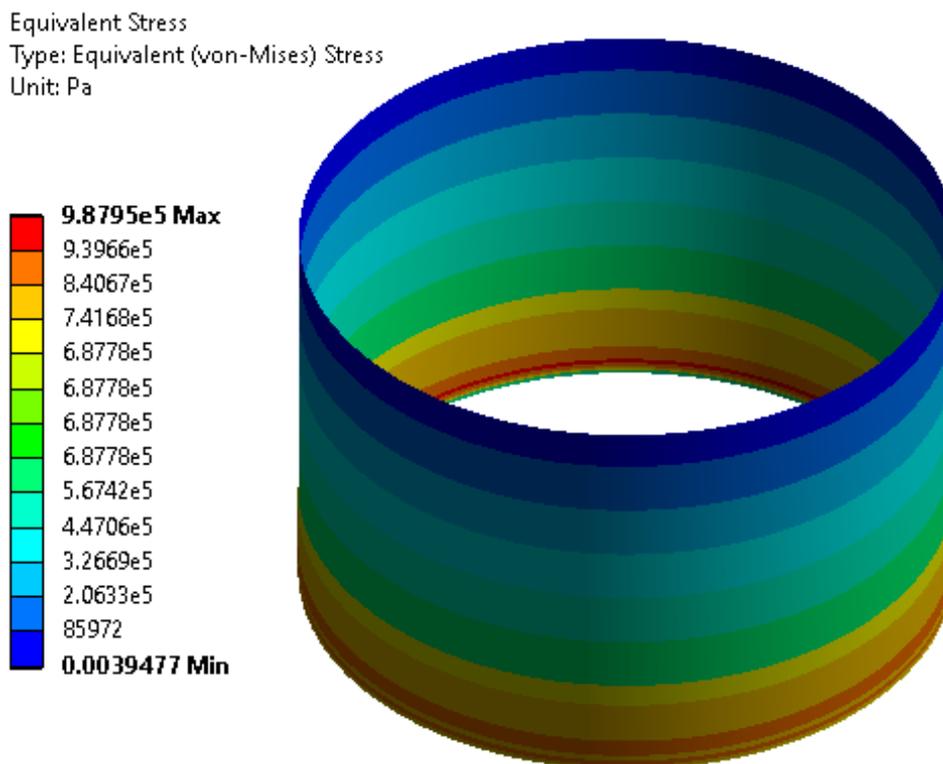


Рис. 3 – Эквивалентные напряжения по Мизесу для резервуара с постоянной толщиной стенки не заполненного нефтью-нефтепродуктами

Анализ максимального заполнения показывает, что напряжения в конструкции равномерно возрастают от верхнего края к нижнему. Максимальные напряжения распределены в окружном поясе цилиндрической стенки вблизи места соединения стенки с днищем, а на нижнем закрепленном крае резервуара наблюдается характерное снижение эквивалентных напряжений. Заметим, что значения максимальных эквивалентных напряжений в конструкции при давлении жидкостью составляют 176,37 МПа, и они меньше, чем максимальные эквивалентные напряжения 198,31 МПа при равномерном давлении 100 кПа.

Анализ при половинном уровне жидкости показывает, что при таком нагружении более половины стенки в верхней части остается ненагруженной. При этом в нижней части стенки резервуара напряжения возрастают к нижнему краю. Сохраняется волновой характер увеличения напряжений в окружном поясе вблизи места соединения стенки с днищем. Также, как и при максимальном заполнении резервуара жидкостью, в этом поясе небольшой длины наблюдаются максимальные напряжения в конструкции.

Анализ конструкции без жидкости показал, что конструкция находится только под действием силы тяжести. Анализ результатов показывает, что эквивалентные напряжения при этом малы по сравнению с предыдущими расчетными случаями. При этом, вблизи зоны крепления стенки с днищем для конструкции с постоянной толщиной стенки сохраняется волновое повышение напряжений в окружных поясах небольшой длины.

Исследование предварительного напряжения в предварительно напряженном вертикальном стальном резервуаре в среде ANSYS

Ранее проведенные исследования показали, что благоприятным методом упрочнения тонкостенных конструкций нагруженных внутренним давлением является создание предварительных напряжений на внешней поверхности. В резервуаре такой эффект может быть достигнут навивкой обмотки на стенку, поскольку при этом в стенке резервуара создается напряженное состояние, которое может компенсировать напряжения, вызванные давлением жидкости.

Анализ рисунков 1-3 напряженно деформированного состояния типовых стальных резервуаров показал, что при эксплуатационных нагрузках в конструкции присутствуют зоны концентрации напряжений, которые являются потенциально опасными для динамических нагрузок вследствие сейсмического воздействия. Для повышения сейсмостойкости типового резервуара предлагается внешнюю стенку укрепить предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки.

В данном исследовании принимались следующие физико-механические характеристики обмотки:

- Проволока изготовлена из стали 65Т.
- Предел текучести принимался равным $\sigma_{0,2} = 785$ МПа [35].
- Диаметр проволоки составляет $d = 0,004$ м.
- Анализировались варианты нанесения обмотки с различным равномерным заданным шагом.

На рисунке 4 схематически показаны эти варианты без соблюдения масштаба для лучшей наглядности результата.

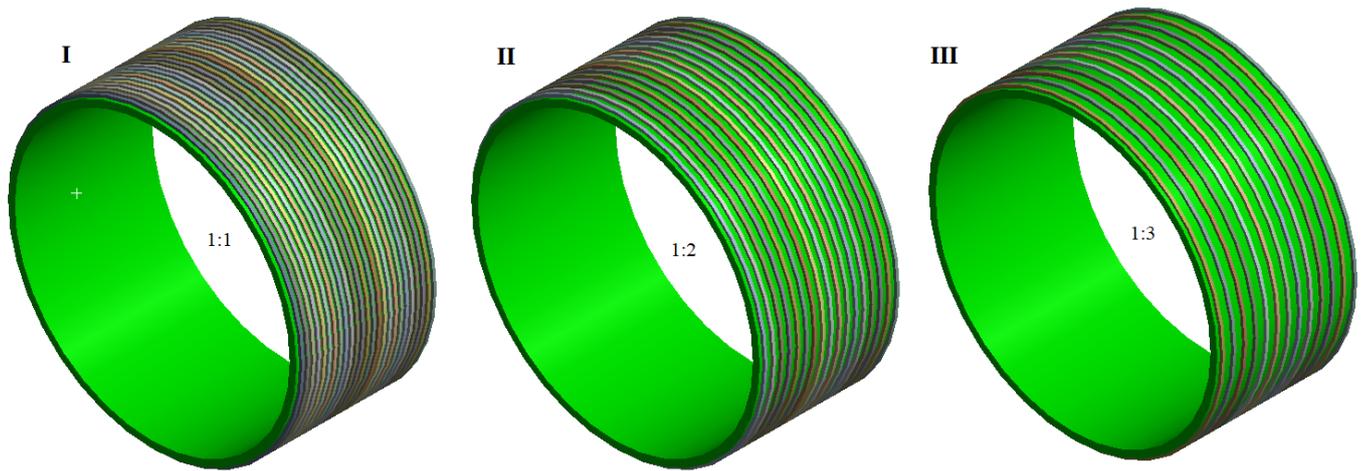


Рис. 4 – Схема трех вариантов нанесения обмотки на типовой резервуар

Эксплуатационное нагружение моделировалось тремя способами: жидкость налита до максимально допустимой высоты, жидкость налита наполовину и резервуар находится без жидкости.

Для численных исследований методом конечных элементов в качестве силы натяжения обмотки был взят показатель 0.75 от критической для трех вариантов намотки стальной высокопрочной проволоки.

Рассмотрим НДС резервуара со стенкой постоянной толщины с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки при максимальном наливе жидкости. На рис. 5 представлены эквивалентные напряжения по Мизесу для случаев обмотки с шагом 1:1, 1:2 и 1:3, соответственно.

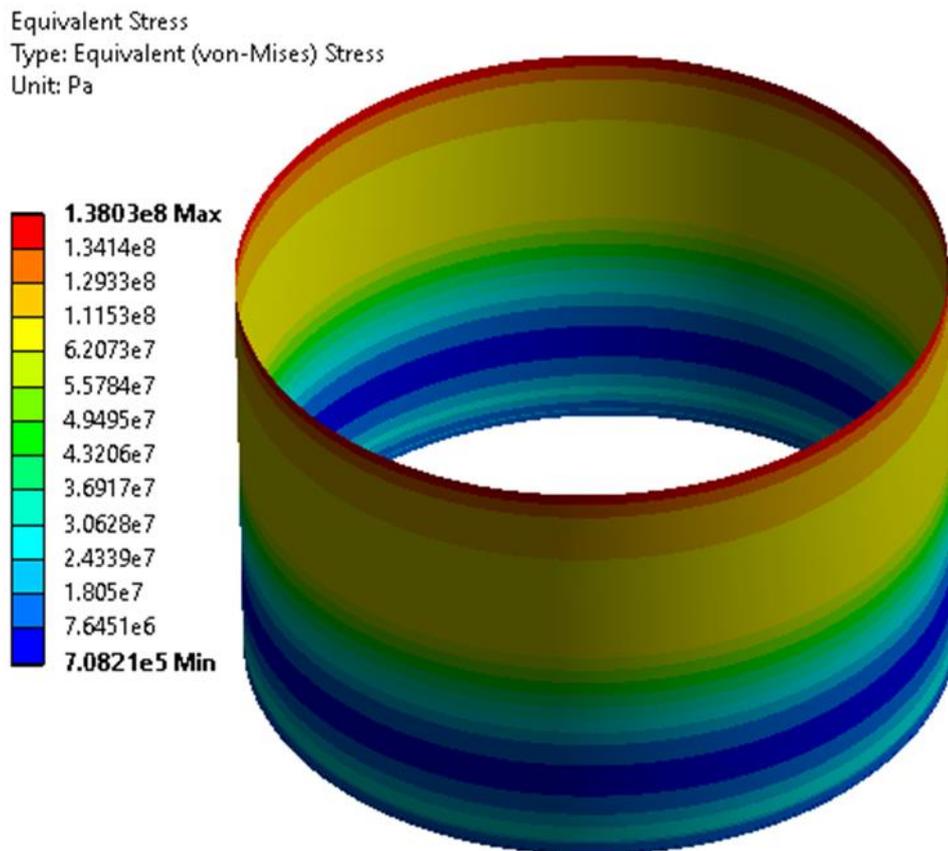


Рис. 5.1 – При максимальном уровне заполнения нефтью-нефрепродуктами шаг обмотки 1:1

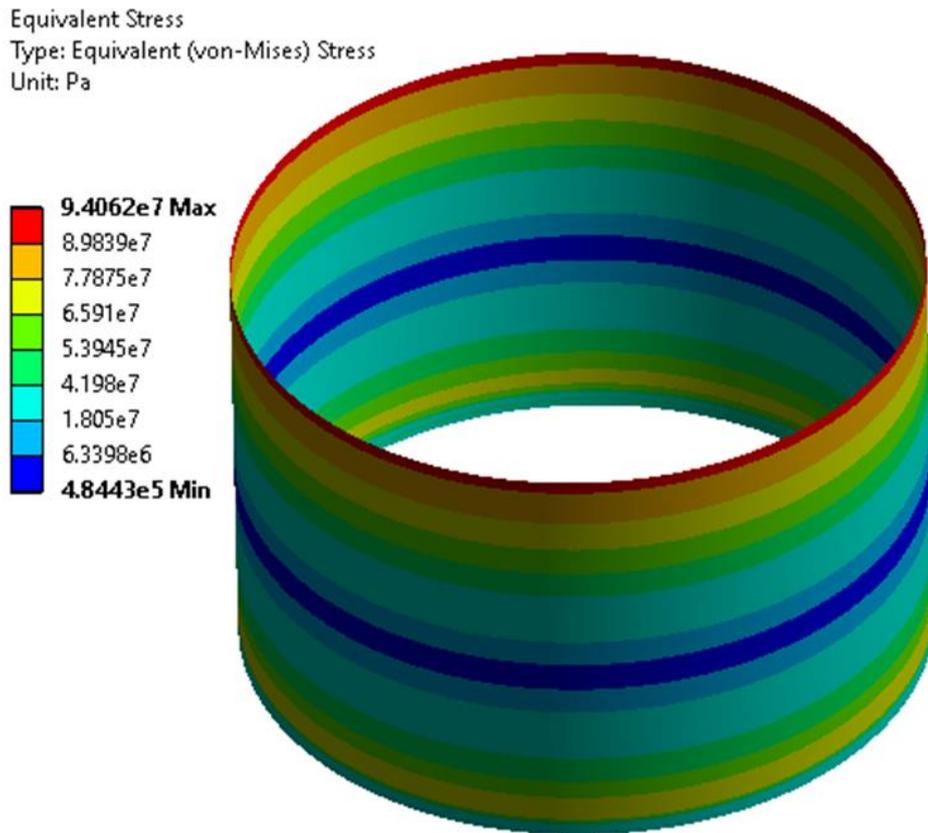


Рис. 5.2 – При максимальном уровне заполнения нефтью-нефтепродуктами шаг обмотки 1:2

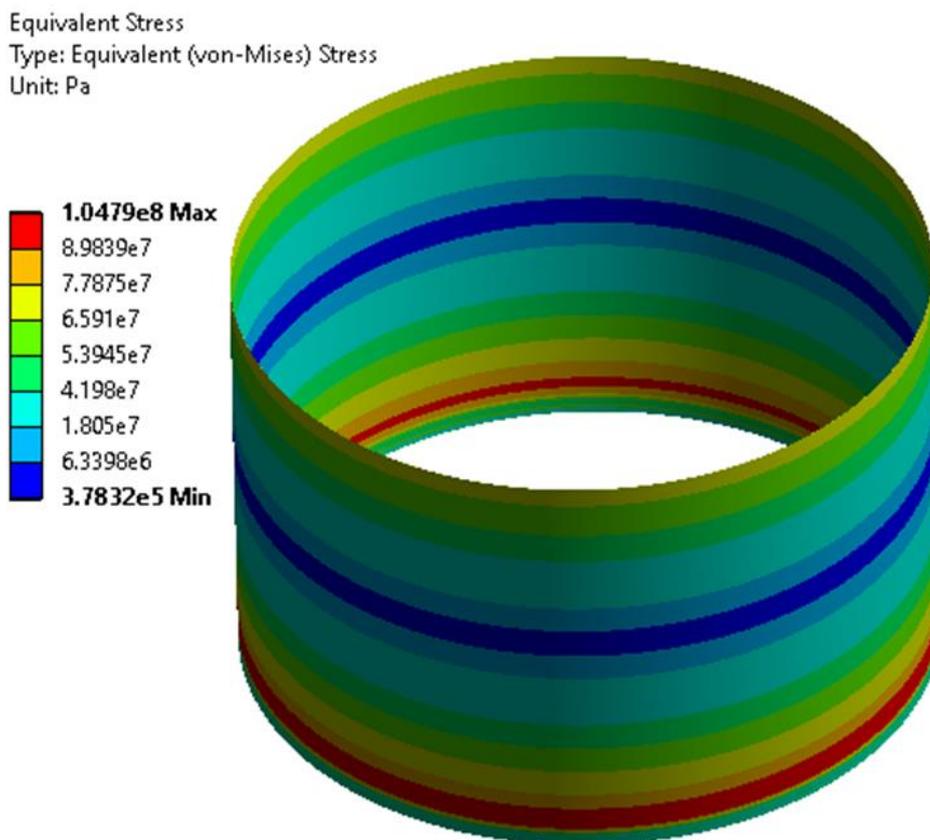


Рис. 5.3 – При максимальном уровне заполнения нефтью-нефтепродуктами шаг обмотки 1:3

Анализ результатов исследований, представленных на рис. 5 показал, что для компенсации напряженного состояния стенки для максимально заполненного жидкостью резервуара наиболее эффективной оказалась обмотка из высокопрочной стальной проволоки с шагом 1:1. Обмотка с шагом 1:2 является допустимой. А обмотка с шагом 1:3 в полной мере не компенсирует зону концентрации напряжений у нижнего края стенки резервуара.

Исследования аналогичным методом резервуара со стенкой постоянной толщины с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки при половинном и без жидкости показали результаты указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные значения напряжений в резервуаре объемом 3000м³ с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки при эксплуатационных нагрузках

Модель резервуара	Условия нагружения	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа			
		обмотка с шагом 1:1	обмотка с шагом 1:2	обмотка с шагом 1:3	без обмотки
Резервуар со стенкой постоянной толщины	Максимально заполнен	138,03	94,06	104,79	176,37
	Наполовину заполнен	132,59	88,61	66,72	83,57
	Пустой	145,15	96,70	72,57	0,98

Для заполненного наполовину жидкостью резервуара наиболее приемлемой оказалась обмотка из высокопрочной стальной проволоки с шагом 1:2. Обмотка с шагом 1:3 является допустимой, а обмотка с шагом 1:1 вызывает в верхней незаполненной жидкостью части резервуара напряжения, которые составляют 54% от предела текучести.

Для пустого резервуара с шагом обмотки 1:1 вызывает напряжения в стенке резервуара 145,15 МПа, с шагом 1:2 – 96.70 Мпа, а с шагом 1:3 – 72.57 Мпа. Это составляет 59.2%, 39,4% и 29,6% от предела текучести материала корпуса резервуара, соответственно.

Заключение

В качестве эксплуатационных нагрузок модели рассматриваются случаи полного и половинного заполнения резервуара жидкостью, а также случай резервуара без жидкости. Для всех рассмотренных случаев нагружения стенки резервуара приложенная эксплуатационная нагрузка вызывает упругие деформации, которые приводят к напряжениям в допустимом диапазоне. Однако, вблизи соединения боковой стенки с днищем для модели наблюдается волновой характер увеличения напряжений в окружных поясах небольшой длины. Эти зоны концентрации напряжений представляют опасность в случае дополнительных нагрузок при сейсмических воздействиях.

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния стального вертикального цилиндрического резервуара с предварительно-напряженной обмоткой при эксплуатационных нагрузках с постоянной по высоте толщиной стенки. В качестве эксплуатационных нагрузок рассматривались случаи полного и половинного заполнения резервуара жидкостью, а также случай резервуара без жидкости. Моделировались три варианта создания предварительных напряжений в конструкции: 1:1, 1:2 и 1:3.

Результат исследований показывает напряженно-деформированного состояния упрочненного стального вертикального цилиндрического резервуара с предварительно-напряженной обмоткой трех видов при эксплуатационных нагрузках. Полученные результаты позволяют выбрать наиболее эффективную обмотку для обеспечения сейсмостойкости конструкции.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Рахматулина Г. Рынок нефтепродуктов Казахстана в рамках таможенного союза: Перспективы развития / Г. Рахматулина // Вестник Института экономики Российской академии наук – 2012. – №2. – С. 143-154. – [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-nefteproduktov-kazahstana-v-ramkah-tamozhennogo-soyuza-perspektivy-razvitiya> (дата обращения 20.03.2022).
2. Анализ рынка услуг хранения и складирования нефти и продуктов ее переработки. [Электронный ресурс]. URL: <https://gidmark.ru/cat1/analiz-rynka-uslug-hraneniya-i-skladirovaniya-nefti-i-produktov-ee-pererabotki> (дата обращения 19.03.2022).
3. Анализ рынка нефтепродуктов в Казахстане – 2022. Показатели и прогнозы. [Электронный ресурс]. URL: <https://tebiz.ru/mi/analiz-rynka-nefteproduktov-v-kazahstane> (дата обращения 19.03.2022).
4. Швырков С. А. Статистика квазимгновенных разрушений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / С. А. Швырков, С. А. Горячев, В. П. Сорокоумов // Пожарная безопасность зданий, сооружений, объектов. – 2007. – Т. 16. – №6. – С. 48-52. – [Электронный ресурс]. URL: <https://gidmark.ru/cat1/analiz-rynka-uslug-hraneniya-i-skladirovaniya-nefti-i-produktov-ee-pererabotki> (дата обращения 19.03.2022).
5. Причины разрушений и взрывов резервуаров. [Электронный ресурс]. <https://uralneftemash.com/blog/prichiny-razrushenij-i-vzryvov-rezervuarov/> (дата обращения 19.03.2022).
6. Разрушения в процессе эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.himstalcon.ru/articles/razrusheniya-v-protssesse-ekspluatatsii-vertikalnyih-tsilindricheskih-rezervuarov-so-statsionarnoy-kryshey> (дата обращения 19.03.2022).

7. Dynamic responses and damage of storage tanks under the coupling effect of blast wave and fragment impact / En Lai, Jie Zhao, Xiaofeng Li et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2021. – Vol. 73. – P. 104617. – [Electronic source]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104617> (accessed 19.03.2022).
8. Propagation probability of domino effect based on analysis of accident chain in storage tank area / Mingguang Zhang, Feng Zheng, Fuzhen Chen et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, – 2019. – Vol. 62. – P. 103962. – [Electronic source]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103962> (accessed 20.03.2022).
9. Рыбина М. А. Предварительно напряженный резервуар. / М. А. Рыбина // VIII Международная студенческая научная конференция. Студенческий научный форум. – 2016. – [Электронный ресурс]. URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016018294> (дата обращения 20.03.2022).
10. Работа и расчет предварительно-напряженных цилиндрических оболочек. [Электронный ресурс]. URL: <http://ctcmetar.ru/metallicheskie-konstrukcii/1709-rabota-i-raschet-predvaritelno-napryazhennyh-cilindricheskikh-obolochek.html> (дата обращения 15.03.2022).
11. Fiori S.R. Rehabilitation of prestressed concrete cylinder pipe – a utility perspective. / S. R. Fiori, D. R. Kendall, S. B. Mulligan // in *Proceedings of the 2001 ASCE Meeting, USA*. – 2001. – pp. 17. – [Electronic source]. URL [https://doi.org/10.1061/40574\(2001\)35](https://doi.org/10.1061/40574(2001)35) (accessed 15.03.2022).
12. Determining the features of oscillations in prestressed pipelines / U. Suleimenov, N. Zhangabay, A. Utelbayeva et al. // *Eastern – European Journal of enterprise technologies*. – 2021. – No. 6/7 (114). – pp. 85-92. – [Electronic source]. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246751> (accessed 15.03.2022).
13. Федорова Т. Г. Экспериментально-теоретическое исследование упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе. / Т. Г. Федорова // Монография. – 2018. – С. 184. – [Электронный ресурс]. URL: <https://phsreda.com/e-publications/e-publication-38.pdf> (дата обращения 15.03.2022).
14. Романов Д. А. Экспериментально-теоретические исследования цилиндрической оболочки из полых ячеек. / Д. А. Романов, С. А. Ращепкина // X международная научно-практическая конференция «безопасность ядерной энергетики», посвящается 60-летию ядерной энергетики. – 2014. – С. 33-35. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22689385> (дата обращения 15.03.2022).
15. Лупин В. А. Проблемы лавинных разрушений газопроводов из сварных труб и способы их предотвращения / В. А. Лупин, Ю. И. Пашков, М. А. Иванов // *Вестник ЮУрГУ*. – 2012. – №15. – С. 26-27. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17742281> (дата обращения 15.03.2022).
16. Zhang Y. L. Vibration of prestressed thin cylindrical shells conveying fluid / Y. L. Zhang, D. G. Gorman, J. M. Reese // *Thin-Walled Structures*. – 2003. – No. 41. – pp. 1103–1127. – [Electronic source]. URL: https://www.researchgate.net/publication/223594730_Vibration_of_prestressed_thin_cylindrical_shells_conveying_fluid (accessed 14.03.2022).
17. Экспериментальный Анализ колебаний предварительно напряженных магистральных трубопроводов / А. И. Айнабеков, У. С. Сулейменов, К. В. Аврамов др. // *Проблемы машиностроения*. – 2016. – Т. 19. – № 1. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26001032> (дата обращения 14.03.2022).
- Список литературы на английском языке / References in English**
1. Rakhmatulina G. Rynok nefteproduktov Kazakhstana v ramkakh tamozhennogo soyuza: Perspektivy razvitiya / G. Rakhmatulina [The oil products market of Kazakhstan within the framework of the Customs Union: Prospects for development] // *Vestnik Instituta ekonomiki Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences]. – 2012. – №2. – pp. 143-154. – [Electronic source]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-nefteproduktov-kazakhstana-v-ramkah-tamozhennogo-soyuza-perspektivy-razvitiya> (accessed 20.03.2022). [in Russian]
2. Analiz rynka uslug khraneniya i skladirovaniya nefti i produktov eye pererabotki [Analysis of the market for storage and warehousing of oil and its refined products]. [Electronic source]. URL: <https://gidmark.ru/cat1/analiz-rynka-uslug-hraneniya-i-skladirovaniya-nefti-i-produktov-ee-pererabotki> (accessed 19.03.2022). [in Russian]
3. Analiz rynka nefteproduktov v Kazakhstane – 2022. Pokazateli i prognozy [Analysis of the oil products market in Kazakhstan – 2022. Indicators and forecasts]. [Electronic source]. URL: <https://tebiz.ru/mi/analiz-rynka-nefteproduktov-v-kazakhstane> (accessed 19.03.2022). [in Russian]
4. Shvyrvkov S. A. Statistika kvazimnogovennykh razrusheniy rezervuarov dlya khraneniya nefti i nefteproduktov [Statistics of quasi-instantaneous destruction of storage tanks for oil and petroleum products] / S. A. Shvyrvkov, S. A. Goryachev, V. P. Sorokoumov // *Pozharnaya bezopasnost zdaniy. Sooruzheniy. Obyektov* [Fire safety of buildings, structures, objects]. – 2007. – Vol. 16. – No. 6. – pp. 48-52. – [Electronic source]. URL: <https://gidmark.ru/cat1/analiz-rynka-uslug-hraneniya-i-skladirovaniya-nefti-i-produktov-ee-pererabotki> (accessed 19.03.2022). [in Russian]
5. Prichiny razrusheniy i vzyrvov rezervuarov [Causes of destruction and explosions of tanks]. [Electronic source]. <https://uralneftemash.com/blog/prichiny-razrusheniy-i-vzyrvov-rezervuarov/> (accessed 19.03.2022). [in Russian]
6. Razrusheniya v protsesse ekspluatatsii vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov so statsionarnoy kryshey [Destruction during operation of vertical cylindrical tanks with a fixed roof.]. [Electronic source]. URL: <https://www.himstalcon.ru/articles/razrusheniya-v-protsesse-ekspluatatsii-vertikalnykh-tsilindricheskikh-rezervuarov-so-statsionarnoy-kryshey> (accessed 19.03.2022). [in Russian]
7. Dynamic responses and damage of storage tanks under the coupling effect of blast wave and fragment impact / En Lai, Jie Zhao, Xiaofeng Li et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2021. – Vol. 73. – P. 104617. – [Electronic source]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104617> (accessed 19.03.2022).
8. Propagation probability of domino effect based on analysis of accident chain in storage tank area / Mingguang Zhang, Feng Zheng, Fuzhen Chen et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, – 2019. – Vol. 62. – P. 103962. – [Electronic source]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103962> (accessed 20.03.2022).
9. Rybina M. A. Predvaritelno napryazhenny rezervuar [Prestressed reservoir]. / М. А. Рыбина // VIII Mezhdunarodnaya

studenteskaya nauchnaya konferentsiya. Studenteskiy nauchnyy forum [VIII International Student Scientific Conference. Student Scientific Forum]. – 2016. – [Electronic source]. URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016018294> (accessed 20.03.2022). [in Russian]

10. Rabota I raschet predvaritelno-napryazhennykh tsilindricheskikh obolochek [Operation and calculation of prestressed cylindrical shells]. [Electronic source]. URL: <http://ctcmetar.ru/metallicheskie-konstrukcii/1709-rabota-i-raschet-predvaritelno-napryazhennykh-cilindricheskikh-obolochek.html> (accessed 20.03.2022). [in Russian]

11. Fiori S.R. Rehabilitation of prestressed concrete cylinder pipe – a utility perspective. / S. R. Fiori, D. R. Kendall, S. B. Mulligan // in Proceedings of the 2001 ASCE Meeting, USA. – 2001. – pp. 17. – [Electronic source]. URL: [https://doi.org/10.1061/40574\(2001\)35](https://doi.org/10.1061/40574(2001)35) (accessed 15.03.2022).

12. Determining the features of oscillations in prestressed pipelines / U. Suleimenov, N. Zhababay, A. Utebayeva et al. // Eastern – European Journal of enterprise technologies. – 2021. – No. 6/7 (114). – pp. 85-92. – [Electronic source]. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246751> (accessed 15.03.2022).

13. Fedorova T.G. Eksperimentalno-teoreticheskiye issledovaniye uprugoplasticheskogo deformirovaniya. Poteri ustoychivosti I zakriticheskogo povedeniya tsilindricheskikh obolochek s sypuchim zapolnitelem pri izgibe [Experimental and theoretical study of elastic-plastic deformation, loss of stability and over-critical behavior of cylindrical shells with bulk filler during bending]. / T. G. Fedorova // Monografiya [Monograph]. – 2018. – pp. 184. – [Electronic source]. – URL: <https://phsreda.com/e-publications/e-publication-38.pdf> (accessed 15.03.2022). [in Russian]

14. Romanov D. A. Eksperimentalno-teoreticheskiye issledovaniya tsilindricheskoy obolochki iz polykh yacheyek [Experimental and theoretical studies of a cylindrical shell made of hollow cells]. / D. A. Romanov. S. A. Rashchepkina // X mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “bezopasnost yadernoy energetiki”. posvyashchayetsya 60-letiyu yadernoy energetiki [X International Scientific and Practical conference “Safety of nuclear energy”. dedicated to the 60th anniversary of nuclear power]. – 2014. – pp. 33-35. – [Electronic source]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22689385> (accessed 15.03.2022). [in Russian]

15. Lupin V. A. Problemy lavinnykh razrusheniy gazoprovodov iz svarnykh trub I sposoby ikh predotvrashcheniya [Problems of avalanche destruction of gas pipelines from welded pipes and ways to prevent them] / V. A. Lupin. Yu. I. Pashkov. M. A. Ivanov // VestnikYuUrGU. [Bulletin of the Moscow State University]. – №15. – pp. 26-27. – [Electronic source]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17742281> (accessed 15.03.2022). [in Russian]

16. Zhang Y. L. Vibration of prestressed thin cylindrical shells conveying fluid / Y. L. Zhang, D. G. Gormanb, J. M. Reese// Thin-Walled Structures. – 2003. – No. 41. – pp. 1103–1127. [Electronic source]. URL: https://www.researchgate.net/publication/223594730_Vibration_of_prestressed_thin_cylindrical_shells_conveying_fluid (accessed 14.03.2022).

17. Eksperimentalnyy Analiz kolebaniy predvaritelno napryazhennykh magistralnykh truboprovodov [Experimental analysis of vibrations of prestressed trunk pipelines] / A. I. Aynabekov. U. S. Suleymenov. K. V. Avramov et al. // Problemy mashinostroyeniya [Problems of mechanical engineering]. – 2016. – Vol. 19. – № 1. – [Electronic source]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26001032> (accessed 14.03.2022). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.050>

МИГРАЦИОННЫЕ ПОТОКИ МЕГАПОЛИСА: СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Научная статья

Итс Т.А.^{1,*}, Сурина А.В.²

¹ ORCID: 0000-0002-4121-3171;

² ORCID: 0000-0002-7477-9040;

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (its7654321[at]yandex.ru)

Аннотация

Усложняющиеся социально-экономические процессы и стремительные перемены приводят к тому, что крупные города как сложные системы не смогут существовать и развиваться, не используя новую модель управления, которая позволит гибко адаптироваться к изменчивым внешним условиям. Существенная роль при обеспечении устойчивого развития принадлежит рациональному управлению процессом миграции мегаполиса. Моделирование миграции – надежный инструмент управления мегаполисом как сложной социо-технической системой. Известны различные модели миграции, но с практической точки зрения наибольший интерес представляют имитационные модели. Целью исследования является разработка системно-динамической модели управления миграционными потоками мегаполиса, которая позволит существенно повысить качество и эффективность его устойчивого развития. Для ее формирования используется пакет iThink 9.1.3.

Ключевые слова: управление, мегаполис, миграционный процесс, системная динамика, имитационное моделирование

MIGRATION FLOWS OF METROPOLIS: A SYSTEM-DYNAMIC MODEL

Research article

Its T.A.^{1,*}, Surina A.V.²

¹ ORCID: 0000-0002-4121-3171;

² ORCID: 0000-0002-7477-9040;

^{1,2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

* Corresponding author (its7654321[at]yandex.ru)

Abstract

As a result of increasingly complex socio-economic processes and rapid changes, large cities as complex systems will not be able to survive and further develop without a new governance model that would allow for flexible adaptation to changing external conditions. Rational management of a metropolis migration process is essential for sustainable development. Migration modelling is a reliable tool for managing a metropolis as a complex socio-technical system. Different models of migration are known, but, from a practical point of view, simulation models are the most interesting. The aim of the study is to develop a system-dynamic model for the management of migration flows of the metropolis, which will significantly improve the quality and effectiveness of its sustainable development. The iThink 9.1.3 package was used to generate it.

Keywords: management, metropolis, migration process, system dynamics, simulation modeling.

Введение

В настоящее время мегаполисы представляют собой основные центры экономической активности, создавая благоприятные предпосылки для роста производительности труда, занятости, уровня и качества жизни, развития инноваций и экономики знаний в целом.

Согласно данным Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) в настоящее время более половины населения мира живут в городах, а города генерируют более 80% мирового ВВП и эта доля постоянно растет [1]. По данным Росстата в 2021 году в Российской Федерации насчитывалось 15 городов с численностью населения выше одного миллиона человек, в которых проживает около 24% населения страны.

Но в то же самое время мегаполисы испытывают деструктивные экологические и социальные последствия своего роста. Существенной проблемой представляется неконтролируемая (либо слабо контролируемая) миграция населения в мегаполис.

Поскольку миграция населения – это отражение социально-экономических процессов, поэтому очень важно анализировать и прогнозировать ее величину, направления и динамику. Для этого необходимо понимать особенности миграции и факторы ее определяющие, а также оценивать последствия миграции. Это не представляется возможным без построения моделей миграции.

Изучение миграционных процессов сталкивается с серьезными терминологическими проблемами. Традиционное рассмотрение миграции как перемещения относительно больших групп людей в рамках определенного географического пространства и в течение определенного отрезка времени [2], обладает очевидной ограниченностью, поскольку в настоящее время перемещения людей носят латентный характер, а сроки и географические рамки этих перемещений оказываются размытыми. Миграционный поток мегаполиса будем рассматривать как перемещение и ассимиляцию определенных групп людей по территории, и статусный рост представителей конкретной социальной группы. Для него характерна устойчивость, способность к самоподдержанию и определенная вязкость. Такие перемещения в отечественной литературе получили название «антропопоток» [3].

Таким образом, объектом исследования в настоящей работе является системное понятие миграционного потока мегаполиса.

Несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию устойчивого развития мегаполисов, их ресурсному обеспечению, управлению ими, почти отсутствуют работы, посвященные моделированию миграционных процессов такой агломерации. При этом большинство исследований носит качественный, описательный характер.

Существует несколько традиционных подходов к моделированию миграции, позволяющих получить приемлемые практические результаты. Самыми распространенными являются гравитационные, факторные, оптимизационные и эконометрические модели, модели марковского типа, но они имеют ряд существенных недостатков, что, в конечном счете, приводит к прогнозным ошибкам.

В то же время наиболее интересные с практической точки зрения имитационные методы моделирования миграционных воздействий на устойчивое развитие мегаполиса, позволяющие проигрывать различные сценарии управления миграционными потоками, недостаточно развиты.

Таким образом, целью исследования является разработка системно-динамической модели управления миграционными потоками мегаполиса, которая позволит существенно повысить качество и эффективность его устойчивого развития.

Методы и принципы исследования

Анализ литературы [4], [5], [6], [7] позволил выявить такие преимущества моделей системной динамики для стратегического управления процессами миграции как проведение исследований на основе неполной информации; возможность использования многоцелевых критериев и учет динамической ситуации при построении и исследовании моделей; хорошая интерпретируемость полученных результатов; технология проведения сценарного исследования на имитационной модели предполагает активное участие эксперта в процессе формирования ментальной модели и принятия решения.

Существенной особенностью имитационного моделирования является необходимость и возможность использования специализированного программного обеспечения. При построении системно-динамических моделей используются различные программные продукты, например, Арена, AnyLogic, Powersim, Vensim. В данном исследовании был использован Ithink. Особенности, определившими выбор, является ее функциональная простота и то, что она не требует специальных навыков и владения сложными математическими методами.

Информационная база исследования включает статистические данные по динамике численности населения, половозрастной структуре населения. Статистика образования, включая численность обучающихся по образовательным программам высшего общего образования, рейтинг университетов.

Результаты и обсуждение

Авторами был разработан типовой блок системно-динамической модели изменения численности населения мегаполиса, определены факторы, влияющие на миграционный поток, и описаны как комплексные переменные модели, предложена методика расчета значимости выявленных переменных на основе метода анализа иерархий для определенных подгрупп населения.

В качестве базы использовалась модель связи численности населения, производственного капитала и капитала сферы услуг, которая была предложена Д. и Д. Медоузами [8]. Предложенная схема была доработана с учетом специфики мегаполиса и концепции антропопока.

Введены новые связи, учитывающие влияние антропопока на запас «численность населения».

Запас «численность населения» рассматривается как совокупность запасов «численность определенных групп населения». Введены новые связи/показатели: социальные программы/социальная политика. Влияние использования невозобновляемых ресурсов в данной модели считаем незначительным. Изменение численности населения зависит от следующих показателей антропопока:

- коэффициент рождаемости;
- коэффициент смертности;
- мощность миграционного и эмиграционного потоков.

Были введены факторы, влияющие на изменения запаса «группа населения»:

- экономика (1 и 2 – притягивающие и выталкивающие соответственно);
- образование (1 и 2 – притягивающие и выталкивающие соответственно);
- медицинское обслуживание;
- социальная политика.

Степень влияния перечисленных факторов будет отличаться в зависимости от возраста, пола и качества антропопока. Кроме того необходимо будет учитывать взаимное влияние факторов друг на друга.

Все население условно разделено на 24 подгруппы в зависимости от возраста (0-17; 18-35; 36-55; 56-80), пола, принадлежности к антропопоку (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Матрица численности групп населения в зависимости от возраста, пола и статуса миграции

Возрастная группа	«аборигены»		«мигранты»		«эмигранты»	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины
0-17	N ₁₁₁	N ₁₁₂	N ₁₂₁	N ₁₂₂	N ₁₃₁	N ₁₃₂
18-35	N ₂₁₁	N ₂₁₂	N ₂₂₁	N ₂₂₂	N ₂₃₁	N ₂₃₂
36-55	N ₃₁₁	N ₃₁₂	N ₃₂₁	N ₃₂₂	N ₃₃₁	N ₃₃₂
56-80	N ₄₁₁	N ₄₁₂	N ₄₂₁	N ₄₂₂	N ₄₃₁	N ₄₃₂

Пусть $N_i = f(\alpha, \gamma, \delta)$ - численность i -ой группы населения. Здесь α – возрастная группа, γ – принадлежность к антропоток, δ - пол, $i = 1, \dots, n$ – число групп населения, $n = 24$. Тогда численность населения мегаполиса вычисляется как сумма численности всех подгрупп.

Сделаем ряд допущений. Для возрастных групп 0-17 и 56-80 не будем делать разделение на подгруппы в зависимости от пола человека. Для антропоток: будем считать, что можно не учитывать/пренебречь в модели подгруппы старшего возраста для миграционного и эмиграционного потоков и младший возраст - для эмиграционного. Для миграционного потока не будем учитывать подгруппу женщин старшей (третьей) 3 возрастной группы (36-55). Для эмиграционного антропоток не будем делать разделение на подгруппы в зависимости от пола.

С учетом этих допущений получаем уточненную матрицу численности групп населения (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Матрица численности групп населения в зависимости от возраста, пола и статуса миграции

Возрастная группа	«аборигены»		«мигранты»		«эмигранты»	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины
1	N_{110}		N_{120}		0	
2	N_{211}	N_{212}	N_{221}	N_{222}	N_{230}	
3	N_{311}	N_{312}	N_{321}	0	0	
4	N_{410}		0	0	0	

Затем необходимо оценить степень влияния различных факторов на изменение численности населения для каждой подгруппы. Дифференциацию коэффициентов, влияющих на вклад антропоток в изменение численности населения, предлагается проводить на базе метода анализа иерархий Т. Саати [9]. Входной информацией для расчетов служат матрицы парных сравнений приоритетов элементов нижнего уровня иерархии, которые формируются экспертами.

Инвариантный блок, отвечающий за изменение численности определенной группы населения в модели антропоток, разработан с использованием пакета iThink 9.1.3 (см. рисунок 1).

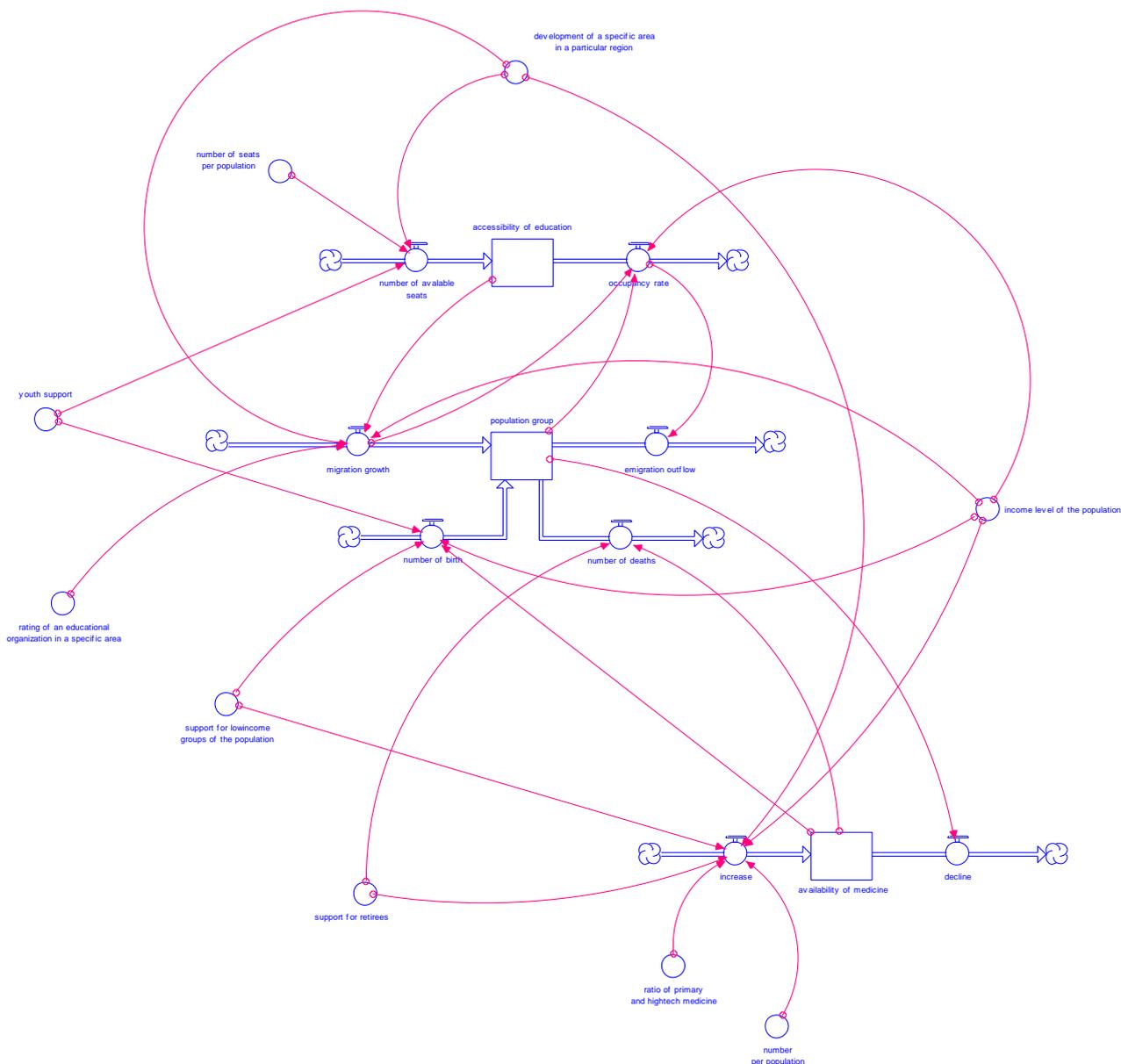


Рис. 1 – Инвариантный блок модели изменения антропоток

Вопросам моделирования миграционных процессов посвящены многие работы. Значительная их часть [10], [11], [12], [13] посвящена вопросам моделирования миграционных изменений на макроуровне, миграционные процессы мезоуровня исследованы недостаточно. В настоящей статье предлагается подход к исследованию именно мезоуровня миграционной системы. Кроме того, в большинстве имитационных моделей используются наборы факторных показателей, относящихся к конкретному региону, и они сильно отличаются в зависимости от региона. Это существенно снижает аналитические возможности таких моделей.

Авторами предложен инвариантный подход к исследованию антропооттока мегаполиса без привязки к конкретной территории.

Заключение

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в развитии подходов к использованию методов математического моделирования как инструментов повышения результативности принятия управленческих решений.

Цель настоящего исследования – разработка методами системной динамики имитационной модели управления миграционными потоками мегаполиса. Использование данной модели позволяет повысить качество и результативность процесса принятия решений по прогнозированию уровня и масштабов миграционной нагрузки на мегаполис и обеспечить его устойчивое развитие.

Определены и описаны как комплексные переменные модели факторы, влияющие на миграционный поток мегаполиса.

Предложен алгоритм определения значимости выявленных переменных с использованием метода анализа иерархий Т. Саати.

Построенная динамическая модель позволяет выявить из множества социально-экономических факторов такие, которые оказывают значимое влияние на миграционную систему мегаполиса. Зная факторы, можно принимать обоснованные управленческие решения демографических проблем. Построенная динамическая модель позволяет разыгрывать сценарии, варианты управления миграционной системой.

Системно-динамическая модель управления миграционными потоками мегаполиса была разработана с использованием пакета iThink 9.1.3.

Графические элементы предложенной модели позволяют отображать нелинейные связи без использования сложного математического аппарата. Что открывает широкие возможности для ее использования на практике.

Представленная в статье модель является базовой и, на наш взгляд, может использоваться для мониторинга общих тенденций изменения численности населения на разных территориях, связанных активными миграционными взаимодействиями.

Представляется перспективным использование агент-ориентированных моделей, которые могут способствовать проверке различных гипотез о стратегиях миграционного поведения людей для конкретных территорий.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. OECD (2012), OECD Environmental Outlook to 2050, OECD Publishing. [Electronic resource]. – URL: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en> (accessed: 10.05.2022).
2. Юдина Т. Н. Социология миграции: учеб. пособие для вузов / Т.Н. Юдина. – М: Академический Проект, 2006. – 272 с.
3. Переслегин С. Б. Человеческие течения / С. Б. Переслегин // Государство. Антропоотток доклад Центра стратегических исследований Приволжского федерального округа – М., 2002. – С. 179-181. – [Электронный ресурс] – URL: <https://bank.nauchniestati.ru/primery/nauchnaja-statja-na-temu-antropotok-ponjatje-priznaki-i-vidy/> (дата обращения: 10.05.2022).
4. Morecroft J. Strategic Modelling and Business Dynamics A Feedback Systems Approach / J. Morecroft. – Chichester: John Wiley&Sons, 2007.
5. Sterman J. Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World / J. Sterman. – New York: McGraw-Hill Higher Education, 2000.
6. Warren K. Competitive Strategy Dynamics / K. Warren. – London: John Wiley & Sons Ltd., 2002.
7. Warren K. Competitive Strategy Dynamics / K. Warren. – London: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
8. Meadows D. H. Limits to Growth: The 30-year Update / D.H. Meadows, J. Randers. D.L. Meadows. – Vermont: Chelsea Green Publ. Co., 2004.
9. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation / T. L. Saaty. – New York : McGraw-Hill, 1980.
10. Andrienko Y. Determinants of interregional mobility in Russia: Evidence from panel data / Y. Andrienko, S. Guriev // Economics of Transition. – 2004. – Vol. 12 (1). – P. 1–27.
11. Макаров В. Л. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв. Агент-ориентированные модели / В. Л. Макаров, В. Р. Бахтизин. – М.: Экономика, 2013.
12. Вакуленко Е. С. Эконометрический анализ факторов внутренней миграции в России / Е. С. Вакуленко // Региональные исследования. – 2015. – Т. 50, № 4. – С. 89–83.
13. Mkrtchyan N. V. Interregional migration in Russia at different stages of the life cycle / N. V. Mkrtchyan, E. Vakulenko // Geo Journal. – 2019. – Vol. 84(6). – P. 1549–1565

Список литературы на английском языке / References in English

1. OECD (2012), OECD Environmental Outlook to 2050, OECD Publishing. [Electronic resource]. – URL: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en> (accessed: 10.05.2022).
2. Yudina T. N. Sociologija migracii [The sociology of migration: To the formation of a new scientific direction] / T.N. Yudina. – M.: Academicheski Proekt, 2006. – 272 p. [in Russian]
3. Pereslegin S. B. Chelovecheskie techenija [Human currents]] [Electronic resource] / S. B. Pereslegin // Gosulfrstvo. Antropotok. – 2002. – p. 179-181. – URL: <https://bank.nauchniestati.ru/primery/nauchnaja-statja-na-temu-antropotok-ponjatie-priznaki-i-vidy/> (accessed : 20.03.2022). [in Russian]
4. Morecroft J. Strategic Modelling and Business Dynamics A Feedback Systems Approach / J. Morecroft. – Chichester: John Wiley&Sons, 2007.
5. Sterman J. Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World / J. Sterman. – New York: McGraw-Hill Higher Education, 2000.
6. Warren K. Competitive Strategy Dynamics / K. Warren. – London: John Wiley & Sons Ltd., 2002.
7. Warren K. Competitive Strategy Dynamics / K. Warren. – London: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
8. Meadows D. H. Limits to Growth: The 30-year Update / D.H. Meadows, J. Randers. D.L. Meadows. – Vermont: Chelsea Green Publ. Co., 2004.
9. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Selling, Resource Allocation / T. L. Saaty. – New York : McGraw-Hill, 1980.
10. Andrienko Y. Determinants of interregional mobility in Russia: Evidence from panel data / Y. Andrienko, S. Guriev // Economics of Transition. – 2004. – Vol. 12 (1). – P. 1–27.
11. Makarov V. L. Social'noe modelirovanie – novyj komp'yuternyj proryv. Agent-orientirovannye modeli [Social modeling – a new computer reaktthrough. Agent-oriented models] / V. L. Makarov, A. R. Bahtizin. – M.: Ekonomika, 2013. [in Russian].
12. Vakulenko E.S. Ekonometricheskij analiz faktorov vnutrennej migratsii v Rossii [Econometric analysis of factors of internal migration in Russia] / E.S. Vakulenko // Regional'nye issledovaniya. – 2015. – Vol. 50. – No. 4. – P. 89–83 [in Russian].
13. Mkrtchyan N. V. Interregional migration in Russia at different stages of the life cycle / N. V. Mkrtchyan, E. Vakulenko // Geo Journal. – 2019. – Vol. 84(6). – P. 1549–1565.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.051>**ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННОГО РЕАГЕНТА-ОСАДИТЕЛЯ**

Научная статья

Курилина Т.А.^{1,*}, Пазенко Т.Я.², Матюшенко А.И.³, Журавлев А.С.⁴^{1, 2, 3, 4} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

* Корреспондирующий автор (ctrelok91[at]mail.ru)

Аннотация

Представлены результаты исследования процесса реагентного обезвреживания сточных вод гальванического производства с применением реагента-осадителя ТНТ-15. Использование стандартных реагентов не всегда обеспечивает требуемую степень извлечения соединений тяжелых металлов, что приводит к необходимости дополнительной очистки другими методами. В результате обработки сточной воды реагентом-осадителем удалось снизить содержание ионом меди Cu^{2+} в воде и определить оптимальную дозу реагента. Для разработки схемы утилизации стоков была построена математическая модель с использованием полученных опытных данных по принципу регрессионного и корреляционного анализа. Найдена зависимость между переменными и условиями оптимума, показана оптимизация процесса. Дополнительно проведен анализ образующегося осадка.

Ключевые слова: сточные воды, реагентная обработка, планирование эксперимента, оптимизация, ионы тяжелых металлов, осадок.

ON EFFECTIVE CLEARING TECHNOLOGY OF COPPER-BEARING WATER WITH NON-SOLVENT- REAGENT

Research article

Kurilina T.A.^{1,*}, Pazenko T. YA.², Matyushenko A.I.³, Zhuravlev A.S.⁴^{1, 2, 3, 4} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

* Corresponding author (ctrelok91[at]mail.ru)

Abstract

The article presents the results of a study of the galvanic production wastewater decontamination process, using non-solvent reagent ТНТ-15. Standard reagents are not always effective enough for drawing out heavy-metal compounds to a needed extent, which makes additional clearing with different methods necessary. Clearing wastewater with non-solvent reagent allowed to reduce copper ion Cu^{2+} in the water and determine the optimal reagent dose. The mathematical model based on empirical data on the principle of regression and correlation analysis was used to develop sewage disposal scheme. The correlation between variables and optimum conditions was found, process optimization shown. The residue was additionally analyzed.

Keywords: wastewater, reactant treatment, experiment planning, optimization, heavy metal ions, residue.

Введение

Выбор коагулянта зависит от его состава, физико-химических свойств и стоимости [1], [2], но зачастую стандартные реагенты являются мало эффективными для медьсодержащих сточных вод, т. к. они могут содержать так называемые комплексообразователи [3], [4]. В связи с этим был проведен ряд экспериментов с применением реагента ТМТ-15, известного как тримеркаптотриазин (trimercaptotriazine). Активной составляющей его является триазин, который реагирует практически как трехвалентный анион и может связывать три эквивалента тяжелых металлов [5]. Структурная формула показана на рисунке 1.

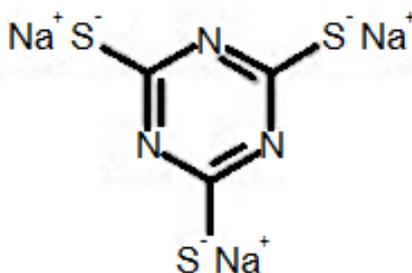
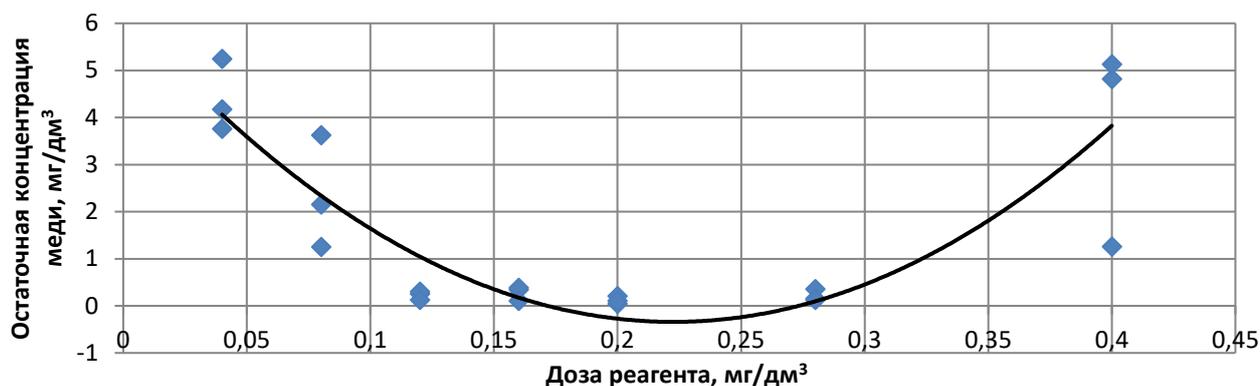


Рис. 1 – Структурная формула тримеркаптотриазина

В лабораторных условиях были приготовлены СВ с различными исходными концентрациями меди: $\text{Cu}_{\text{исх.}}^{2+} = 60$ мг/дм³; $\text{Cu}_{\text{исх.}}^{2+} = 100$ мг/дм³; $\text{Cu}_{\text{исх.}}^{2+} = 140$ мг/дм³, обработанные реагентом ТМТ-15, в результате чего наблюдалось снижение содержания ионов тяжелых металлов до низкого уровня (рис. 2).

Рис. 2 – Графические зависимости остаточной концентрации Cu^{2+} от дозы реагента

Нелинейный характер зависимостей позволяет определить оптимальную дозу реагента-осадителя ТМТ-15 $\approx 0,2-0,25$ мг/дм³. Концентрацию ионов меди Cu^{2+} в воде определяли на атомно-абсорбционном спектрометре 3300 производства Perkin-Elmer с пламенным атомизатором.

В тех случаях, когда информации о рассматриваемом процессе недостаточно или процесс настолько сложен, что невозможно составить его детерминированную модель, обычно прибегают к экспериментально-статистическим методам [6]. Поскольку большое количество экспериментальных задач в технологических процессах формируются как задачи оптимизации, то наиболее широкое распространение получили методы планирования эксперимента [7], позволяющие получить математическое описание объекта исследования – статистическую математическую модель, которая может быть основой решения задач оптимизации [8], [9].

Основной уровень и границы области исследований (звездные плечи табл. 1) были выбраны на основании проведенных экспериментов. За пределами этих диапазонов параметры процесса обезвреживания медьсодержащих СВ возможны, но чем дальше будем отходить от границ указанных параметров, тем больше будет ошибка прогноза [10], [11].

Согласно общепринятой терминологии: X_n – измеряемые и регулируемые параметры, Y_n – контролируемые параметры: Y_1 – остаточная концентрация ионов и Y_2 – объем осадка, %.

Таблица 1 – Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Интервал	+1,68	+1	0	-1	-1,68
X_1 исходная концентрация	40	167,2	140	100	60	32,8
X_2 доза реагента	0,05	0,284	0,25	0,2	0,15	0,116
X_3 величина pH	10	10,68	10	9	8,0	7,32

Получены зависимости в виде уравнений регрессии:

$$Y_1 = 5,09019 + 0,00459326X_1 - 7,79271X_2 - 0,989449X_3 + 0,029605X_1X_2 - 0,002702X_1X_3 - 0,98475X_2X_3 + 0,0000581788X_1^2 + 31,931X_2^2 + 0,0820844X_3^2$$

$$Y_2 = 35,5483 + 0,0197887X_1 - 74,4911X_2 - 6,66786X_3 - 0,0625X_1X_2 - 0,005X_1X_3 + 5,45X_2X_3 + 0,000361X_1^2 + 92,9384X_2^2 + 0,36344X_3^2$$

Проведенный статистический анализ результатов: наибольшее влияние на процесс очистки оказывают доза реагента и величина pH, что вполне закономерно. Далее по уравнениям регрессии получены графические интерпретации (рис. 3), что позволяет регулировать процесс реагентного обезвреживания медьсодержащих сточных вод и учитывать в дальнейшем технико-экономические показатели. При обчете данных использован алгоритм оценки коэффициентов нелинейной регрессионной модели.

На представленных диаграммах для регулирования процесса очистки медьсодержащих сточных вод видно, что при увеличении исходных концентраций меди в обрабатываемой воде требуется незначительное увеличение величины pH, но это приводит к увеличению объема образующегося осадка.

Дополнительно был определен элементный и фазовый состав образцов осадка, получаемого при реагентном обезвреживании сточных вод, содержащих ионы меди.

На рисунке 4 показаны кривые выделения газов при пиролизе осадка, данная информация изменения оптической плотности от температуры, позволяет судить о концентрации веществ, входящих в состав выделяющейся газовой фазы.

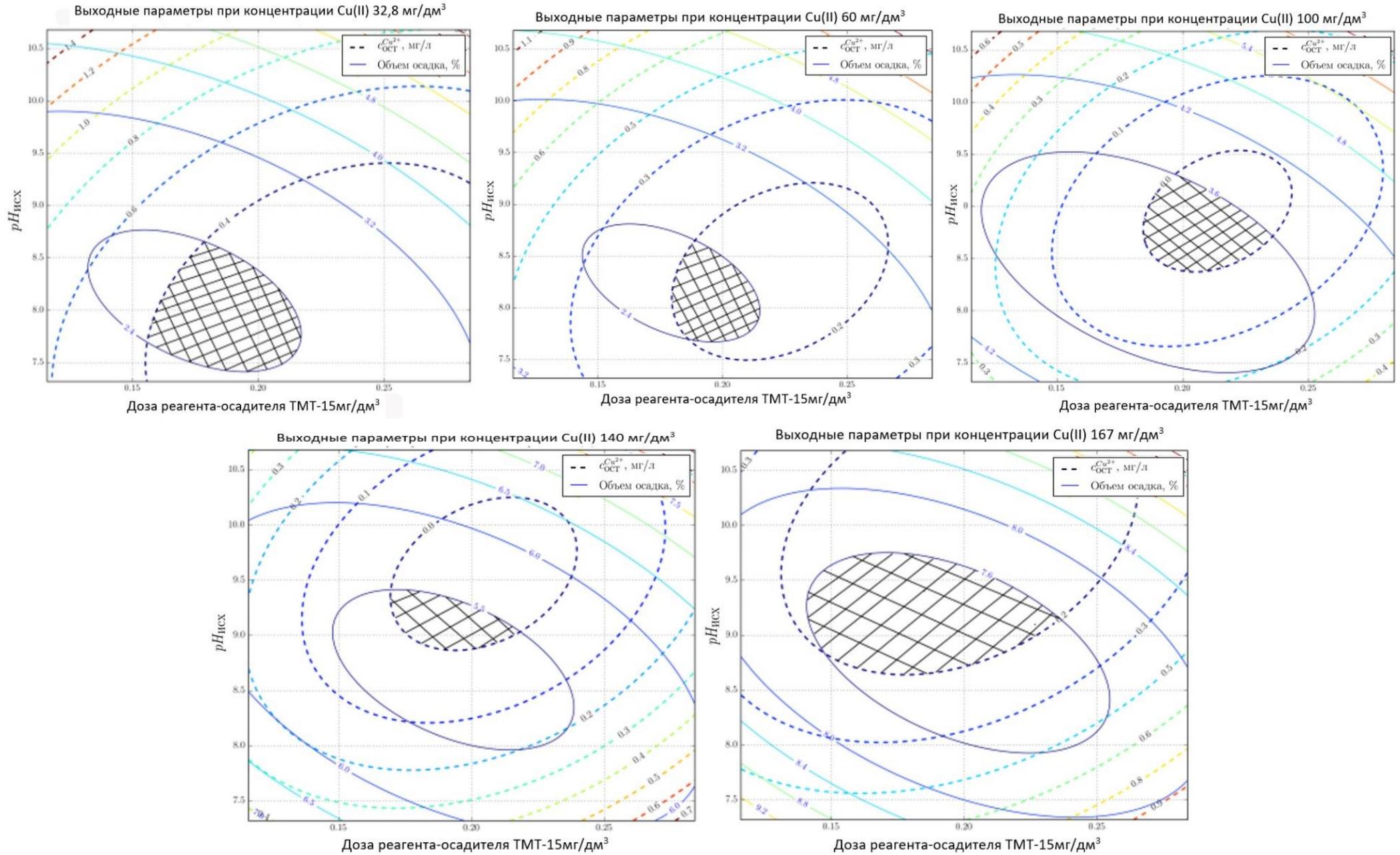


Рис. 3 – Регулировочные диаграммы по Y_1 и Y_2 – образуемому осадку

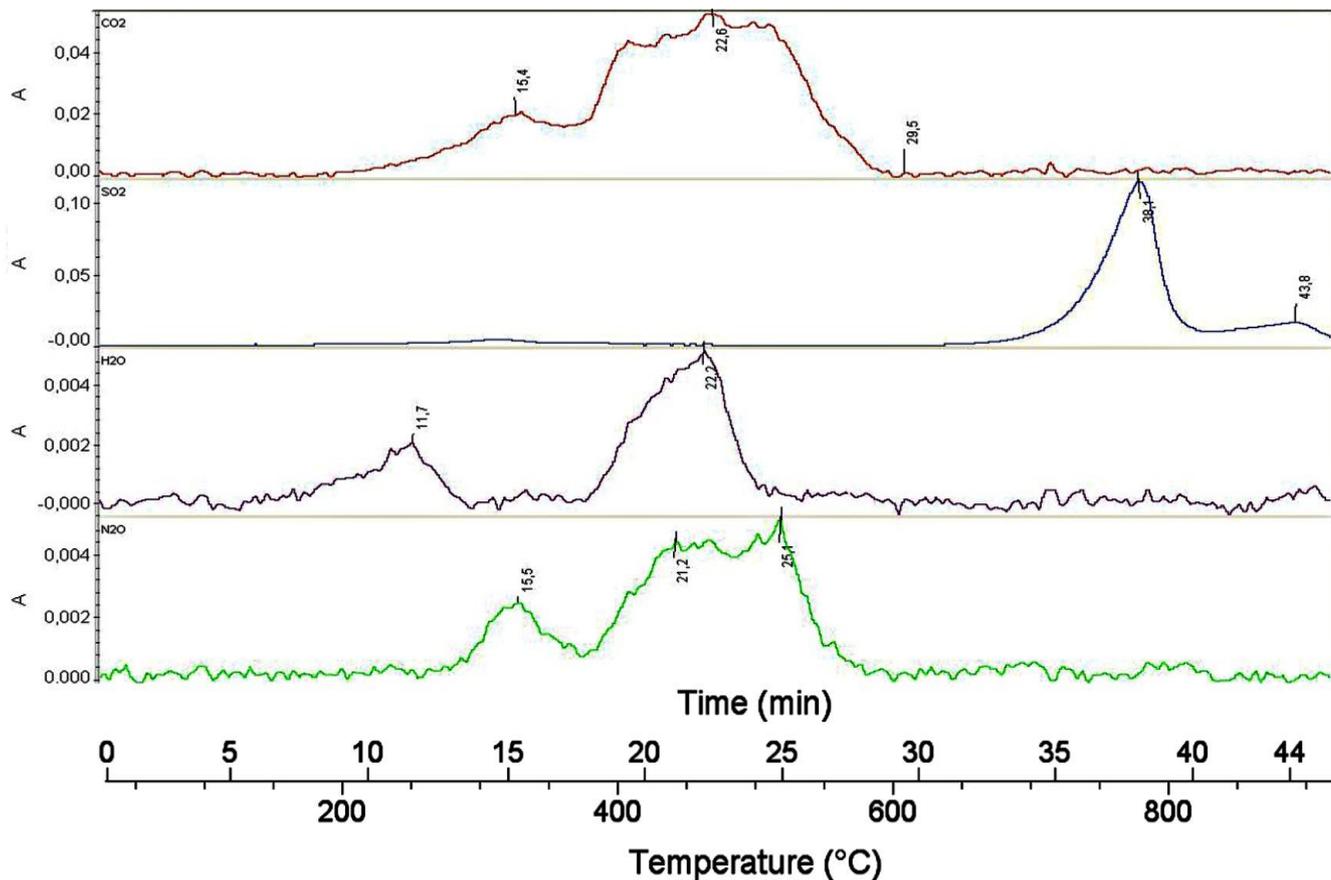


Рис. 4 – Кривые выделения газов (A–оптическая плотность)

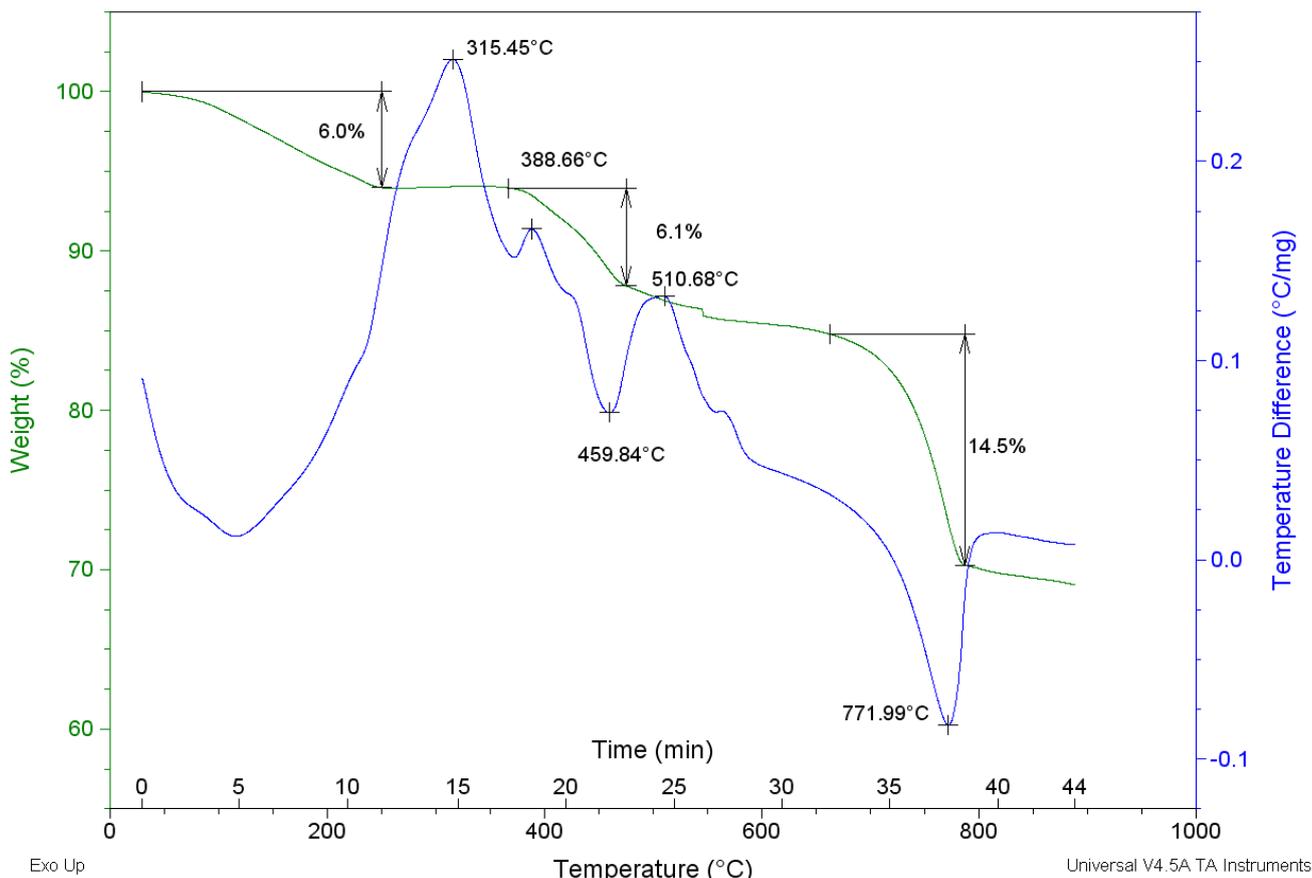


Рис. 5 – Термограмма осадка

Как видно из рисунков 4 и 5, при пиролизе осадка в диапазоне температур 100-250 °С происходит удаление влаги из образца с уменьшением массы на 6,0 %. При дальнейшем нагревании, начиная с 300 °С и до 550 °С, происходит взаимодействие образца с кислородом воздуха, в результате чего начинают выделяться CO_2 и N_2O . При температуре 420 и до 500 °С происходит разложение гидросульфата меди с выделением воды. При дальнейшем нагревании, начиная с 700 °С происходит разложение гидросульфата меди с выделением SO_2 с максимумом при 772 °С.

Для уточнения схемы утилизации подобных осадков проведен термический анализ (рис. 6) в среде инертного газа аргона.

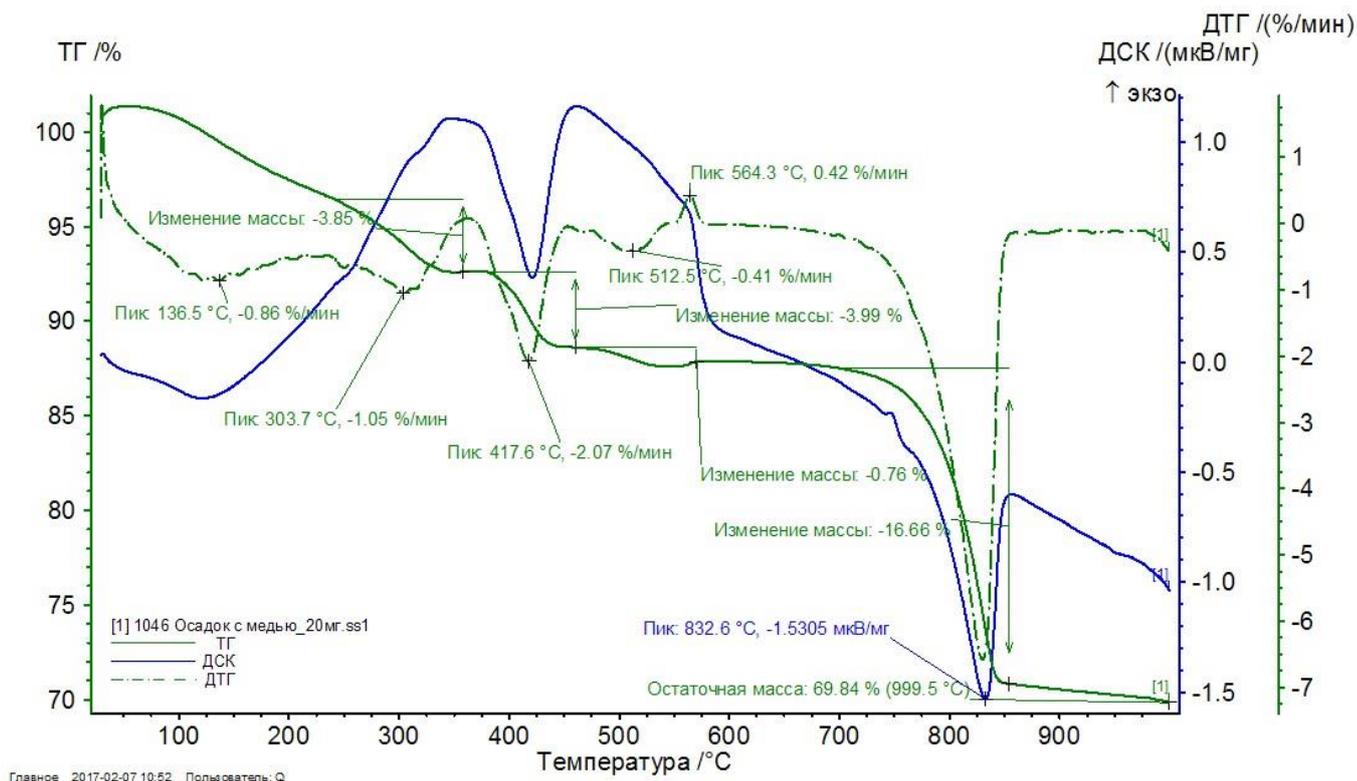
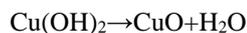
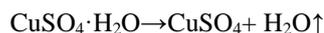


Рис. 6 – Термограмма исходного осадка

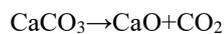
Термический анализ образца осадка, получаемого в результате реагентной обработки, показывает, что кривая ДСК осадка имеет сложный характер: на кривой наблюдается ряд эндотермических эффектов (с поглощением тепла) при $t=136,5$; $303,7$; $417,6$; $512,5$ и $832,6$ °C и два экзотермических эффекта (с выделением тепла) при $t=350$ и 480 °C. Эндотермический эффект в области $t=100 - 305$ °C относится к дегидратации $\text{Cu}(\text{OH})_2$



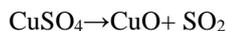
Экзотермический эффект 350 °C связан с выделением CO_2 . Эндотермический эффект $417,6$ °C – обусловлен дегидратацией гидросульфата меди



Эндотермический эффект в области $725 - 832,6$ °C носит сложный характер и связан с разложением кальцита CaCO_3 и образованием CaO



и десульфатизацией с образованием тенорита CuO и серы в виде SO_2 , с резкой потерей массы.



Пик асимметричен, происходит наложение пиков кальцита и тенорита, так как содержание кальцита незначительное.

Приведенные данные образца медьсодержащего осадка на разных термических анализаторах показали, что кривые изменения массы образца осадка в обоих случаях анализа схожи (рис. 5 и рис. 6).

Съемка осадка на дифрактометре в $\text{Cu} - \text{K}\alpha$ излучении дополнила полученные результаты анализа (рис. 7).

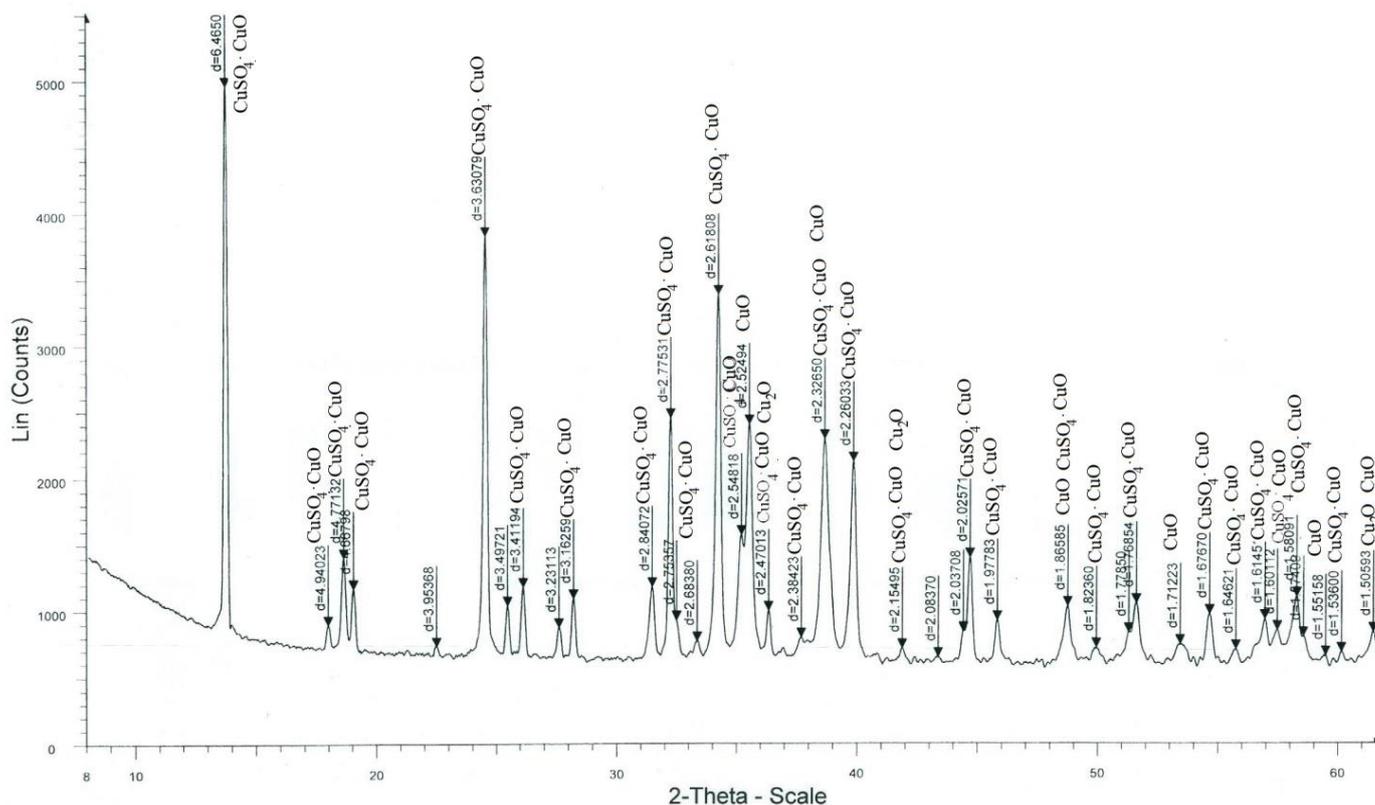


Рис. 7 – Дифрактограмма исходного осадка

На дифрактограмме четко прослеживаются линии, относящиеся к медьсодержащим соединениям, представленным в виде познякита ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и брошантита ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$), а также имеется пик, относящийся к кальциту (CaCO_3). В таблице 2 представлены общие качественные и количественные анализы осадка.

Таблица 2 – Элементный состав образца

Элемент	Содержание, масс. %	Элемент	Содержание, масс. %
Cu	54,1181	Si	0,1714
O	32,5101	Al	0,1378
C	1,0807	Na	0,1061
S	8,6939	Zn	0,1009
Ca	1,8423	P	0,0748
Fe	0,8904	Ni	0,0162
Mg	0,2259	Cr	0,0148
Pb	0,0083	Mn	0,0048
Sr	0,0035		

По результатам исследования была разработана схема обезвреживания подобных стоков с использованием предлагаемого реагента – осадителя ТНТ-15.

Заключение

Таким образом, планирование эксперимента позволило получить математическое описание объекта исследования – статистическую математическую модель, которая может быть основой решения задач оптимизации обезвреживания сточных гальванического производства при разработке схемы утилизации данных стоков. Проведенный комплексный анализ осадка дал возможность уточнить схему обезвреживания медьсодержащих стоков.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Проскуряков В. А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскуряков, Л. И. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
2. Бабенков Е. Д. Очистка воды коагулянтами: монография / Е. Д. Бабенков. – М.: Наука, 1977 – 356 с.
3. Хаммер М. Технология обработки природных и сточных вод / М. Хаммер, перевод с английского канд. техн. наук Ю. В. Матвеева, под редакцией канд. техн. наук Т. А. Карюхиной. – М.: Стройиздат, 1979 – 400 с.
4. Запольский А. К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: свойства, получение, применение / А. К. Запольский, А. А. Баран. – Л.: Химия, 1987 – 208 с.

5. Осадитель тяжелых металлов ТМТ 15. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kntp-project.ru/reagenty/osaditel-tyazhelykh-metallrov-tmt-15.html> (дата обращения: 10.05.2022).
6. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: Учебное пособие для вузов / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
7. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика (Математическая статистика для экономистов), 1981. – 263 с.
8. Вознесенский В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В. А. Вознесенский, В. Н. Выровой, В. Я. Керш. – Киев. Будивельник, 1983. – 144 с.
9. Вознесенский В. А. Численные методы: решения строительно-технологических задач на ЭВМ: учеб. для вузов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б. Л. Огарков, под редакцией В.А. Вознесенского. – Киев: Вища школа, 1989 – 324 с.
10. Хенце М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М. Хенце, П. Ариозэ, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван, перевод с английского канд. хим. наук Т.П. Мосоловой под редакцией д-ра хим. наук С.В. Калюжного. – М.: Мир, 2006 – 480 с.
11. Солдатенко Л. В. Введение в математическое моделирование строительно-технологических задач / Л. В. Солдатенко. – Оренбургский государственный университет, 2009 – 161 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Proskuryakov V. A. Ochistka stochnyh vod v himicheskoy promyshlennosti [Wastewater treatment in chemical industry] / V.A. Proskuryakov, L.I. Shmidt – L.: Himiya [Chemistry], 1977 – 464 p. [in Russian]
2. Babenkov E. D. Ochistka vody koagulyantami [Water treatment with coagulants] / E.D. Babenkov, monograph - M.: Nauka [Science], 1977 – 356 p. [in Russian]
3. Hammer M. Tekhnologiya obrabotki prirodnih i stochnyh vod [Water and waste-water technology] / M. Hammer, translated from English by Ph.D. Yu.V. Matveeva, edited by Ph.D. T.A. Karyuhina – M.: Strojizdat Publishing House, 1979 – 400 p. [in Russian]
4. Zapol'skij A.K. Koagulyanty i flokulyanty v processah ochistki vody: svoystva, poluchenie, primeneniye [Coagulants and flocculants in water treatment process: qualities, obtaining, application] / A.K. Zapol'skij, A.A. Baran – L.: Himiya [Chemistry], 1987 – 208 p. [in Russian]
5. Osaditel tyazhelykh metallov TMT 15 [Heavy metal precipitator TMT 15]. [Electronic resource]. – <https://www.kntp-project.ru/reagenty/osaditel-tyazhelykh-metallrov-tmt-15.html> (accessed: 10.05.2022).
6. Kafarov V. V. Matematicheskoe modelirovaniye osnovnykh processov himicheskikh proizvodstv [Mathematical modeling of the main processes of chemical productions: manual for universities]: Uchebnoye posobie dlya vuzov / V. V. Kafarov, M. B. Glebov. – M.: Vysshaya shkola, 1991. – 400 p. [in Russian]
7. Voznesenskij V. A. Statisticheskiye metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh [Statistical methods of experiment planning in feasibility studies] / V.A. Voznesenskij. – 2nd edition. revised and expanded. – M.: Finansy i statistika (Matematicheskaya statistika dlya ekonomistov), 1981. – 263 p. [in Russian]
8. Voznesenskij V. A. Sovremennyye metody optimizatsii kompozitsionnykh materialov [Modern methods of composite materials optimization] / V.A. Voznesenskij, V. N. Vyrovoy, V. YA. Kersh – Kyiv: Budivelnik, 1983. – 144 p. [in Russian]
9. Voznesenskij V. A. Chislennyye metody resheniya stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach na EVM: ucheb. dlya vuzov [Numerical methods of construction and technological problem-solving on computers: manual for universities] / V. A. Voznesenskij, T.V. Lyashenko, B. L. Ogarkov, edited by V.A. Voznesenskij. – Kyiv: Vishcha shkola, 1989 – 324 p. [in Russian]
10. Henze M. Ochistka stochnyh vod. Biologicheskiye i himicheskyye processy [Wastewater treatment. Biological and chemical processes] / M. Henze, P. Harremoës, J. La Cour Jansen, E. Arvin – M.: Mir Publishers, translated from English by Ph.D. T.P. Mosolova, edited by Ph.D. S.V. Kalyuzhnyj. – 2006 – 480 p. [in Russian]
11. Soldatenko L. V. Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach [Introduction to mathematical modeling of construction and technological problems] / L. V. Soldatenko – Orenburg State University, 2009 – 161 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.052>

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА БИОРАЗЛАГАЕМОМ МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ

Научная статья

Лазарев Д.М.^{1*}, Фаррахов Р.Г.², Аубакирова В.Р.³, Фаткуллин А.Р.⁴, Парфенов Е.В.⁵

¹ ORCID: 0000-0002-4608-8517;

² ORCID: 0000-0001-6670-1537;

³ ORCID: 0000-0002-8483-6408;

⁴ ORCID: 0000-0002-9859-4307;

⁵ ORCID: 0000-0003-0113-314X;

^{1, 2, 3, 4} Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

* Корреспондирующий автор (denis_rb84[at]mail.ru)

Аннотация

Оценена коррозионная стойкость образцов из сплава системы Mg-Zn-Ca без покрытия и с защитными покрытиями. В исследовании защитные покрытия получены в два этапа. На первом этапе методом плазменно-электролитического оксидирования на образцах сформированы неорганические пористые оксидные покрытия. На втором этапе путем заполнения пор оксидных покрытий раствором полилактида получены органические ПЭО+ПЛА-покрытия. В результате формирования покрытий достигнуто значительное уменьшение токов коррозии для сплава системы Mg-Zn-Ca. По результатам электрохимических испытаний показано, что защитные ПЭО- и ПЭО+ПЛА-покрытия проявили большую коррозионную стойкость по сравнению с непокрытыми образцами.

Ключевые слова: плазменно-электролитическое оксидирование, биоразлагаемый сплав, коррозионная стойкость, защитное покрытие.

EVALUATION OF CORROSIVE RESISTANCE OF PROTECTIVE COATINGS ON BIODEGRADABLE MAGNESIUM ALLOY

Research article

Lazarev D.M.^{1*}, Farrahov R.G.², Aubakirova V.R.³, Fatkullin A.R.⁴, Parfenov E.V.⁵

¹ ORCID: 0000-0002-4608-8517;

² ORCID: 0000-0001-6670-1537;

³ ORCID: 0000-0002-8483-6408;

³ ORCID: 0000-0002-8483-6408;

⁵ ORCID: 0000-0003-0113-314X;

^{1, 2, 3, 4} Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

* Corresponding author (denis_rb84[at]mail.ru)

Abstract

The corrosive resistance of Mg-Zn-Ca alloy samples with protective coatings and without it has been evaluated. In the study, protective coatings were obtained in two stages. In the first step, inorganic porous oxide coatings are formed on samples by the method of plasma-electrolytic oxidation. In the second step, organic PEO+PLA coatings are produced by filling the pores of the oxide coatings with a polylactide solution. As a result of the coatings formation, a significant reduction of corroding currents for the Mg-Zn-Ca alloy is achieved. The electrochemical tests showed that the protective PPE and PEO+PLA coatings were more resistant to corrosion than the uncovered ones.

Keywords: plasma-electrolytic oxidation, bioerodible alloy, corrosive resistance, protective coating.

Введение

Магниевый сплав системы Mg-Zn-Ca, благодаря относительно высокой прочности, является многообещающим вариантом для создания временных биоразлагаемых имплантатов [1], [2]. Однако, из-за большой разницы между значениями стандартных потенциалов Mg и Zn, данный сплав имеет высокую скорость растворения в коррозионно-активной среде организма человека, что препятствует его применению в качестве материала имплантата [3], [4]. Указанный недостаток можно преодолеть, если на магниевый имплантат нанести защитное покрытие, например, методом плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) [5]. ПЭО является разновидностью электрохимических процессов оксидирования, но реализуется при высоких напряжениях, которые вызывают горение микроразрядов, модифицирующих поверхность обрабатываемого сплава [5]. Защитные покрытия, сформированные методом ПЭО, обладают хорошей адгезией, повышают прочность и коррозионную стойкость материала подложки [6]. Пористые ПЭО-покрытия также могут использоваться в качестве подслоя для последующего нанесения органических покрытий [6], например, путем заполнения пор полилактидом (ПЛА), для улучшения биосовместимости и большего увеличения коррозионной стойкости магниевого сплава [7], [8]. Поэтому в данной работе проводится сравнение коррозионных свойств неорганического ПЭО-покрытия и органического ПЭО+ПЛА-покрытия.

Методы и принципы исследования

Для исследования использовались образцы, вырезанные в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 1 мм, изготовленные из сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca. Поверхность непокрытых образцов шлифовалась всухую наждачной бумагой зернистостью P2000.

Формирование ПЭО-покрытий методом плазменно-электролитического оксидирования осуществляли с помощью автоматизированной технологической установки [9]. ПЭО проводили в силикатно-щелочном электролите [10] в течение

5 минут при постоянной температуре 20 ± 1 °С. Обработку осуществляли в импульсном униполярном режиме при постоянной амплитуде импульсов напряжения $U_m = 470$ В, скважности $dp = 10$ % и частоте $f = 500$ Гц.

Исследование структуры ПЭО-покрытия проводилось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEM6390. Толщину ПЭО-покрытия измеряли с помощью вихретокового толщиномера для диэлектрических покрытий на металлических подложках Defelsko Positector 6000, оборудованного датчиком типа N для немагнитных подложек. Пористость покрытия определялась с помощью программы ImageJ по РЭМ-фотографиям.

Для заполнения пор органическим компонентом образцы с ПЭО-покрытиями погружали на 1 ч в раствор, содержащий 1,5 г ПЛА и 15 мл хлороформа. Образцы со сформированным органическим ПЭО+ПЛА-покрытием сушили при комнатной температуре в течение 24 ч.

Для оценки коррозионной стойкости образцов проводились электрохимические испытания с помощью потенциостата-гальваностата-импедансметра Элинс Р-5Х (Россия) в растворе Рингера с $pH=7,4$ в трехэлектродной ячейке объемом 80 мл с хлоридсеребряным электродом сравнения и платиновым противоэлектродом. Испытания проходили при температуре 37°С в течение 12 часов, при этом в течение первых двух часов измерялся электродный потенциал свободной коррозии до установления стационарного состояния на поверхности образца. Для получения поляризационных кривых, после установления стационарного состояния, выполнялась развертка потенциала в диапазоне от -300 до $+300$ мВ относительно установившегося значения электродного потенциала со скоростью сканирования 0,25 мВ/с. Ток и потенциал коррозии вычислялись из поляризационных кривых по tafelевским участкам [11], [12].

Результаты и обсуждения

В результате экспериментов по ПЭО в импульсном униполярном режиме получены образцы с неорганическим защитным покрытием. На рисунке 1 представлена РЭМ-фотография поверхности образца с ПЭО-покрытием. В результате исследования морфологии поверхности (см. рисунок 1) установлено, что сформированное покрытие имеет неомогенную структуру. При этом наряду с ровными плотными областями покрытие имеет развитую систему пор, характерную для ПЭО-покрытий. Толщина сформированного покрытия h составила $22 \pm 2,42$ мкм, а пористость – $35,1 \pm 2,56$ %.

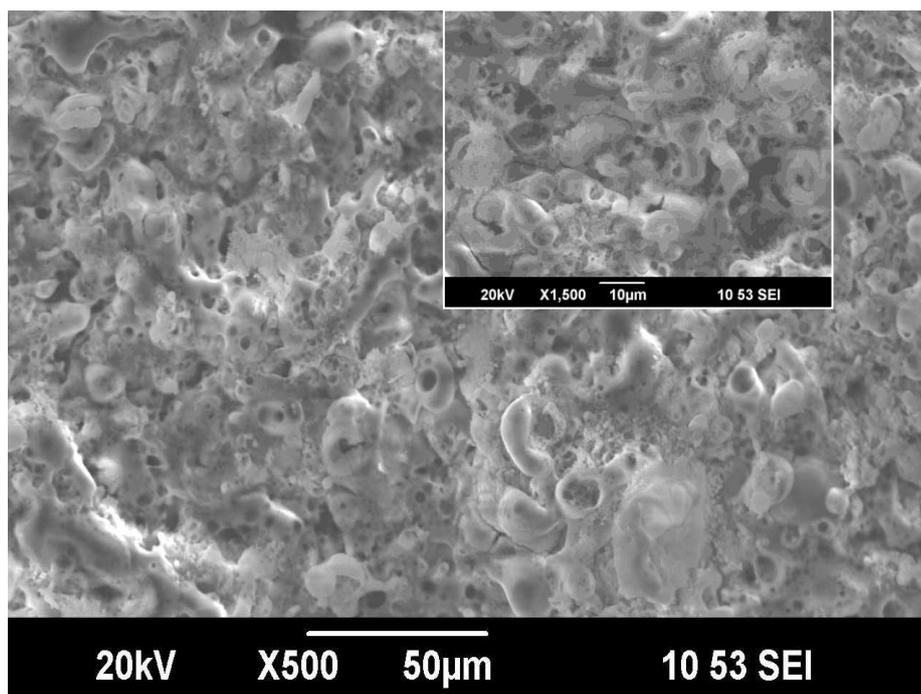


Рис. 1 – РЭМ-фотография поверхности образца с ПЭО-покрытием

В результате погружения образцов с ПЭО-покрытием в раствор ПЛА получены органические ПЭО+ПЛА-покрытия. На рисунке 2 представлены поляризационные кривые, полученные в результате электрохимических коррозионных испытаний образцов без покрытия и с покрытием (ПЭО и ПЭО+ПЛА). На основе анализа поляризационных кривых (см. рисунок 2) были рассчитаны параметры, определяющие коррозионную стойкость образцов: потенциал свободной коррозии (E_k), ток коррозии (I_k) и поляризационное сопротивление (R_p). Результаты расчета коррозионных параметров образцов представлены в таблице 1.

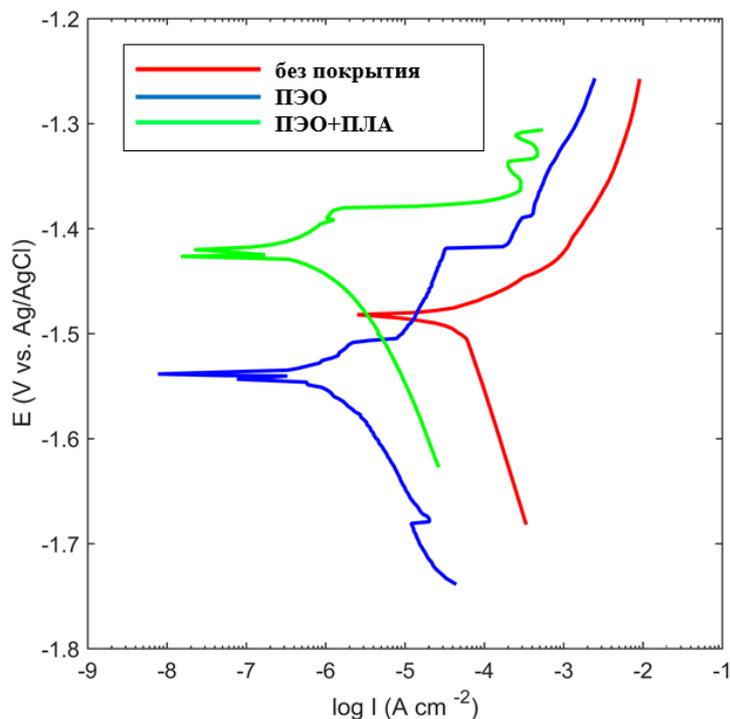


Рис. 2 – Поляризационные кривые, полученные в результате проведения электрохимических коррозионных испытаний образцов

Таблица 1 – Результаты расчета коррозионных параметров образцов

Образец	Ток коррозии I_k , мкА/см ²	Потенциал свободной коррозии E_k , В	Поляризационное сопротивление R_p , Ом·см ²
без покрытия	60,42±1,81	-1,48±0,017	257,57±62
ПЭО	1,01±0,07	-1,54±0,019	1,43·10 ⁴ ±3700
ПЭО+ПЛА	0,94±0,05	-1,43±0,013	2,43·10 ⁴ ±3750

Сравнение поляризационных кривых (см. рисунок 2) показывает, что наклон катодных ветвей практически одинаков для всех образцов, что указывает на сходство катодных процессов коррозии. При этом для образцов ПЭО и ПЭО+ПЛА наблюдается смещение катодных ветвей в сторону меньших значений токов коррозии. Совместный анализ поляризационных кривых (см. рисунок 2) и результатов расчета коррозионных параметров (см. таблицу 1) показывает, что наименьшие значения тока коррозии и наибольшие значения поляризационного сопротивления имеют образцы ПЭО и ПЭО+ПЛА. Это свидетельствует о том, что сформированные защитные покрытия значительно повышают коррозионную стойкость сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca. Значение тока коррозии для образца ПЭО+ПЛА несколько меньше, чем для образца ПЭО, что обусловлено снижением пористости ПЭО-покрытия за счет заполнения его пор частицами ПЛА в результате погружения в раствор.

Анодные ветви поляризационных кривых, представленных на рисунке 2, для образца без покрытия и образца ПЭО незначительно сдвинуты друг относительно друга. Рассматриваемые анодные ветви практически монотонно возрастают, что указывает на сходство в коррозионном поведении данных образцов на анодном участке. Ход анодной ветви поляризационной кривой для образца ПЭО+ПЛА (см. рисунок 2) отличается от хода анодных ветвей для образцов без покрытия и ПЭО. Для образца ПЭО+ПЛА при значении потенциала -1,38 В на анодной ветви наблюдается резкий рост тока с последующей пассивацией. При этом далее ток образца ПЭО+ПЛА стремится к току образца ПЭО.

На рисунке 3 представлены фотографии образцов после коррозионных испытаний.



Рис. 3 – Фотографии образцов после коррозионных испытаний

Анализ фотографий образцов после коррозионных испытаний (см. рисунок 3) показывает, что на образцах без покрытия и ПЭО наблюдаются слои продуктов коррозии, а на образце ПЭО+ПЛА – пузырьки. Из рисунка 3 видно, что степень коррозионных повреждений значительно меньше для образца ПЭО+ПЛА по сравнению с образцами без покрытия и ПЭО, что может быть связано с образованием дополнительного защитного плотного слоя в результате погружения образца с ПЭО-покрытием в раствор ПЛА.

Заключение

В работе показано, что неорганическое ПЭО-покрытие и биосовместимое ПЭО+ПЛА-покрытие позволяют значительно уменьшить токи коррозии сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca. Образцы с защитными покрытиями обладают большей коррозионной стойкостью по сравнению с непокрытым образцом.

Таким образом, при изготовлении перспективных имплантатов из сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca с улучшенными коррозионными свойствами предлагается модифицировать их поверхность за счет формирования пористого слоя ПЭО с последующим заполнением пор ПЛА-частицами.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10144).

Funding

This research is supported by Russian Science Foundation (project No. 17-79-10144).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. High Performance Fine-Grained Biodegradable Mg-Zn-Ca Alloys Processed by Severe Plastic Deformation / A. Vinogradov, E. Vasilev, V. I. Kopylov et al. // *Metals*. – 2019. – Vol. 9 (186). – P. 1–16. DOI: 10.3390/met9020186.
2. Zheng Y. F. Biodegradable metals / Y.F. Zheng, X.N. Gu, F. Witte // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2014. – Vol. 77. – P. 1–34. DOI: 10.1016/j.mser.2014.01.001.
3. Zhang B. P. Research on Mg-Zn-Ca alloy as degradable biomaterial / B. P. Zhang, Y. Wang, L. Geng // *Biomaterials – Physics and Chemistry*. – 2011. – P. 183–204. DOI: 10.5772/23929.
4. Hornberger H. Biomedical coatings on magnesium alloys – a review / H. Hornberger, S. Virtanen, A. R. Voccaccini // *Acta Biomaterialia*. – 2012. – Vol. 8 (7). – P. 2442–2455. DOI: 10.1016/j.actbio.2012.04.012.
5. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х т. / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд и др. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.
6. Микродуговое оксидирование магниевых сплавов (обзор) / Б. В. Владимиров, Б. Л. Крит, В. Б. Людин и др. // *Электронная обработка материалов*. – 2014. – № 50 (3). – С. 1–38.
7. Revealing the Effects of Microarc Oxidation on the Mechanical and Degradation Properties of Mg-Based Biodegradable Composites / S. B. Muhammad, A. Maqbool, M. Saleem et al. // *ACS Omega*. – 2020. – Vol. 5. – P. 13694–13702. DOI: 10.1021/acsomega.0c00836.
8. Preparation and characterization of PLA coating and PLA/MAO composite coatings on AZ31 magnesium alloy for improvement of corrosion resistance // S. Ping, N. Bo, E. Shanshan et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 262. – P. 26–32. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.069.
9. Автоматизированная технологическая установка для исследования электролитно-плазменных процессов / Е. В. Парфенов, Р. Г. Фаррахов, В. Р. Мукаева и др. // *Вестник УГАТУ*. – 2016. – Т.20. – №4 (74). – С. – 23–31.
10. Защитные свойства ПЭО-покрытий на биорезорбируемом сплаве Mg-1%Zn-0,2%Ca / Д. М. Лазарев, Р. Г. Фаррахов, Г. Д. Худододова и др. // *Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов 12–12 декабря 2019 г., Пермь / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»*. – Пермь, 2020. – С. 83–86.
11. Дамаскин Б. Б. *Электрохимия* / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. – 2-е изд., испр. и перераб. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 672 с.
12. Scully J. R. Polarization resistance method for determination of instantaneous corrosion rates / J. R. Scully // *Corrosion*. – 2000. – Vol 56 (2). – P. 199–218. DOI: 10.5006/1.3280536.

Список литературы на английском языке / References in English

1. High Performance Fine-Grained Biodegradable Mg-Zn-Ca Alloys Processed by Severe Plastic Deformation / A. Vinogradov, E. Vasilev, V. I. Kopylov et al. // *Metals*. – 2019. – Vol. 9 (186). – P. 1–16. DOI: 10.3390/met9020186.
2. Zheng Y. F. Biodegradable metals / Y.F. Zheng, X.N. Gu, F. Witte // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2014. – Vol. 77. – P. 1–34. DOI: 10.1016/j.mser.2014.01.001.
3. Zhang B. P. Research on Mg-Zn-Ca alloy as degradable biomaterial / B. P. Zhang, Y. Wang, L. Geng // *Biomaterials – Physics and Chemistry*. – 2011. – P. 183–204. DOI: 10.5772/23929.
4. Hornberger H. Biomedical coatings on magnesium alloys – a review / H. Hornberger, S. Virtanen, A. R. Voccaccini // *Acta Biomaterialia*. – 2012. – Vol. 8 (7). – P. 2442–2455. DOI: 10.1016/j.actbio.2012.04.012.
5. Suminov I. V. Plazmenno-electroliticheskoe modifitsirovanie poverhnosti metallov i splavov. V 2 t. [Plasma electrolytic modification of surfaces of metals and alloys. In 2 vol.] / I. V. Suminov, P. N. Belkin, A. V. Epelfeld et al.. – М.: Technosfera, 2011. – 512 p. [in Russian]
6. Vladimirov B. V. Microdugovoe oksidirovanie magnievykh splavov (obzor) [Microarc oxidation of magnesium alloys (review)] / B. V. Vladimirov, B. L. Krit, V. B. Ludin et al. // *Electronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of material]. – 2014. – No. 50 (3). – P. 1–38. [in Russian]

7. Revealing the Effects of Microarc Oxidation on the Mechanical and Degradation Properties of Mg-Based Biodegradable Composites // S. B. Muhammad, A. Maqbool, M. Saleem et al. // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5. – P. 13694–13702. DOI: 10.1021/acsomega.0c00836.
8. Preparation and characterization of PLA coating and PLA/MAO composite coatings on AZ31 magnesium alloy for improvement of corrosion resistance // S. Ping, N. Bo, E. Shanshan et al. // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 262. – P. 26–32. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.069.
9. Parfenov E.V. Avtomatizirovannaya tehnologicheskaya ustanovka dlya issledovaniy elektrolitno-plazmennih processov [Automated technological equipment for research into electrolytic plasma processes] / E. V. Parfenov, R. G. Farrakhov, V. R. Mukaeva et al. // Vestnik UGATU [Ufa State Aviation Technical University]. – 2016. – Vol. 20. – No. 4 (74). – P. 23–31. [in Russian]
10. Lazarev D. M. Zashitnye svoystva PEO-pokrytii na bioresorbiruемом сплаве Mg-1%Zn-0,2%Ca [Protective properties of PEO coatings on Mg-1%Zn-0.2%Ca bioresorbable alloy] / D. M. Lazarev, R. G. Farrakhov, G. D. Khudododova et al. // Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov 11–12 dekabrya 2019 g. [Materials of International scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students 11–12 December 2019], Perm / Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossiiskoi Federacii, Federalnoe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Permskii nacionalnyi issledovatel'skii politehnicheskii universitet» [Ministry of Science and High Education of the Russian Federation «Perm National Research Polytechnic University»]. – Perm, 2020. – pp. 83–86. [in Russian]
11. Damaskin B. B. Elektrohimiya [Electrochemistry] / B. B. Damaskin, O. A. Petriy, G. A. Tsirlina. – 2nd edition, corrected and recycled. – M.: Himija, KolosS, 2006. – 672 p. [in Russian]
12. Scully J. R. Polarization resistance method for determination of instantaneous corrosion rates / J. R. Scully // Corrosion. – 2000. – Vol 56 (2). – P. 199–218. DOI: 10.5006/1.3280536.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.053>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЕБНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА» В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19

Научная статья

Марченко А.Л.*

ORCID: 0000-0002-1825-0023,

Московский авиационный институт, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (marchenkoal[at]mail.ru)

Аннотация

Вынужденный перевод технических вузов полностью или частично в связи с вирусной пандемией на дистанционную форму обучения студентов потребовал разработки и использования электронных образовательных ресурсов для поддержки всех видов аудиторных занятий и самостоятельной работы студентов при изучении технических дисциплин, в том числе дисциплины «Электротехника и электроника». Курс указанной дисциплины требует большой практической работы при ограниченном объеме выделенных часов на изучение курса. Использование разработанных электронных образовательных ресурсов (учебно-программных сред моделирования и анализа электронных устройств, учебно-программных тренажеров, компьютерного лабораторного практикума и др.) позволило выполнить требования ФГОС ВО последнего поколения по обеспечению качества подготовки студентов по дисциплине. В статье приведен пример использования учебно-программной среды ARCF при изучении активного RC-фильтра, благодаря которой появилась возможность снизить вероятность появления вычислительных ошибок, свести к минимуму рутинную счетную работу для построения графиков частотных характеристик фильтра и тем самым к увеличению времени на решение поставленных задач обучения.

Ключевые слова: учебно-программная среда, электроника, активный RC-фильтр.

THE USE OF EDUCATIONAL AND SOFTWARE ENVIRONMENTS IN STUDY OF DISCIPLINE «ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS» DURING THE COVID-19 PANDEMIC

Research article

Marchenko A.L. *

ORCID: 0000-0002-1825-0023,

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

* Correspondent author (marchenkoal[at]mail.ru)

Abstract

The forced transfer of technical universities, altogether or partly, due to the pandemic, to distance learning required the development and use of electronic educational resources to support all types of classroom studies and work of students in their study of technical disciplines, including the discipline of «Electrical engineering and electronics». Its course requires a lot of practical work with a limited amount of hours allocated for the studying. Use of developed electronic educational resources (educational and software environments of modeling and analysis of electronic devices, educational and training software, computer laboratory workshop, etc.) made it possible to meet the requirements of the FSES HE last edition of quality assurance of students' training in the discipline. The article provides an example of the educational and software environment of ARCF use in the study of the active RC-filter, with which it became possible to reduce the probability of computational errors occurrences, to minimize the routine counting work for constructing charts of frequency characteristics of the filter and this way to increase the time to solve the set tasks of training.

Keywords: educational and software environment, electronics, active RC-filter.

Введение

Концепция дистанционного образования предполагает наличие или разработку учебно-программных сред (УПС) моделирования и анализа электронных устройств, учебно-программных тренажеров, компьютерного лабораторного практикума, сессий тестирования с мультимедийными заданиями в открытой форме и др.), необходимых для успешного формирования у обучаемых профессиональных компетенций в изучаемой предметной области, предписанных в ФГОС ВО последнего поколения [1].

Использование кафедральных лицензионных УПС типа Mathcad, Multisim и др. для моделирования и анализа электронных устройств при дистанционном образовании невозможно, так как они функционируют только при их установке на конкретном вычислительном устройстве (ВУ) обучаемого, поэтому для поддержки учебного процесса по электротехническим дисциплинам для всех видов занятий используются открытые или разработанные на кафедрах УПС.

Содержание типового УПС обычно включает обобщенную схему электронного устройства, техническое задание на проектирование на ее основе вариантов заданий, рекомендованную методику его синтеза, пример расчета параметров элементов схемы с построением графиков характеристик смоделированного устройства. Составленный отчет о выполненных заданиях студенты отправляют для контроля в Lms-структуру вуза.

Учебно-программные тренажеры [2], [3], [4], [5], разработанные с участием студентов в рамках их проектной деятельности, функционируют в двух режимах: в тренировочном и контрольном. При работе в тренировочном режиме оцениваются действия студента при выполнении каждого этапа задания: при его программной проверке отмечаются красным цветом ошибочные операции и выводятся подсказки по их устранению. Он может многократно выполнять этот этап задания без ограничения времени, до устранения ошибок, так как для него заблокирован переход к выполнению следующего этапа задания.

В контрольном режиме студент выполняет задание в течение ограниченного времени без подсказок с выводом интегральной оценки за выполнение всех операций задания в баллах, вычисленных как отношение правильно выполненных операций к общему числу необходимых действий.

Учебно-программные среды и тренажеры включены в учебно-методические комплексы: по электротехнике [6], [7] и электронике [8], [9].

Моделирование, расчет и построение характеристик ARC-фильтров

Рассмотрим одну из подобных учебно-программных сред – среду ARCF, разработанную с использованием программной среды Borland C++ Builder. Для функционирования среды ARCF необходимо ВУ с ОС Windows 11, с браузером MS Edge и объемом свободной памяти 20 МБ.

Цель разработки УПС ARCF – создание электронного образовательного ресурса по изучению методики синтеза активных RC-фильтров студентами технических вузов всех форм обучения для поддержки учебного процесса модуля «Электроника» как в условиях всплеск пандемии, так и при сокращении объема аудиторных часов на треть и более в последние годы по многим направлениям подготовки бакалавров с увеличения времени на самостоятельную работу на изучение дисциплины «Электротехника и электроника»

Задача проектирования активных RC-фильтров представляет собой типовую задачу синтеза, которая решается математическим методом, при котором процедура проектирования состоит из ряда последовательно выполняемых этапов. При этом результаты, полученные в процессе решения задач на предыдущем этапе, являются исходными данными для задач, решаемых на последующих этапах проектирования.

Основными этапами проектирования активных RC-фильтров являются: а) формулировка и решение аппроксимационной задачи: обычно используется идеализированная нормированная амплитудно-частотная характеристика $H_u(\omega)$; б) выбор элементной базы и схемная реализация ARC-фильтра нижних частот.

Основные теоретические положения

Требования к миниатюризации электронной аппаратуры фильтрации сигналов на низких частотах (скажем, с частотами среза $\omega_c = 10 \dots 500$ Гц) привели к разработке активных фильтров, которые не содержат индуктивных элементов и могут быть реализованы в виде интегральных микросхем.

Частотный (полосно-пропускающий) фильтр (ЧФ) – селективный четырёхполюсник (рис. 1, а), пропускающий без заметного ослабления электрические колебания (напряжения, тока) определённых частот и подавляющий колебания остальных частот. Полосу частот с возможно малым затуханием, например, напряжения u_2 называют полосой пропускания $\Delta\omega_{\text{п}}$ (рис. 1, б), а полосы частот с большим ослаблением сигнала – полосами задерживания (задержки) $\Delta\omega_{\text{з1}}$ и $\Delta\omega_{\text{з2}}$. Граничные частоты между полосой пропускания и полосами задерживания называют частотами среза ω_c : нижней $\omega_{\text{н}}$ и верхней $\omega_{\text{в}}$. Тогда ширина полосы пропускания $\Delta\omega_{\text{п}} = \omega_{\text{в}} - \omega_{\text{н}}$.

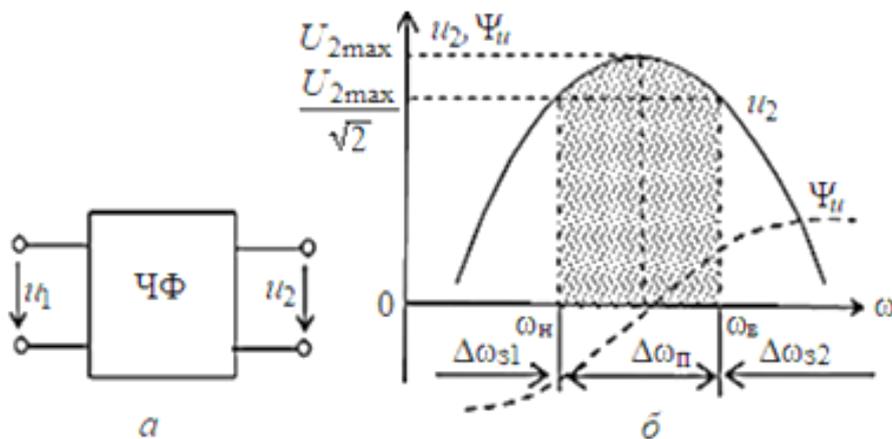


Рис. 1 – Условное обозначение частотного фильтра (а), граничные частоты и полосы пропускания и задержки напряжения u_2 полосового фильтра (б)

Активные RC-фильтры (ARC-фильтры) состоят из активных элементов (транзисторов, операционных усилителей и др.), работающих в линейном режиме, постоянных резисторов R и конденсаторов C (RC-двухполюсников). На рис. 2 даны примеры реализации звена 2-го порядка ARC-фильтра в общем виде (а), состоящего из операционного усилителя ОУ и пяти RC-двухполюсников Z_k (б), звена 1-го порядка (в) и звеньев 2-го порядка фильтров нижних (ФНЧ) (г) и верхних (ФВЧ) (д) частот и полосового фильтра (ПФ) (е) [12].

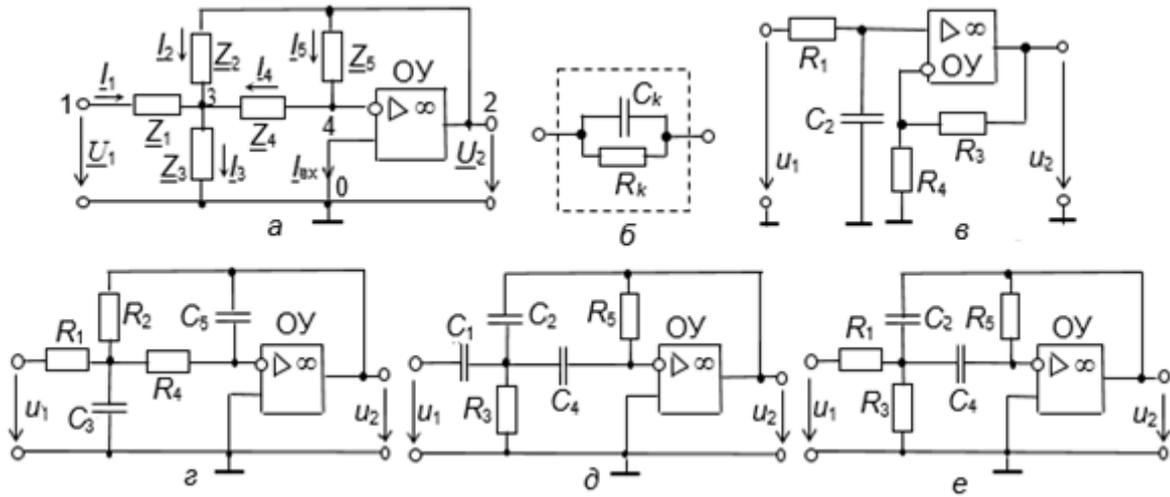


Рис. 2 – Схемы звеньев ARC-фильтров

Определение коэффициентов передачи звеньев ARC-фильтров

В качестве объекта моделирования электронного устройства был выбран активный RC-фильтр, построенный на основе операционных усилителей (ОУ) с бесконечным усилением и с многопетлевой отрицательной обратной связью.

Существует много способов реализации ARC-фильтра с заданной передаточной функцией по напряжению $H_u(p)$ n -го порядка. Наиболее распространенным является способ, при котором эту функцию представляют в виде произведения сомножителей (звеньев) второго порядка [11], т.е.

$$H_u(p) = H_1(p) \cdot H_2(p) \cdot \dots \cdot H_n(p), \tag{1}$$

а для фильтров нечетного порядка в качестве сомножителя входит функция одного звена 1-го порядка.

Заменив оператор $p = j\omega$ в передаточной функции $H_u(p)$ звена, получают его комплексный коэффициент передачи $H_u(j\omega) = U_2/U_1$, а после несложных преобразований функции $H_u(j\omega)$ – его амплитудно-частотную $H_u(\omega)$ (АЧХ) и фазо-частотную $\Psi(\omega)$ (ФЧХ) (см. рис. 1, б) характеристики.

Используя обобщенную схему звена (см. рис. 2, а) ARC-фильтра, найдем выражение его коэффициента передачи по напряжению $H_u(\omega)$. Для этого составим уравнения первого закона Кирхгофа для узлов 3 и 4 схемы с учетом того, что входной ток ОУ $I_{вх} \approx 0$ и напряжение $U_4 \approx 0$ [10]:

$$H_u(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Y_1 Y_4}{Y_2 Y_4 + Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)} = \frac{Y_1}{Y_2} \cdot \frac{Y_2 Y_4}{Y_2 Y_4 + Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}, \tag{2}$$

где $Y_k = 1/Z_k = 1/R_k + j\omega C_k = g_k + j\omega C_k$ – комплексная проводимость k -го двухполюсника в виде $I_1 - I_3 + I_2 + I_4 = (U_1 - U_3)Y_1 - U_3 Y_3 + (U_2 - U_3)Y_2 - U_3 Y_4 = 0$, $I_5 - I_4 - I_{вх} = (U_2 - U_4)Y_5 - (U_4 - U_3)Y_4 - U_4 I_{вх} \approx U_2 Y_5 + U_3 Y_4 = 0$, предположении, что каждый двухполюсник содержит параллельно включенные резистор R_k и конденсатор C_k (см. рис. 2, б).

Для звена 1-го порядка (см. рис. 2, в)

$$H_u(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = H_0 \cdot \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2}, \quad H_0 = \frac{R_3}{R_1}. \tag{3}$$

Используя выражения (2) и (3), соответствующим выбором параметров двухполюсников, в которых оставляют один элемент (либо резистор, либо конденсатор), получают выражения коэффициентов передачи $H_k(j\omega)$ звеньев разных типов фильтров.

Примечание. На базе одного ОУ, в обратной связи которого отсутствуют звенья типа Т-образного моста, рекурсивный фильтр реализовать нельзя [12].

Базовой моделью при математическом описании передаточной функции n -го порядка ARC-фильтров является фильтр ФНЧ. Фильтры с другими частотными характеристиками – ФВЧ и ПФ – рассматривают как модификации базовой модели.

Так, для звена 2-го порядка ФНЧ (см. рис. 2, г) комплексный коэффициент передачи $H_u(j\omega)$ по напряжению

$$H_u(j\omega)_{\text{ФНЧ}} = -\frac{g_1}{g_2} \cdot \frac{g_2 g_4}{j\omega C_5 (g_1 + g_2 + g_4 + j\omega C_3) + g_2 g_4} = \tag{4}$$

$$= -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1/(R_2 R_4 C_3 C_5)}{-\omega^2 + j\omega(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_4)/C_3 + 1/(R_2 R_4 C_3 C_5)},$$

а его передаточная функция

$$H_u(p)_{\text{ФНЧ}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1/(R_2 R_4 C_3 C_5)}{p^2 + p(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_4)/C_3 + 1/(R_2 R_4 C_3 C_5)}. \quad (5)$$

При заданном способе аппроксимации АЧХ фильтров ФНЧ – по Баттерворту (В) и по Чебышеву (Т), для звеньев первого и второго порядков функции Ну(р) определены следующим образом [12]:

$$H_u(p) = H_0 \frac{c_0 \omega_c}{p + c_0 \omega_c}, \quad H_u(p) = H_0 \frac{c \omega_c^2}{p^2 + b \omega_c p + c \omega_c^2}, \quad (6)$$

где с0, b и с – нормированные коэффициенты; Н0 – коэффициент усиления звена при ω = 0; ωс = 2πfc – угловая частота среза звена фильтра.

В таблице 1 приведены коэффициенты bk и ск для фильтров ФНЧ типов В и Т от 2-го до 6-го порядков включительно, заимствованные из таблиц справочника [12], где они приведены с большим числом значащих цифр и для существенно большего числа разновидностей фильтров.

Таблица 1 – Варианты задания

n →	2		3		4		5			6		
Звено	1		1	2	1	2	1	2	3	1	2	3
αmax ↓	Нормированные к ωс = 1 рад/с коэффициенты функции Ну(р) звеньев АРС-фильтров типов В и Т											
Тип В: -3,0 дБ при ωс	b c	1,4142 1,0000	-1,0000	1,0000 1,0000	0,7654 1,0000	1,8478 1,0000	-1,0000	0,6180 1,0000	1,6180 1,0000	0,5176 1,0000	1,4142 1,0000	1,9319 1,0000
Тип Т: -0,1 дБ	b c	2,3124 3,3140	-0,9694	0,9696 1,6891	0,5283 1,3300	1,2755 0,6229	-0,5389	0,3331 1,1949	0,8719 0,6359	0,2294 1,1294	0,6267 0,6964	0,8561 0,2634
Тип Т: -0,5 дБ	b c	1,4256 1,5162	-0,6265	0,6265 1,1424	0,3507 1,0635	0,8467 0,3564	-0,3623	0,2239 1,0358	0,5862 0,4768	0,1553 1,0230	0,4243 0,5900	0,5794 0,1570
Тип Т: -1,0 дБ	b c	1,0977 1,1025	-0,4942	0,4042 0,9942	0,2791 0,9865	0,6737 0,2794	-0,2895	0,1789 0,9883	0,4684 0,4293	0,1244 0,9907	0,3398 0,5577	0,4641 0,1247
Тип Т: -2,0 дБ	b c	0,8038 0,8231	-0,3689	0,9942 1,6897	0,2098 0,9287	0,5064 0,2216	-0,2183	0,1349 0,0522	0,3592 0,3932	0,0939 0,9660	0,2367 0,5329	0,3506 0,0999
Тип Т: -3,0 дБ	b c	0,6440 0,7079	-0,2986	0,9694 1,6897	0,1703 0,9031	0,4112 0,1960	-0,1795	0,3331 1,1949	0,8719 0,6359	0,0765 0,9548	0,2089 0,5216	0,2853 0,0888

Примечание: коэффициент усиления звеньев Н0 = 2, частота среза фильтра fc = 100 Гц, αmin = -40 или -50 дБ

Введение в выражение (6) угловой частоты среза ωс даёт возможность оперировать безразмерными коэффициентами bk и ск: они нормированы приведением к частоте ωс = 1 рад/с для неравномерности коэффициента передачи Ну(ω) в полосе пропускания, рассчитанной: для фильтров Баттерворта так, что на частоте среза ωс их АЧХ имеют спад -3 дБ, а АЧХ фильтров Чебышева типа Т на частоте ωс имеют спад, равный значению допустимых пульсаций в полосе пропускания, т.е. в полосе пропускания АЧХ пульсирует между уровнем 10^{αmax/20} и 1, где обычно принимается αmax = -0,1, -0,5, -1,0, -2,0 или -3,0 дБ. Так, например, при αmax = -0,5 дБ АЧХ пульсирует между уровнями 0,944 и 1.

Определив собственную частоту звена 2-го порядка ωk = √ck ωс, где ωс – частота среза фильтра, а добротность Qk = √ck / bk (добротность Q звена 1-го порядка всегда равна 1), передаточную функцию звена ФНЧ 2-го порядка переписывают в нормированном виде:

$$H_u(p)_{\text{ФНЧ}} = H_0 \cdot \frac{1}{s^2 + (b_k \sqrt{c_k})s + 1} = H_0 \cdot \frac{1}{s^2 + (1/Q_k)s + 1}, \quad (7)$$

где sФНЧ = p / √ck ωс² – нормированная частота; Н0 < 10, Qk < 10, Н0Qk < 100.

При больших значениях Н0 и Q чрезвычайно расширяется диапазон параметров элементов схемы и требуются более сложные схемы звеньев.

В теории фильтров за основной параметр принимают не АЧХ фильтра

$$H_u(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)},$$

а коэффициент затухания (ослабления) $\alpha(\omega)$ сигнала, выраженный в логарифмической форме, в децибелах (дБ):

$$\alpha(\omega) = 20 \lg \frac{1}{H_u(\omega)} = 20 \lg \frac{U_1(\omega)}{U_2(\omega)}. \quad (8)$$

В полосе пропускания $\Delta\omega_{\text{п}}$ идеальных фильтров коэффициент затухания $\alpha(\omega) = 0$ и $U_1(\omega)/U_2(\omega) = e^0 = 1$, т.е. затухания нет. В реальных фильтрах достичь значения $\alpha(\omega) = 0$ в полосе $\Delta\omega_{\text{п}}$ невозможно даже при полном согласовании фильтра с источником сигнала и нагрузкой на какой-то частоте, так как входные характеристические сопротивления фильтров зависят от частоты.

В качестве примера на рис. 3 представлена характеристика затухания $\alpha(\omega)$ идеального (кривая 1) и реального (кривая 2) фильтра нижних частот.

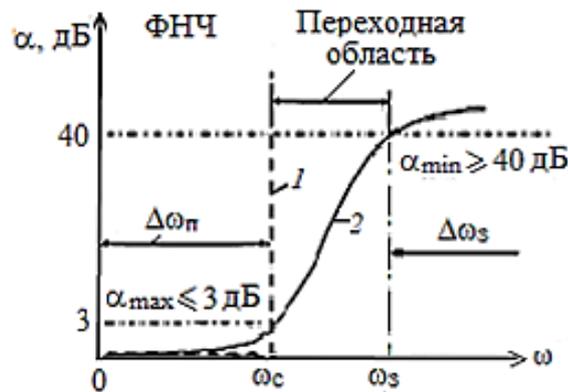


Рис. 3 – График логарифмической АЧХ идеального 1 и реального 2 ФНЧ

Между полосой пропускания $\Delta\omega_{\text{п}}$ и полосой задержки $\Delta\omega_{\text{з}}$ в реальных фильтрах имеется переходная область. Избирательность ФНЧ (степень разграничения полос пропускания и задержки) определяется крутизной характеристики затухания $\alpha(\omega)$ в переходной области, характеризующейся коэффициентом $\Omega_3 = \omega_3/\omega_c$.

Максимальное значение коэффициента α_{max} реального ФНЧ на границе среза ω_c равно

$$\alpha_{\text{max}} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} = 20 \lg \sqrt{2} H_u(\omega) \approx 20 \cdot 0,15 = 3 \text{ дБ}. \quad (9)$$

Минимальное гарантированное значение коэффициента затухания α_{min} на границе полосы задерживания (на частоте ω_3 , см. рис. 3) обычно принимают равным $\alpha_{\text{min}} \geq 40$ дБ, иногда $\alpha_{\text{min}} \geq 50$ дБ.

Расчет параметров элементов звеньев и АРС-фильтра ФНЧ

Исходными данными для расчета ФНЧ являются:

- ω_c – частота среза фильтра;
- допустимое небольшое затухание α_{max} [дБ] в полосе пропускания $\Delta\omega_{\text{п}}$;
- ω_3 – граничная частота задерживания;
- относительно большое затухание α_{min} [дБ] на границе частоты ω_3 ;
- метод аппроксимации идеального АЧХ фильтра (фильтр Баттерворта или фильтр Чебышева);
- H_0 – коэффициент усиления при $\omega = 0$;
- n – порядок фильтра.

Примечание. Обычно порядок n фильтра находят по формулам или номограммам, приводимым в справочниках [11], [12], используя заданные коэффициенты α_{max} , α_{min} и частоты ω_c и ω_3 : чем меньше $|\alpha_{\text{max}}|$ и больше $|\alpha_{\text{min}}|$, тем уже переходная область ($\omega_3 - \omega_c$) и выше порядок n фильтра.

Выписываем из таблицы 1 коэффициенты: c_0 полинома 1-го порядка при нечетном n ; b_k и c_k полиномов 2-го порядка вида $p^2 + b\omega_c p + c\omega_c^2$.

Выражения для расчета параметров R_k и C_k двухполосников (см. рис. 2, г), получим путём почленного сопоставления выражений табличного $H_u(p)$ звена с полученной функцией $H_u(p)$ звена. Один из параметров звена (обычно C_3) выбирают произвольно (в долях микрофарад) или близкое к значению $C_3 \approx 10/f_c$ [мкФ], где циклическая частота f_c фильтра в герцах.

Итак, сопоставляя формулы (5) и (6), нетрудно вывести формулы для расчёта сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов звеньев 1-го и 2-го порядков. Так, для ФНЧ В и Т типов 2-го порядка из сопоставления указанных формул

$$H_u(p)_{\text{ФНЧ}} = H_0 \cdot \frac{c\omega_c^2}{p^2 + b\omega_c p + c\omega_c^2} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1/(R_2 R_4 C_3 C_5)}{p^2 + p(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_4)/C_3 + 1/(R_2 R_4 C_3 C_5)} \quad (10)$$

получаем:

$$|H_0| = \frac{R_2}{R_1}, \quad c\omega_c^2 = \frac{1}{R_2 R_4 C_3 C_5}, \quad b\omega_c = \frac{1}{C_3} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) \quad (11)$$

Чтобы получить действительное значение сопротивления резистора R2, нужно выполнить условие:

$$\frac{C_5}{C_3} \leq \frac{b^2}{4c(H_0 + 1)},$$

причем правая часть соотношения не должна быть значительно больше левой. Итак, ёмкость

$$C_5 \leq \frac{b^2 C_3}{4c(H_0 + 1)}, \quad (12)$$

а сопротивления резисторов звена

$$R_2 = \frac{bC_3 + \sqrt{b^2 C_3^2 - 4cC_3 C_5 (H_0 + 1)}}{2c\omega_c C_3 C_5} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4c(H_0 + 1)C_5 / C_3}}{2c\omega_c C_5}, \quad (13)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{H_0}, \quad R_4 = \frac{1}{2c\omega_c^2 R_2 C_3 C_5}. \quad (14)$$

Угловая частота среза k-го звена 2-го порядка $\omega_{sk} = \sqrt{c_k} \omega_c$ где ω_c – угловая частота среза многозвенного ARC-фильтра.

Для звена 1-го порядка ФНЧ (см. рис. 2, в):

$$R_1 = \frac{1}{c_0 \omega_c C_2}, \quad R_4 = \frac{H_0 R_1}{H_0 - 1}, \quad R_3 = H_0 R_1. \quad (15)$$

Рассчитаем параметры ФНЧ Чебышева типа Т 5-го порядка (ARC-ФНЧ-Т5) с коэффициентом усиления $H_0 = 8$, $\alpha_{\text{max}} = -0,5$ дБ, $f_c = 100$ Гц.

1. Для ФНЧ 5-го порядка передаточная функция по напряжению

$$H_u(p) = H_{01} \frac{-c_0 \omega_c}{p + c_0 \omega_c} \cdot H_{02} \frac{-c_1 \omega_c^2}{p^2 + b_1 \omega_c p + c_1 \omega_c^2} \cdot H_{03} \frac{-c_2 \omega_c^2}{p^2 + b_2 \omega_c p + c_2 \omega_c^2}.$$

2. Примем $H_{01} = H_{02} = H_{03} = 2$ и выпишем коэффициенты функций $H_k(p)$ из таблицы 1:
 $c_0 = 0,3623$, $b_1 = 0,2239$, $c_1 = 1,0358$, $b_2 = 0,5862$, $c_2 = 0,4768$.

3. Параметры звена 1-го порядка:

$$C_2 = 10/f_c = 10/100 = 0,1 \text{ мкФ},$$

$$R_1 = \frac{1}{c_0 \omega_c C_2} = \frac{1}{0,3623 \cdot 2\pi \cdot 100 \cdot 10^{-7}} = 43 \text{ кОм}, \quad R_3 = R_4 = 86 \text{ кОм}.$$

4. Параметры первого звена 2-го порядка:

$$C_3 = 10/f_c = 0,1 \text{ мкФ},$$

$$C_5 \leq \frac{b_1^2 C_3}{4c_1(H_{01} + 1)} = \frac{0,2239^2 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 1,0358 \cdot 3} \approx 0,402 \text{ нФ} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ мкФ},$$

$$R_2 = \frac{0,2239 + \sqrt{0,2239^2 - 4 \cdot 1,0358 \cdot (2+1) \cdot 4 \cdot 10^{-10} / 10^{-7}}}{2 \cdot 1,0358 \cdot 628,3 \cdot 4 \cdot 10^{-10}} \approx 470 \text{ кОм},$$

$$R_1 = \frac{R_2}{H_0} = 235 \text{ кОм}, \quad R_4 = \frac{1}{c_1 C_3 C_5 R_2 \omega_c^2} =$$

$$= \frac{1}{1,0358 \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-10} \cdot 470 \cdot 10^3 \cdot 4\pi^2 \cdot 10^4} \approx 130 \text{ кОм}.$$

5. Рассчитанные аналогично параметры второго звена 2-го порядка:

$$C_3 = 0,1 \text{ мкФ}, C_5 \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ мкФ}, R_2 \approx 168 \text{ кОм}, R_1 \approx 84 \text{ кОм}, R_4 \approx 53 \text{ кОм}.$$

Определим алгоритмы расчёта АЧХ и ФЧХ ARC-фильтра.

После подстановки комплексных проводимостей $Y_k = g_k + j\omega C_k$ двухполюсников в выражение (2) (см. рис. 2, а), имеем

$$H(j\omega) = \frac{g_1 + j\omega C_1}{g_2 + j\omega C_2} \times$$

$$\times \frac{(g_2 g_4 - \omega^2 C_2 C_4) + j\omega(g_2 C_4 + g_4 C_2)}{[(g_2 g_4 + g_5 g_{1-4}) - \omega^2(C_2 C_4 + C_5 C_{1-4})] + j\omega(g_2 C_4 + g_4 C_2 + g_5 C_{1-4} + g_{1-4} C_5)}, \quad (16)$$

где $g_{1-4} = g_1 + g_2 + g_3 + g_4$ и $C_{1-4} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$.

Выделив вещественную и мнимую части в выражении (16) и преобразовав в показательную форму записи, получим выражения АЧХ и ФЧХ звена:

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{g_1^2 + \omega^2 C_1^2}{g_2^2 + \omega^2 C_2^2}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(g_2 g_4 - C_2 C_4 \omega^2)^2 + (g_2 C_4 + g_4 C_2)^2 \omega^2}{[(g_2 g_4 + g_5 g_{1-4}) - (C_2 C_4 + C_5 C_{1-4}) \omega^2]^2 + (g_2 C_4 + g_4 C_2 + g_5 C_{1-4} + g_{1-4} C_5)^2 \omega^2}}, \quad (17)$$

$$\Psi(\omega) = \pi + \arctg\left(\frac{\omega C_1}{g_1}\right) - \arctg\left(\frac{\omega C_2}{g_2}\right) + \arctg\left(\frac{(g_2 C_4 + g_4 C_2)\omega}{g_2 g_4 + g_4 C_2 C_4 \omega^2}\right) -$$

$$\times \arctg\left(\frac{\omega(g_2 C_4 + g_4 C_2 + g_5 C_{1-4} + g_{1-4} C_5)}{(g_2 g_4 + g_5 g_{1-4} - \omega^2(C_2 C_4 + C_5 C_{1-4}))}\right). \quad (18)$$

Выполнив умножение АЧХ звеньев (17) и сложив их ФЧХ (18), получим выражения АЧХ и ФЧХ фильтра, а взяв $20\lg[H(\omega)]$ от АЧХ звеньев и фильтра, а также $\lg\omega$ – выражения логарифмических частотных характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ) звеньев и фильтра.

Моделирование фильтра ARC-ФНЧ-Т5 в среде ARCF

Моделирование заданного типа ARC-фильтра выполним на основе обобщенной его схемы, состоящей из трёх звеньев, представленных в виде квадратов (рис. 4, а).

При вводе в активное окно модели трехзвенного ARC-фильтра значения его порядка $n = 3$ или $n = 5$ первое звено 2-го порядка автоматически преобразовывается в звено 1-го порядка (рис. 4, б).

После ввода порядка фильтра $n = 5$, частоты среза $f_c = 100$ Гц (см. рис. 4, б) и щелчка мышью на кнопке с надписью Моделировать, на экран ВУ выводится схема звена 1-го порядка (рис. 5, а) с активными полями, в которые нужно ввести с клавиатуры ВУ найденные значения параметров элементов его схемы, завершая ввод щелчком мышью на кнопке ОК. При этом всплывает модель схемы фильтра (см. рис. 4, б).

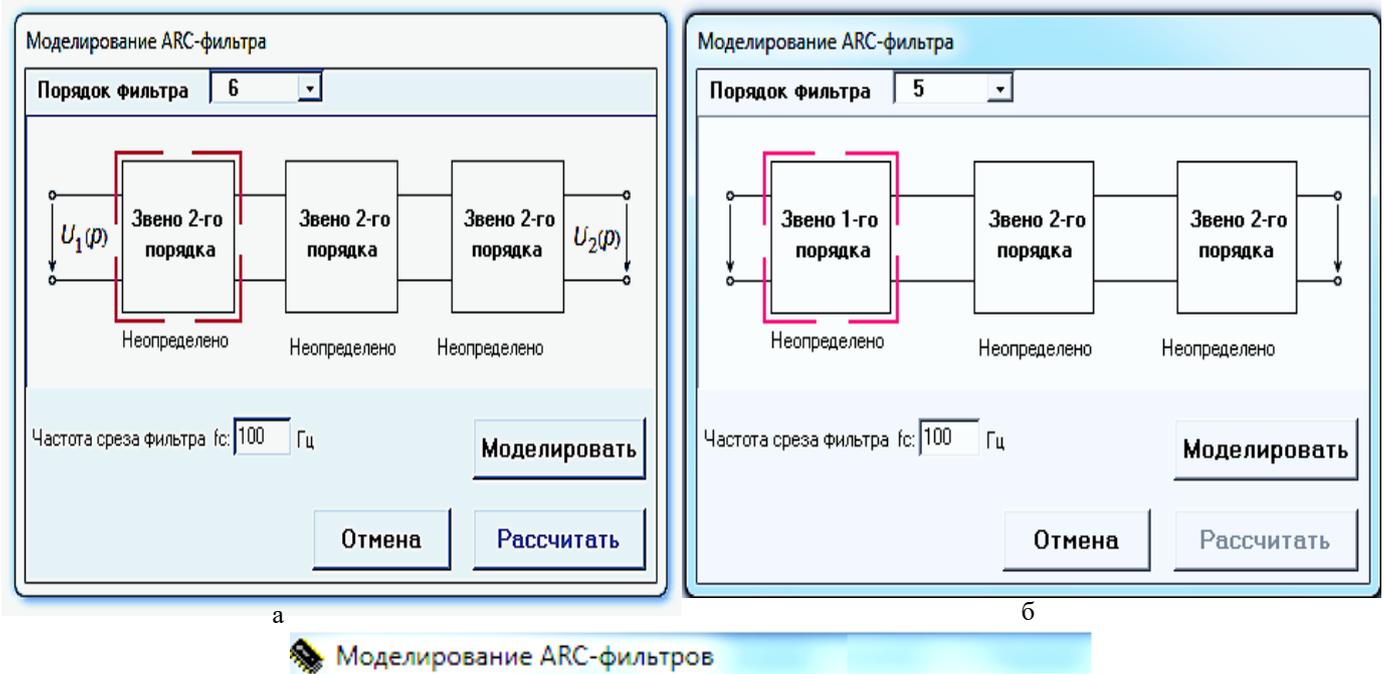


Рис. 4 – Стартовые станции среды ARCF моделирования ARC-фильтров: 6-го (а) и 5-го (б) порядков

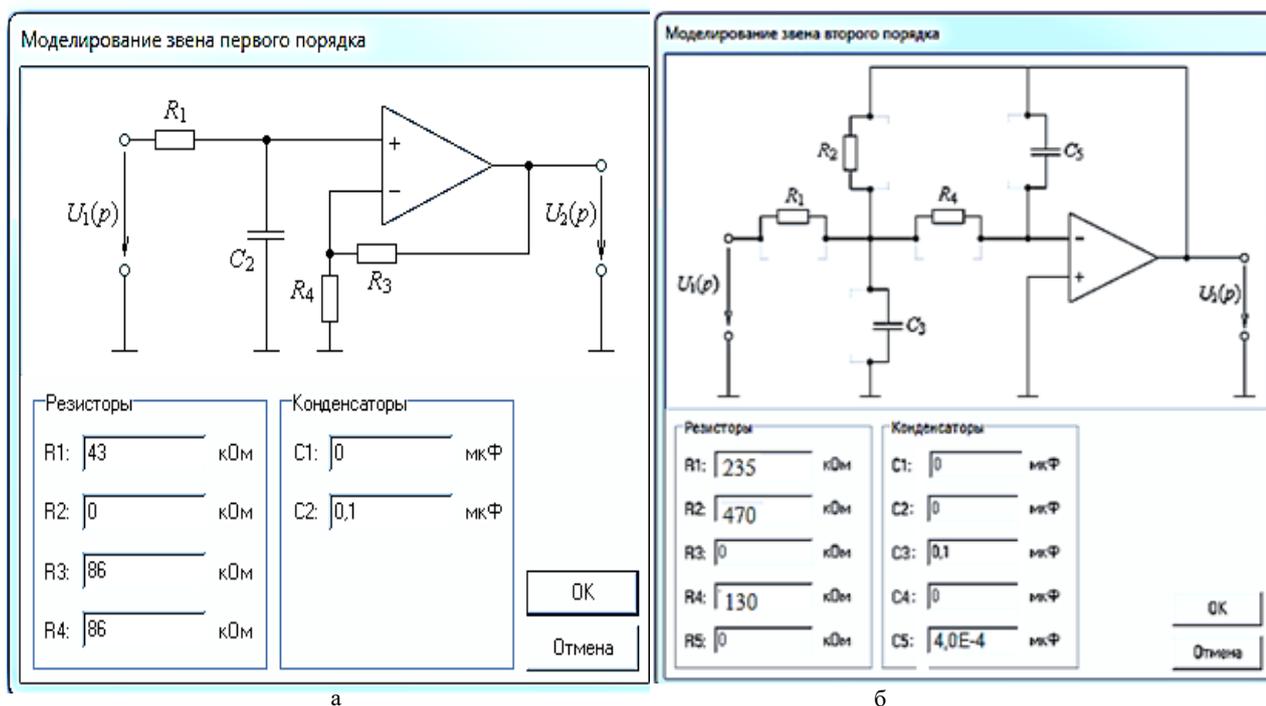


Рис. 5 – Моделирование звеньев: 1-го (а) и 2-го (б) порядков фильтра ARC-ФНЧ-T5

После щелчков мышью на втором квадрате модели фильтра и на кнопке Моделировать, ввод параметров первого звена 2-го порядка производится на выведенной на экран схеме (рис. 5, б): вначале «убирается» изображение резистора R_k или конденсатора C_k из каждого двухполюсника звена после щелчков мышью на их изображениях. При этом автоматически обнуляются значения их параметров, которые были записаны в размещенные ниже схемы активные поля.

После ввода в активные поля найденных ранее значений параметров для оставшихся в этом звене элементов схемы и щелчка мышью на кнопке ОК выводится вновь заставка с обобщенной моделью фильтра (см. рис. 4, б). Щелкнув мышью на третьем квадрате и на кнопке Моделировать, и выполнив описанные выше операции по моделированию оставшегося второго звена 2-го порядка, нужно щелкнуть мышью на кнопке ОК, а затем на ставшей активной кнопке Рассчитать (см. рис. 4, б, внизу справа).

Расчет по программам среды ARCF: АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ как отдельных звеньев, так и фильтра в целом, ведется с формированием базы данных указанных функций. По окончании расчетов вверху рабочего поля среды ARCF активируются две кнопки (рис. 4, в): кнопка  и кнопка .

Щелчком мыши на кнопке  на экран ВУ выводятся графики нормированных АЧХ $|H(\Omega)/H_m|$ и ФЧХ $\Psi(\Omega)$ отдельных звеньев и трехзвенного фильтра (рис. 6), где H_m – максимальное значение функции $H(\Omega)$;

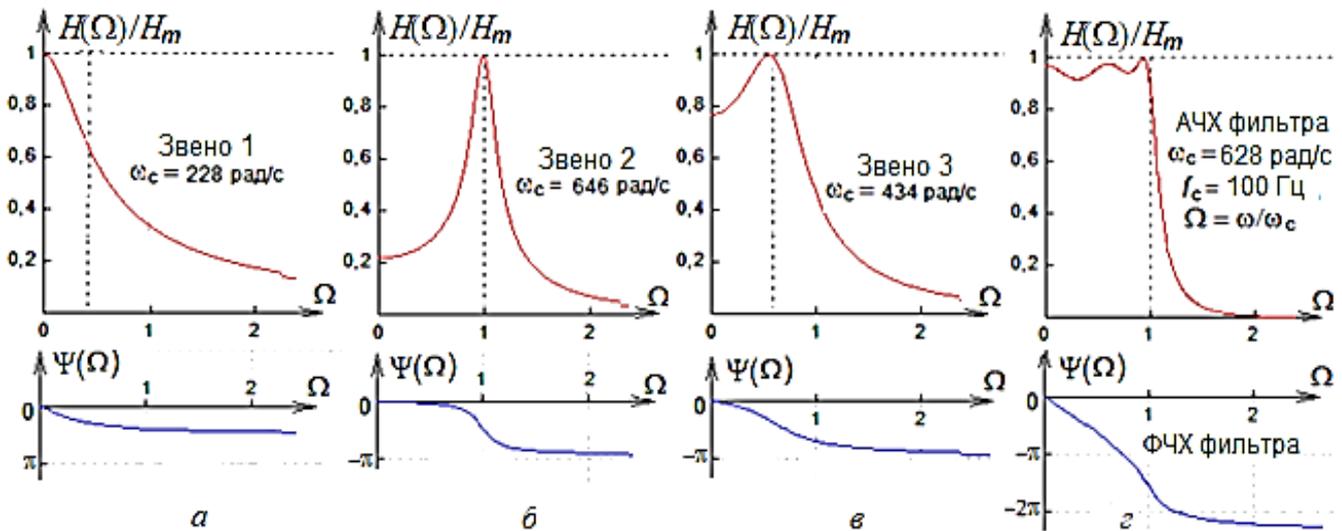


Рис. 6 – Нормированные АЧХ и ФЧХ звеньев (а, б и в) и фильтра ARC-ФНЧ-Т5 (z)

Анализ результатов моделирования ARC-фильтра свидетельствует, что вид графиков и значения основных параметров характеристик звеньев и трехзвенного ARC-фильтра с допустимыми отклонениями соответствуют их виду и рассчитанным значениям параметров.

Реальные частоты среза ω_{ck} звеньев, указанные на графиках, рассчитаны по выражению $\omega_{ck} = \sqrt{c_k} \omega_c$, где ω_c – заданная частота среза фильтра.

При щелчке мышью на кнопке  на экран ВУ выводятся графики ЛАЧХ $L(\omega)$ и ЛФЧХ $\Psi(\omega)$ отдельных звеньев и фильтра ARC-ФНЧ-Т5 (рис. 7). На графиках ЛАЧХ при частоте $\Omega = \omega/\omega_c = 0$ значения $L(0)$ вычислены по выражению $L(0) = 20 \lg H_0$. Значения ЛФЧХ $\Psi_k(\Omega)$ при $\omega \rightarrow \infty$ приближаются к следующим значениям: звена 1-го порядка – к $-\pi/2$; звеньев 2-го порядка – к $-\pi$; трехзвенного фильтра 5-го порядка – к $-5\pi/2$, т.е. равному сумме значений $\Psi_k(\Omega)$ его звеньев.

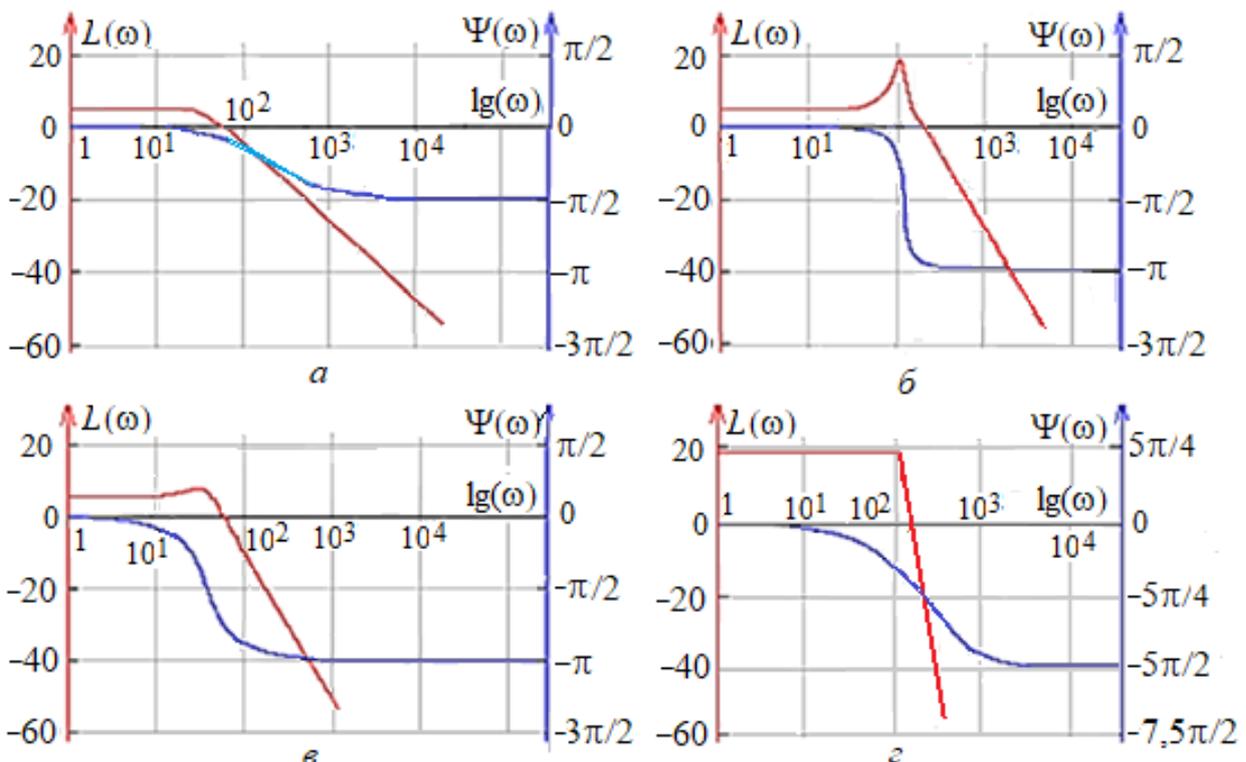


Рис. 7 – ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев (а, б и в) и фильтра ARC-ФНЧ-Т5 (z)

Моделирование ARC-фильтра в программной среде NI Multisim

Исследуем возможность применимости программной среды NI Multisim при решении поставленной задачи, и проверим вероятность появления вычислительных ошибок в разработанной среде ARCF.

Электрическая схема (рис. 8) собрана из звеньев активного ФНЧ Чебышева 5-го порядка (ARC-ФНЧ-Т5) на рабочем поле программной среды моделирования и анализа схем электронных устройств NI Multisim v.11 (в дальнейшем – MS11), с введенными значениями параметров элементов обобщенной схемы активного RC-фильтра

Для отображения графической информации (аналогичных графиков частотных характеристик, представленных на рис. 6 и рис. 7), во все схемы звеньев вставлены модели плоттеров XBP1–XBP3 среды MS11, а для снятия осциллограмм входного и выходного напряжений u_1 и u_2 каждого звена – модели двухканальных осциллографов XSC1–XSC3.

При испытании звена 1-го порядка и фильтра ARC-ФНЧ-Т5 переключатели S1 и S2 должны быть в положениях 1, первого звена 2-го порядка – переключатель S1 нужно включить в положения 2, а при испытании второго звена 2-го порядка – S1 вернуть в положении 1, а S2 включить в положении 2 (см. рис. 8). После щелчков мышью на изображениях плоттеров XSC1–XSC3, осциллографов XSC1–XSC3 и на кнопке запуска среды MS11, на их экранах (рис. 9) устанавливались пределы изменения частоты f , угла сдвига фаз $\Psi u(f)$ (Phase), коэффициента передачи $H u(f)$

(Magnitude), выбирались логарифмические (Log) или линейные (Lin) шкалы на осях графиков АЧХ и ФЧХ звеньев, а также визирные линии на частотах звена 3: $f_{c2} = \sqrt{c_2} f_c = \sqrt{0,4768} \cdot 100 \approx 69$ Гц и

ARC-фильтра: $f_c = 100$ Гц.

Примечание. В статье представлены только АЧХ (а), ФЧХ (б) и осциллограммы напряжений u_1 и u_2 (в) трехзвенного фильтра ARC-ФНЧ-Т5 (см. рис. 9), записанные при частоте 100 Гц и при $\alpha_{\max} = -0,5$ дБ.

При этом расчетное значение коэффициента передачи фильтра

$$H_c = 0,994H_0 = 0,994 \cdot 8 \approx 7,552$$

соответствует показанию плоттера $H_c \approx 7,66$ (см. рис. 9, а) и коэффициенту передачи фильтра

$$H_c = U_{2m} / U_{1m} = 54,46 / 7,07 \approx 7,7,$$

равному отношению амплитуд U_{2m} / U_{1m} выходного u_2 и входного u_1 напряжений, измеренных на экране осциллографа (см. рис 9, в).

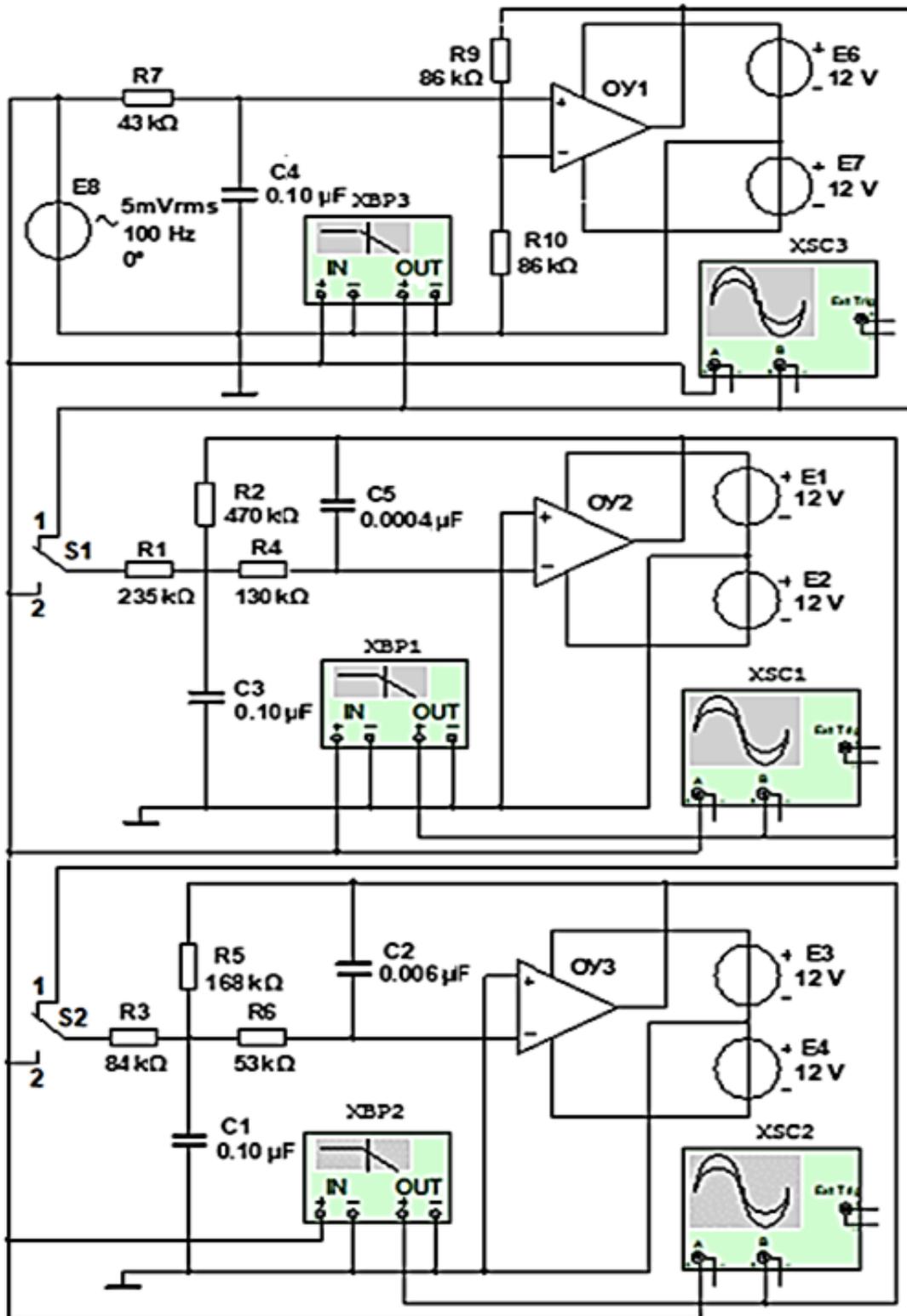


Рис. 8 – Электрическая схема фильтра ARC-ФНЧ-Т5

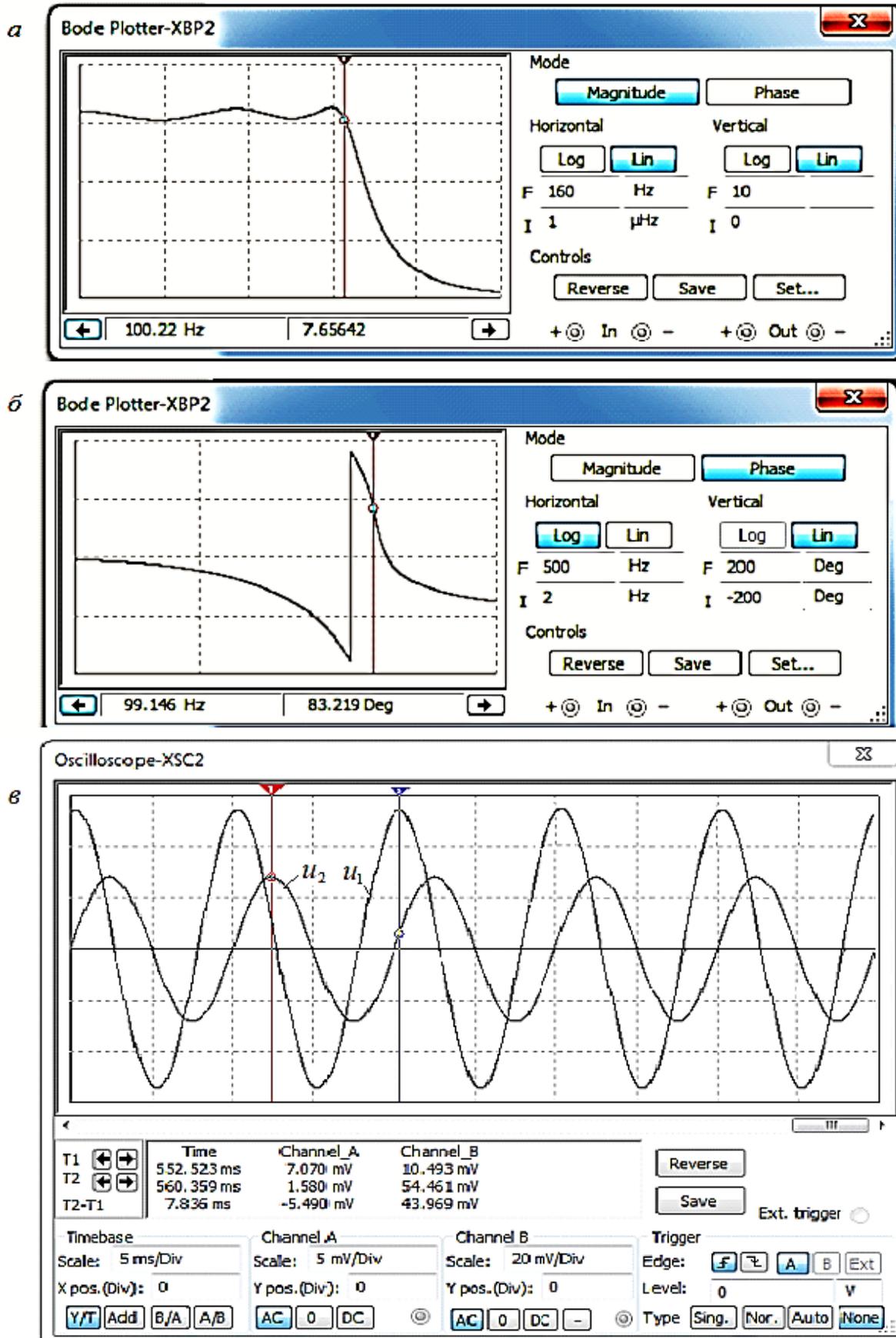


Рис. 9 – АЧХ (а) и ФЧХ (б) и осциллограммы напряжений u_1 и u_2 фильтра ARC-ФНЧ-T5 (в)

Срез при испытаниях:

звена 1: $f_{c0} = c_0 f_c = 0,3623 \cdot 100 \approx 36$ Гц,

звена 2: $f_{c1} = \sqrt{c_1} f_c = \sqrt{1,0358} \cdot 100 \approx 101,8$ Гц,

На графике ФЧХ фильтра (см. рис. 9, б) при $f_c = 100$ Гц (визирная линия сдвинута вправо) виден скачок угла сдвига фаз напряжений u_1 и u_2 , равный 180° , связанный со свойством функции $\Psi u(f) = \text{arctg}$ отношения мнимой и действительной частей комплексного коэффициента передачи $H(j\omega)$ ARC-фильтра. В действительности, если верхнюю

часть графика опустить вниз (к началу скачка вверх), то легко убедиться, что при увеличении частоты f отставание выходного напряжения u_2 от входного u_1 стремится к -450° (см. график ФЧХ $\Psi(\omega)$ на рис. 7, г (среда ARCF)).

Заключение

Показана возможность моделирования по известной методике параметров элементов схемы частотного активного RC-фильтра, и вывода на экран ВУ графиков частотных характеристик звеньев и многозвенного фильтра, рассчитанных посредством программного обеспечения, содержащегося в учебно-программной среде ARCF.

Сравнение частотных характеристик ФНЧ Чебышева 5-го порядка, полученных при моделировании в среде ARCF (см. рис. 7, г) и в среде MS11 (см. рис. 9, а и б), показало, что их изменения носят аналогичный характер, а значения характерных точек (ω_c , ω_s звеньев и др.) на графиках АЧХ и ФЧХ отличаются незначительно от расчетных значений указанных величин. Это свидетельствует о малой вероятности появления вычислительных ошибок при выполнении вариантов заданий по моделированию и построению частотных характеристик активных RC-фильтров в среде ARCF.

Благодаря использованию учебно-программной среды ARCF появилась возможность свести к минимум рутинную счетную работу для построения графиков частотных характеристик фильтра и тем самым к увеличению времени на решение поставленных задач обучения.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Марченко А. Л. Актуальные вопросы разработки и использования электронных изданий и ресурсов в обучении электротехнике и электронике в вузе. Монография. / А. Л. Марченко. – М.: ДМК Пресс. 2010. – 272 с.
2. Беневоленский С. Б. Использование виртуальных тренажеров в процессе изучения электротехнических дисциплин. / С. Б. Беневоленский, А. Л. Марченко. – М.: Педагогическая информатика. 2009. – №3. – С. 24-30.
3. Марченко А. Л. Программные комплексы для испытания электрических двигателей. / А. Л. Марченко. – М.: Вестник компьютерных и информационных технологий, 2011. – №11. – С. 30-35.
4. Марченко А.Л. Тренажер МИВ для анализа трехфазных цепей. Свидетельство о регистрации электронного ресурса в Институте научной информации и мониторинга РАО №17229 от 28.06.2011. / А.Л. Марченко, С.С. Воробьев, А.Г. Иванов
5. Марченко А.Л. Тренажер Э5 для анализа цифровых схем. Свидетельство о регистрации электронного ресурса в ОФЕРНиО №22131 от 06.09.2016 г. / А.Л. Марченко, Ю.Ф. Опадчий, Д.А. Шульгин
6. Марченко А. Л. Разработка учебно-методического комплекса по электротехнике. / А. Л. Марченко. – Екатеринбург: Международный научно-исследовательский журнал. Технические науки. – №10 (52). – Октябрь 2016, часть 2. – С. 86-92.
7. Марченко А.Л. УМК-Э1 (учебно-методический комплекс по электротехнике). Свидетельство о регистрации электронного ресурса в ОФЕРНиО №24117 от 24.06.2019 г.
8. Марченко А.Л. УМК-Э2 (учебно-методический комплекс по электронике). Свидетельство о регистрации электронного ресурса в ОФЕРНиО №24181 от 09.09.2019 г.
9. Марченко А. Л. Разработка учебно-методического комплекса по электронике: структура и функциональные возможности. / А. Л. Марченко // – Екатеринбург: Международный научно-исследовательский журнал. Технические науки. – №5 (95). – Май 2020, часть 1. – С. 49-58.
10. Марченко А. Л. Частотные фильтры: пассивные, активные и цифровые. Учебное методическое пособие. / А. Л. Марченко– М.: Горячая линия – Телеком. 2017. – 166 с.
11. Христиан Э. Таблицы и графики по расчёту фильтров. / Э. Христиан, Е. Эйзенман – М.: Связь. 1975. – 408 с.
12. Джонсон Д. Справочник по активным фильтрам. / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. – М.: Энергоатомиздат. 1983. – 218 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Marchenko A. L. Aktual'niye voprosy razrabotki i ispol'zovaniya elektronnykh izdaniy i resursov v obuchenii elektrotekhnike i elektronike v vuze. Monografiya. [Topical issues of development and use of electronic publications and resources in teaching electrical engineering and electronics at the university. Monograph]. / A. L. Marchenko. – М.: ДМК Пресс. 2010. – P. 272. [in Russian]
2. Benevolenskiy S. B. Ispol'zovaniye virtual'nikh trenazhjerov v prozhese izucheniya elektrotekhnicheskikh disziplin [The use of virtual simulators in the process of studying electrical engineering disziplines]. / S. B. Benevolenskiy, A. L. Marchenko – М.: Pedagogical Informatics. 2009, No. 3. – P. 24-30. [in Russian]
3. Marchenko A.L. Programmnyye kompleksy dlya ispitaniya elektricheskikh dvigateley [Software systems for testing electric motors]. / A. L. Marchenko. – М.: Vestnik computer and information technologii. 2011. No. 11. – P. 30-35. [in Russian]
4. Trenazher MIV dlja analiza triohfaznykh zhepey. Svidetel'stvo o registratsii elektronnoogo resursa v Institute nauchnoy informatsii i monitoringa RAO [Simulator for the analysis of three-phase circuits. Certificate of registration of an electronic resource in Institute of scientific information and monitoring of the Russian Academy Education]. / A.L. Marchenko, A.G. Ivanov, S.S. Vorobjov – No. 17229 of 28.06.2011. [in Russian]
5. Marchenko A.L. Trenazher E5 dlja analiza zhifrovyykh skhem. Svidetel'stvo o registratsii elektronnoogo resursa v OFERNiO [Simulator E5 for analysis of digital circuits. Certificate of registration of an electronic resource in OFERNiO]. / A.L. Marchenko, U.F. Opadchii, D.A. Shulgin – No. 22131 of 06.09.2016. [in Russian]
6. Marchenko A.L. Razrabotka uchebno-metodicheskogo kompleksa po elektrotekhnike [Development of training materials in electrical engineering]. / A. L. Marchenko. – Yekaterinburg: Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal.

Tekhnicheskiye nauki [Yekaterinburg: International research journal. Technical sciences]. – No. 10 (52). – Oktober 2016. – Part 2. – P. 86-92. [in Russian]

7. Marchenko A.L. UMK-E1 (uchebno-metodicheskiy kompleks po elektrotekhnike). Svidetel'stvo o registratsii elektronogo resursa v OFERNiO [UMC-E1 (educational and methodical complex on electrical engineering). Certificate of registration of an electronic resource in OFERNiO]. – No. 24117 of 24.06.2019. [in Russian]

8. Marchenko A.L. UMK-E2 (uchebno-metodicheskiy kompleks po elektronike). Svidetel'stvo o registratsii elektronogo resursa v OFERNiO [UMC-E2 (educational and methodical complex on electronics). Certificate of registration of an electronic resource in OFERNiO]. – No. 24181 of 09.09.2019. [in Russian]

9. Marchenko A.L. Razrabotka uchebno-metodicheskogo kompleksa po elektronike: struktura i funktsional'niye vozmozhnosti [Development of training on electronics: structure and functionality]. / A. L. Marchenko . – Yekaterinburg: Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy jurnal. Tekhnicheskiye nauki [Yekaterinburg: International research journal. Technical sciences]. – No. 5 (95). – May 2020. – Part 1. – P. 49-58. [in Russian]

10. Marchenko A.L. Chastotnyye filtry: passivnyye, aktivnyye i tsifrovyye. Uchebnoye metodicheskoye posobiye [Frequency filters: passive, active and digital. Training manual]. / A. L. Marchenko . – M.: Hot line – Telekom. 2017. – 166 p. [in Russian]

11. Christian E. Tablitsy i grafiki po raschetu filtrov [Tables and graphs for the calculation of filters]. / E. Christian, E. Eisenman . – M.: Svyaz. 1975. – 408 p. [in Russian]

12. Dzhonson D. Spravochnik po aktivnym filtram [Handbook of Active Filters]. / D. Johnson, J. Johnson, G. Moore. – M.: Energoatomizdat. 1983. – 218 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.054>

МОДЕРНИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ТЕСТОПРИГОТОВЛЕНИЯ

Научная статья

Медведев П.В.¹, Федотов В.А.²*, Бочкарева И.А.³, Лукьянова Е.С.⁴

² ORCID: 0000-0002-3692-9722;

^{1, 2, 3, 4} Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

* Корреспондирующий автор (vital_asm[at]mail.ru)

Аннотация

В статье изучается влияние вносимых в тесто рецептурных добавок (сахар и жир) на реологические, структурно-механические свойства готовой продукции. Предприятия перерабатывают муку со средними и слабыми хлебопекарными свойствами, что вызывает необходимость снижения влажности теста для обеспечения хорошего внешнего вида булочных изделий. Как правило, влажность теста для данной продукции поддерживается на 1,0 или 1,5 % ниже влажности, обусловленной ГОСТом. Это снижает выход хлеба на 2 или 3 %, что приводит к нерациональному использованию как основного, так и дополнительного сырья. Изучали влияние способа приготовления полуфабрикатов в герметичной емкости на их свойства и качество готового хлеба, при этом для интенсификации процесса вносили бромат калия в количестве 0,005 % к массе муки. Повышение экономической эффективности при этом достигается за счет увеличения выхода изделий на 2,5 %.

Ключевые слова: тестоприготовление, технологический контроль, хлеб, оценка качества.

MODERNIZATION OF DOUGH PREPARATION

Research article

Medvedev P.V.¹, Fedotov V.A.²*, Bochkareva I.A.³, Luk'yanova E.S.⁴

² ORCID: 0000-0002-3692-9722;

^{1, 2, 3, 4} Orenburg State University, Orenburg, Russia

* Corresponding author (vital_asm[at]mail.ru)

Abstract

The article studies formulating aid impact (sugar and fat) on rheological and structurally-mechanical qualities of the final product. Facilities process flour of medium and weak bakery properties, which makes it necessary to reduce dough humidity to ensure proper appearance of pastry products. As a rule, dough humidity for such products is 1.0 or 1.5 % lower than that prescribed by GOST. This reduces the yield of bread by 2 or 3 %, which leads to misallocation of both basic and supplementary raw material. Preparation of semifinished products in a sealed tank, as well as their features and quality as baked bread were studied; in order to intensify the process, 0,005 % of potassium bromate was added to the dough. The yield of bread in this case increases by 2.5%, which leads to economic efficiency growth.

Keywords: dough preparation, process control, bread, quality assessment.

Введение

Изменения в консистенции и физических свойствах теста сильнее проявляются при невысоких хлебопекарных свойствах сырья. Для достижения высокого качества продукции важно еще на стадии тестоприготовления улучшить прогностическую способность качества готовой продукции и, по возможности, корректировать. Поэтому, актуально изучение влияния вносимых в тесто рецептурных добавок (сахар и жир) на реологические, структурно-механические свойства готовой продукции.

Материалы и методы исследования

В работе рассчитали параметры приготовления теста, при которых максимально обеспечиваются его допустимая влажность и выход готовых изделия. Тесто предлагается готовить на большой густой опаре с добавлением молочной сыворотки в количестве 15 %. Жир в дозировке, согласно рецептуре, вносится пофазно: в опару - не более 10 % и остальной жир - в тесто.

Введение жира в опару улучшает газодерживающую способность теста, его пластичность, а также консистенцию. Все это позволяет увеличить влажность теста до влажности готовых изделий и даже превысить ее на 0,2 или 0,5 %. Формообразующая способность теста улучшается, что обеспечивает получение изделий с четким рисунком, правильной формы и хорошего внешнего вида. В экспериментах использовался порционный способ приготовления теста для сдобных изделий на густой опаре с жиром. Опару замешивали из 50-60 % муки от ее массы в тесте, рецептурного количества дрожжей и воды. Жир в опару задавали через 30 мин после замеса и ее еще раз подвергали механическому воздействию. Влажность теста соответствовала влажности готовой продукции, установленной ГОСТом на данный вид изделия [1].

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов были получены в лабораторных условиях, а затем проверены на производственной линии при непрерывном способе приготовления теста и длительном периоде выработки булочных изделий с внесением жира в опару. В исследованиях производили выпуск булки с молочной сывороткой с внесением рецептурного жира в опару [2]. При внесении жира в опару спиртовое брожение несколько тормозится, что вынуждает повысить на 1-2 °С температуру опары и теста и удлинить на 5 мин продолжительность расстойки. Кислотонакопление протекает достаточно интенсивно, а повышение температуры полуфабрикатов стимулирует данный процесс, что обуславливает

сокращение длительности брожения опары на 30 мин [3]. Влажность теста при замесе его на опаре, в которую был внесен жир, выше на 1 % по сравнению с тестом, в которое жир был внесен при его замесе [4].

Другой способ модернизации тестоприготовления достигался за счет экономии сырьевых ресурсов. Сокращение затрат сухих веществ на брожение полуфабрикатов посредством внедрения прогрессивных технологических процессов. При брожении изменяется и структура его клейковинного каркаса. В результате разрыхления теста диоксидом углерода, образующимся при спиртовом брожении, увеличивается его объем, клейковинные пленки из набухших белков муки растягиваются, т. е. тесто приобретает оптимальную разрыхленность.

Все современные способы приготовления полуфабрикатов, ускоренные и обычные, предполагают брожение в открытых емкостях, сообщающихся с атмосферой, а следовательно, связаны с потерей диоксида углерода и летучих веществ [5]. Чем длительнее брожение полуфабриката, тем больше затраты сухих веществ. В работе приведены результаты нового способа приготовления полуфабрикатов в закрытой емкости, позволяющего свести к минимуму потери и спирта при брожении [6].

Тесто готовили из муки пшеничной первого сорта влажностью 44,5 % с увеличенным до 2,5 % количеством прессованных дрожжей. Для брожения применяли емкость под углом наклона на 0,5-5,0° и имеющую возможность непрерывно вращаться вокруг своей оси с частотой 1 оборот за 10 секунд. Тесто бродило в течение около 3 ч при температуре 30 °С, поддерживаемой постоянно с помощью водяной рубашки, которой снабжена емкость для брожения [7]. После окончания процесса тесто через специальную заслонку выгружали в виде непрерывной ленты. Разделку, расстойку и выпечку вели по общепринятой технологии. Непрерывное вращение цилиндра с тестом создало условия для постоянного изменения траектории движения пузырьков диоксида углерода и спирта в объеме теста. При этом пузырьки газа из теста практически не удалялись, а их перемещение внутри теста вызывало ускорение образования полуфабриката с пористостью, значительно более развитой, чем в тесте традиционного приготовления [8].

Приближенная числовая оценка показывает, что всплывшие пузыри газа около поверхности теста превосходят по объему газовые пузырьки в глубине теста в тысячи и десятки тысяч раз благодаря слиянию множества мелких пузырьков, встречающихся на пути всплывающего большого пузыря. Модельный расчет с равномерным распределением мелких пузырей и движением среди них более крупного показывает, что объем такого пузыря по мере всплывания увеличивается в кубической зависимости от пройденного пути по вертикали [9].

Вращение сосуда с тестом не позволяет образующимся газовым пузырькам всплывать на поверхность теста потому, что непрерывно меняется направление вектора архимедовой силы, действующей на пузырек, относительно окружающего теста. Поле центробежных сил, возникающих при вращении сосуда и стремящихся смешать пузырьки к оси вращения, чрезвычайно мало вследствие незначительной частоты вращения сосуда. На поверхностях этого множества газовых пузырьков при их росте частично раскручиваются белковые спирали, растягивается пространственная решетка клейковины. Это облегчает перегруппировку сульфгидрильных связей в макромолекуле белка, что способствует формированию лучших физических свойств и ускорению созревания теста.

Изучали влияние способа приготовления полуфабрикатов в герметичной емкости на их свойства и качество готового хлеба. При этом с целью улучшения структурно-механических свойств теста, интенсификации процесса внесли кислород или бромат калия в количестве 0,005 % к массе муки. Установлено, что тесто в замкнутой емкости созревает быстрее, но наблюдается снижение его вязкости; применение же окислителя меняет картину: вязкость возрастает в 2 раза.

Результаты пробной лабораторной выпечки - в таблице 1. Способ тестоприготовления с вращением сосуда описанным выше способом позволяет улучшить структурно-механические свойства теста, что отражается на технологических свойствах готовых изделий - объем хлеба возрастает на 18 %, формоустойчивость на 22 %, пористость мякиша на 4 %. Внесение дополнительно бромата калия (0,005 % к массе муки) приводит к большему улучшению потребительских свойств пробной выпечки. Объем ее возрастает на 43,7 %, удельный объем - на 47,5 %, формоустойчивость - на 96,4 %. Кислотность хлеба с применением окислителя несколько выше, пористость увеличилась на 17,5 % [10].

Таблица 1 – Варьирование качества пробной выпечки

Показатели качества хлеба	Пробная выпечка традиционным способом	Пробная выпечка по предлагаемому способу	Пробная выпечка по предлагаемому способу с окислителем (бромат калия 0,005 %)
Объем, см ³	810	960	1120
Удельный объем, см ³ на 100 г	244	291	361
Формоустойчивость	0,37	0,45	0,53
Влажность, %	43,5	42,9	43,4
Кислотность, град	2,1	2,1	2,4
Пористость, %	69,1	71,4	73,5

Заключение

Технологические характеристики качества хлебобулочных изделий (удельный объем, формоустойчивость, влажность, кислотность и пр.) могут быть спрогнозированы в математической модели, основанной на параметрах тестоприготовления. Потребительские качества хлебобулочной продукции из муки со средними и слабыми хлебопекарными свойствами можно повысить, гибко регулируя технологическими параметрами производства.

Улучшение качества возможно за счет выработки производственных решений о способе приготовления полуфабрикатов. Управление качеством продукции осуществляется при опарном способе тестоприготовления. Способ тестоприготовления с вращением сосуда и добавлением окислителя позволяет улучшить структурно-механические свойства теста и технологические свойства готовых изделий.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Федотов В. А. Информационно-измерительная система определения потребительских свойств пшеницы / В. А. Федотов, П. В. Медведев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – № 3. – С. 140-145.
2. Саидов, Д. Т. Резервы повышения рентабельности реализации зерна / Д. Т. Саидов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2010. – №2 (26). – С.152-155.
3. Doggett H. Sorghum. 2nd edition / H. Doggett // New York, USA: John Wiley and Sons. Inc., NY, 1988. – P. 512.
4. Hochholdinger F. Towards the molecular basis of heterosis / F. Hochholdinger, N. Hoekenger. – Trends Plant Sci., 2007. – 12. – P. 427-432.
5. Agric. Food Chem / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. – 57. – 2009.
6. Беркутова, Н. С. Микроструктура пшеницы / Н. С. Беркутова, И. А. Швецова. – М.: Колос, 1977. – 122 с.
7. Жидков, С. А. Приоритетные направления развития рынка зерна в России: монография / С. А. Жидков. – Мичуринск: ООО БИС, 2018. – 313 с.
8. Медведев, П. В. Комплексная оценка потребительских свойств зерна и продуктов его переработки / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 7-1 (38). – С. 77-80.
9. Зенкина И. В. Анализ стратегических разрывов как инструмент стратегического анализа и потенциал его применения в стратегическом управлении организацией / И. В. Зенкина // Аудит и финансовый анализ. – 2012. – № 4. – С. 107-112.
10. Шепелев, А. Ф. Товароведение и экспертиза электротоваров: учебное пособие для вузов / А. Ф. Шепелев, И. А. Печенежская. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 192 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fedotov V. A. Informatsionno-izmeritel'naya sistema opredeleniia potrebitel'skikh svoi'stv pshenitsy` [Information and measurement system for determining the consumer properties of wheat] / V. A. Fedotov, P. V. Medvedev // Vestnyk Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. – 2013. – № 3. – pp. 140-145. [in Russian]
2. Saidov, D. T. Rezervy` pov`sheniia rentabel`nosti realizatsii zerna [Reserves for increasing the profitability of grain sales] / D. T. Saidov // Izvestiia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Orenburg State Agrarian University] – 2010. – №2 (26). – pp.152-155. [in Russian]
3. Doggett H. Sorghum. 2nd edition / H. Doggett // New York, USA: John Wiley and Sons. Inc., NY, 1988. – P. 512.
4. Hochholdinger F. Towards the molecular basis of heterosis / F. Hochholdinger, N. Hoekenger // Trends Plant Sci., 2007. – 12. – pp. 427-432.
5. Agric. Food Chem / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. – 57. – 2009.
6. Berkutova, N. S. Mikrostruktura pshenitsy` [Microstructure of wheat] / N. S. Berkutova, I. A. Shvetcova. – М.: Kolos, 1977. – 122 p. [in Russian]
7. Zhidkov, S. A. Prioritetny`e napravleniia razvitiia ry`nka zerna v Rossii: monografiia [Priority directions of grain market development in Russia: monograph] / S. A. Zhidkov. – Michurinsk: ООО БИС, 2018. – 313 p. [in Russian]
8. Medvedev, P. V. Kompleksnaia ochenka potrebitel'skikh svoi'stv zerna i produktov ego pererabotki [Comprehensive assessment of consumer properties of grain and its processed products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Mezhdunarodny`i nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]. – 2015. – № 7-1 (38). – pp. 77-80. [in Russian]
9. Zenkina I. V. Analiz strategicheskikh razry`vov kak instrument strategicheskogo analiza i potencial ego primeniia v strategicheskom upravlenii organizatsiei` [Analysis of strategic gaps as a tool of strategic analysis and the potential of its application in the strategic management of the organization] / I. V. Zenkina // Audit i finansovy`i analiz. – 2012. – № 4. – pp. 107-112. [in Russian]
10. Shepelev, A. F. Tovarovedenie i e`kspertiza e`lektrotovarov: uchebnoe posobie dlia vuzov [Commodity science and expertise of electrical goods: a textbook for universities] / A. F. Shepelev, I. A. Pechenezhskaia. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 192 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.055>

ПРИМЕНЕНИЕ ОВОЩНОЙ МУКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЗГЛУТЕНОВЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Научная статья

Москвичев А.С.¹, Москвичева Е.В.^{2,*}, Тимошенко И.А.³

¹ ORCID: 0000-0002-9132-3504;

² ORCID: 0000-0003-4687-3483;

³ ORCID: 0000-0003-4917-0556;

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (moskvicheva_ev[at]spbstu.ru)

Аннотация

Безглютеновая диета предлагается в качестве лечения нескольких заболеваний, из которых целиакия является наиболее значимой. Пищевое растительное сырье является богатым источником функциональных микронутриентов, в первую очередь, биологически активных соединений, пищевых волокон и минеральных веществ. Для улучшения полезных свойств хлебобулочных изделий может быть рекомендовано включение в их рецептуры фруктовых и овощных ингредиентов. Оценивалось влияние добавления различных видов овощных мук (из цветной капусты, фенхеля, цуккини) на органолептические и антиоксидантные свойства безглютеновых хлебобулочных изделий. В статье приведены результаты дегустации моделируемых видов безглютенового хлеба по органолептическим показателям качества, а также проведены исследования и сделаны выводы о содержании в разработанных моделях хлеба флавоноидов, обогащение которыми повышает функциональные свойства продукта. Установлено, что из трех исследуемых видов муки, наилучшим образом в хлебобулочном изделии проявила себя мука из фенхеля, увеличив его привлекательность, биологическую ценность и антиоксидантную активность.

Ключевые слова: хлебобулочные изделия, овощная мука, безглютеновый хлеб, флавоноиды, антиоксидантная активность.

USE OF VEGETABLE FLOUR IN PRODUCTION OF GLUTEN-FREE BAKERY PRODUCTS

Research article

Moskvichev A.S.¹, Moskvicheva E.V.^{2,*}, Timoshenkova I.A.³

¹ ORCID: 0000-0002-9132-3504;

² ORCID: 0000-0003-4687-3483;

³ ORCID: 0000-0003-4917-0556;

^{1, 2, 3} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

* Corresponding author (moskvicheva_ev[at]spbstu.ru)

Abstract

The gluten-free diet is considered a treatment for several diseases, of which celiac disease is the most significant. Vegetable raw materials are a rich source of functional micronutrients, biologically active compounds, dietary fibers and minerals. In order to improve the useful properties of bakery products, it may be recommended to include fruit and vegetable ingredients in their formulations. The influence of the addition of different types of vegetable flour (from cauliflower, fennel, zucchini) on the organoleptic and antioxidant properties of gluten-free bread products was assessed. The article presents the results of tasting of modeled types of gluten-free bread on their organoleptic quality indicators, as well as research and conclusions about the content of flavonoid bread in the developed models, enrichment of which enhances the functional properties of the product. Of three varieties of flour studied, fennel flour has been found to be the most effective for bakery products, increasing its attractiveness, biological value and antioxidant activity.

Keywords: bakery products, vegetable flour, gluten-free bread, flavonoids, antioxidant activity.

Введение

Безглютеновые продукты питания являются важной и наиболее быстро развивающейся категорией товаров на рынке пищевой переносимости. Безглютеновая диета предлагается в качестве лечения нескольких заболеваний [5], [1], из которых целиакия является наиболее значимой, так как ограничительное меню без глютена является её единственной эффективной терапией. Кроме того, возросшая популярность продуктов без глютена наблюдается у групп населения, придерживающихся здорового питания и стремящихся снизить свой избыточный вес. Этот интерес отражает мировое увеличение темпов роста продаж безглютеновых продуктов на протяжении последнего десятилетия [7]. При этом порядка половины продаж безглютеновых продуктов приходится на хлебобулочные изделия, традиционно являющиеся категорией товаров ежедневного спроса.

Имеющиеся в настоящее время на рынке общедоступные безглютеновые хлебобулочные изделия основаны на кукурузе, рисе, картофеле и гречке. Многие из этих товаров обладают более низкой потребительской привлекательностью, чем их аналоги с глютеном. Основными недостатками такого безглютенового хлеба являются: нестабильная структура, плотный и крошливый мякиш, а также недостаточно выраженные вкусоароматические характеристики. В многочисленных исследованиях изучались различные технологические параметры и рецептуры для улучшения качества безглютенового хлеба с использованием крахмалов [11], молочных продуктов, камедей и гидроколлоидов [10]. Однако применение данных стабилизаторов и загустителей позволяет эффективно корректировать структурно-механические свойства (текстуру) безглютеновых продуктов, но не дает должного результата в улучшении других сенсорных свойств и повышении функциональных возможностей. Учитывая данные сведения и тот факт, что хлеб без глютена является «обедненным» с точки зрения питания, разработка рецептур

безглютеновых хлебобулочных изделий с добавленной пользой, отвечающих высоким потребительским свойствам, представляет собой важную задачу для предприятий хлебопекарной отрасли [1].

Общезвестно, что пищевое растительное сырье является богатым источником функциональных микронутриентов, в первую очередь, биологически активных соединений (полифенолов, каротиноидов, витаминов), пищевых волокон (клетчатки) и минеральных веществ [8]. Исходя из этого, для улучшения полезных свойств хлебобулочных изделий может быть рекомендовано включение в их рецептуры фруктовых и овощных ингредиентов. Проведенные ранее исследования показали, что обогащение белого хлеба овощной мукой можно рассматривать как новую тенденцию повышения его пищевой ценности и функциональных свойств [6]. Кроме того, овощная мука не содержит глютена, вследствие чего может использоваться для диетического питания при непереносимости данного вещества.

Цель данного исследования состояла в разработке рецептуры обогащенного овощным ингредиентом безглютенового хлеба с улучшенными потребительскими и функциональными свойствами.

Для реализации поставленной цели в качестве обогащающего компонента были использованы муки из овощных растений – цветной капусты, цуккини и фенхеля. В качестве основного безглютенового сырья была выбрана рисовая мука, являющаяся наиболее подходящим для производства безглютеновых продуктов ингредиентом, с низким уровнем проламина и уникальными гипоаллергенными свойствами. Задачи исследования состояли в определении содержания флавоноидов в овощной муке и разработанных моделях хлеба, и изучении влияния выбранных овощных ингредиентов на органолептические показатели качества безглютеновых хлебов и их антиоксидантную активность.

Методы и принципы исследования

Объектами исследования являлись порошки (муки) из сушеных овощей (цветной капусты, кабачков и фенхеля), а также безглютеновые хлеба с их добавлением.

Используемые в исследованиях овощные муки получали из соответствующих овощных культур урожая 2021 года, которые были высушены в сушильном шкафу при температуре 35 °С до достижения остаточной влажности 10% и измельчены в мелкий порошок со средним размером частиц менее 100 мкм.

Для проведения серии испытаний все образцы безглютеновых хлебов изготавливали по одному технологическому процессу, включающему приготовление теста на основе рисовой муки с добавлением овощной муки, разделку теста на тестовые заготовки и выпечку.

Контрольный образец хлеба был приготовлен с использованием следующих ингредиентов: рисовая мука (630 г), модифицированные картофельный и кукурузный крахмалы (300 г), дрожжи хлебопекарные прессованные (30 г), сахар (60 г), соль (15 г), масло подсолнечное рафинированное (15 г), сыворотка молочная сухая (50 г), пищевая сода (15 г), камедь ксантановая (10 г), вода питьевая из расчета влажности теста 43,5 %. В экспериментальные образцы взамен рисовой муки вносили 10 % растительной муки, соответственно из цветной капусты, цуккини и фенхеля.

Тесто для выпечки готовили безопасным способом. Ингредиенты смешивали в кондитерском миксере до получения теста однородной консистенции. Образцы замесов термостатировали при постоянной температуре (31±1) °С в течение 170 мин. Выбродившее тесто делили на заготовки по 500 г, формовали и помещали в термостат для расстойки. После второй расстойки образцы теста направляли в пекарный шкаф с паровлажнением, где их выпекали до готовности при температуре 200–220 °С. Выпечку проводили в трех экземплярах. После выпечки готовые изделия охлаждали до комнатной температуры.

Органолептические показатели качества моделируемых образцов безглютеновых хлебов оценивались дегустационной комиссией на основе общего осмотра и восприятия органами чувств (обоняние, вкус, осязание, зрение). В качестве наиболее важных органолептических показателей хлебов были выбраны: внешний вид (форма, поверхность), вкус, запах, цвет мякиша и его состояние (эластичность, размеры и равномерность распределения пор). Результаты оценки выражались в виде баллов по условной 9-балловой безразмерной шкале с возрастающей последовательностью чисел, каждое из которых соответствует определенной желательности того или иного качественного показателя: от 1 (крайне неприятный) до 9 (очень приятный). Для характеристики качественных показателей использовалась терминология действующего стандарта ГОСТ Р 52462 [3]. Определяли органолептические показатели после остывания образцов по ГОСТ 5667 [4], не ранее чем через 4 часа и не позднее, чем через 24 часа после выпечки. Перед оценкой моделируемые хлеба нарезают на ломтики толщиной 1,5 см и кодируют. Обобщение дегустационных оценок показателей качества выполнялось методом средних арифметических.

Для определения суммы флавоноидов в изучаемых объектах исследования применяли спектрофотометрический метод [2], основанный на реакции комплексобразования флавоноидов с алюминия хлоридом и использованием кверцетина в качестве стандарта. Общее количество флавоноидов выражалось в мг кверцетина/г сухого вещества.

Определение антиоксидантного потенциала овощных порошков (муки) и разработанных моделей безглютенового хлеба проводили методом DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидрозил) в соответствии с методикой [9], показывающий антирадикальную активность образцов. Антирадикальную активность выражали в процентах как активность улавливания радикалов DPPH (The DPPH radical scavenging activity (RSA %)).

Основные результаты

Результаты органолептической оценки качества моделируемых образцов безглютеновых хлебов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Балловая оценка органолептических показателей моделированных безглютеновых хлебов с добавлением овощных мук, n = 3

Наименование показателя	Оценка (баллы) показателей			
	Контроль	Хлеб с добавлением муки из цветной капусты	Хлеб с добавлением муки из цуккини	Хлеб с добавлением муки из фенхеля
Внешний вид	7,87±0,40	7,22±0,36	5,77±0,29	8,46±0,42
Цвет мякиша	7,81±0,39	8,07±0,40	7,09±0,35	8,36±0,42
Аромат (запах)	7,61±0,38	7,15±0,36	5,69±0,28	8,13±0,41
Вкус	7,48±0,37	6,56±0,33	5,97±0,30	8,50±0,42
Пористость мякиша	7,93±0,40	6,62±0,33	5,51±0,27	8,12±0,41
Эластичность мякиша	7,75±0,39	6,89±0,34	5,50±0,27	8,07±0,40
Качество хлеба по совокупности показателей	7,74±0,39	7,08±0,35	5,84±0,29	8,28±0,41

Как видно из полученных результатов, внесение овощных порошков (мук) в той или иной мере оказывает влияние на все сенсорные характеристики готового изделия. Однако все показатели находились в диапазоне более 5,5 баллов, что указывает на приемлемость полученных хлебов, с некоторыми различиями между ними. Так, образец хлеба с добавлением муки из цуккини получил наименьшую оценку ввиду плотного мякиша с наличием очень мелких недоразвитых пор, ярко выраженного зеленого оттенка и «травянистого» вкуса, снижающими общее восприятие продукта. Образцы хлебов с добавлением муки из фенхеля и цветной капусты показали оценку цвета мякиша выше, чем у контрольного образца, поскольку их мякиш имел приятный светлый оттенок. По остальным показателям, изделия с добавлением муки из цветной капусты себя не проявили, в отличие от образцов с добавлением фенхеля. По результатам органолептической оценки установлено, что по всем оцененным сенсорным показателям максимальный балл (более 8) был получен у образца хлеба с добавлением муки из фенхеля, имеющего статистически значимые различия по сравнению со всеми другими образцами, включая контроль. С точки зрения общего качества хлеба, обогащенный мукой из фенхеля, имел приятное вкусоароматическое восприятие и более мягкую эластичную текстуру с развитой пористостью (без пустот и уплотнений).

Одними из основных методов исследования антиоксидантной активности пищевых продуктов являются определение содержания флавоноидов (природных антиоксидантов) и исследование способности улавливать свободные стабильные радикалы по радикалу DPPH. Результаты определения данных показателей в объектах исследования представлены в таблице

Таблица 2 – Общее содержание флавоноидов и антиоксидантная активность образцов муки и моделированных безглютеновых хлебов, n = 3

Наименование показателя	Общее содержание флавоноидов, мг кверцетина/г с.в.	Антиоксидантная активность DPPH RSA, %
Мука рисовая (контрольный образец)	0,15 ±0,07	2,98 ±0,15
Мука из цветной капусты	4,85 ±0,24	80,18 ±4,01
Мука из цуккини	5,58 ±0,28	55,23 ±2,76
Мука из фенхеля	4,41 ±0,22	72,00 ±3,60
Хлеб контрольный образец	0,03 ±0,00	0,01 ±0,00
Хлеб с добавлением муки из цветной капусты	0,46 ±0,02	5,20 ±0,26
Хлеб с добавлением муки из цуккини	0,58 ±0,03	4,54 ±0,18
Хлеб с добавлением муки из фенхеля	0,43 ±0,02	6,56 ±0,33

Из результатов экспериментов видно, что в рисовой муке практически отсутствуют флавоноиды, а ее антиоксидантная активность находится на предельно низком уровне (<3% RSA). Напротив, овощные ингредиенты по общему содержанию флавоноидов в несколько раз превосходят рисовую муку, а их антиоксидантная активность становится значимой (> 55 % RSA). Наибольшую антиоксидантную активность показали образцы муки из цветной капусты и фенхеля. Подтверждается зависимость антиоксидантной активности от содержания полифенольных соединений.

Результаты исследований общего содержания флавоноидов и антирадикальной активности в моделированных безглютеновых хлебах выявили существенные различия между контрольным образцом и образцами с добавлением овощных мук, кроме того, во всех случаях наблюдалась потеря данных показателей по сравнению с соответствующими видами мук более чем в 10 раз. Максимальным содержанием флавоноидов обладал хлеб, полученный с добавлением муки из фенхеля, однако наилучшей антиоксидантной активностью проявлялась у хлеба с добавлением муки из фенхеля ($6,56 \pm 0,33$ % RSA). Контрольный образец хлеба из рисовой муки по всем показателям показал значения близкие к нулю, что ожидаемо.

Стоит отметить, что процессы приготовления теста и выпечки хлеба привели к потере общего содержания флавоноидов. Объяснением является высокая нестабильность полифенольных веществ в ходе термической обработки и ферментативного окисления при замешивании теста. Кроме того, низкий уровень экстрагируемых биоактивных соединений из хлеба после выпечки может быть результатом образования фенолсодержащих комплексов с полисахаридами, или белками, или ферментами.

Заключение

На основании полученных данных, можно сделать выводы о влиянии вида муки и термической обработки на содержание флавоноидов в готовых изделиях и их антиоксидантную активность. Анализируя показатели содержания флавоноидов и антирадикальной активности моделированных безглютеновых хлебов, несмотря на их потери во время выпечки, а также результаты органолептической оценки, можно сказать, что 10 % замена рисовой муки на муку из фенхеля позволяет повысить в несколько раз антиоксидантный потенциал готового продукта, его биологическую ценность и сенсорные характеристики.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Исследование безглютеновых видов муки для производства хлебобулочных изделий / П. Ж. Анашкина, Е. В. Москвичева, И. А. Тимошенкова и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 1-1 (103). – С. 98–104.
2. Беликов В. В. Оценка содержания флаванолов-производных в плодах *Silybum marianum* (L.) Gaertn. / В. В. Беликов // Растительные ресурсы. – 1985. – Т. 21. – № 3. – С. 350–358.
3. ГОСТ Р 52462-2005 Изделия хлебобулочные из пшеничной муки. Общие технические условия – М.: Стандартинформ. – 2008. – 14 с.
4. ГОСТ 5667-65 Хлеб и хлебобулочные изделия. Правила приемки, методы отбора образцов, методы определения органолептических показателей и массы изделий – М.: ИПК Издательство стандартов – 1997. – 5 с.
5. Кролевец Т. С. Новое в диагностике и терапии глютеноассоциированных заболеваний / Т.С. Кролевец, М. А. Ливзан, М. И. Сыровенко // Фарматека. – 2022 – № 29(2). – С. 18–24.
6. Матвеева, Т.В. Мучные кондитерские изделия функционального назначения. Научные основы, технологии, рецептуры: монография / Т.В. Матвеева, С.Я. Корячкина. – Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» – 2011. – 343 с.
7. Савкина О.А. Производство безглютеновых изделий: состояние и перспективы развития / Савкина О.А., Парахина О.И., Кузнецова Л.И., Гаврилова Т.А. // Хлебопродукты. – 2019. – № 12. – С. 40–45.
8. Fruit and vegetable phytochemicals: chemistry, nutritional value and stability / Ed. by de la Rosa Laura A. Wiley-Blackwell. – 2010. – 384 p.
9. Effect of pomegranate peel and honey fortification on physico-chemical, physical, microbiological and antioxidant properties of yoghurt powder / A. Kennas, H. Amellal-Chibane, F. Kessal et al. // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. – 2020. – p. 1–10.
10. Lazaridou, A., Effects of Hydrocolloids on Dough Rheology and Bread Quality Parameters in Gluten-Free Formulations / Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N. and Biliaderis, C.G. // Journal of Food Engineering. – 2007. – No. 79. – p. 1033–1047.
11. Sakač, M., Influence of Breadmaking on Antioxidant Capacity of Gluten Free Breads Based on Rice and Buckwheat Flours / Sakač, M., Torbica, A., Sedej, I. and Hadnadev, M. // Food Research International – 2011 – No. 44. – p. 2806–2813.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Isledovanie bezglytennix vidov myki dly proizvodstva xlebobylochnyx izdelie [Research of gluten-free types of flour for the production of bakery products] / P. Zh. Anashkina, E. V. Moskvicheva, I. A. Timoshenkova et al. // International Research Journal. – 2021. – №1-1 (103). – P. 98–104. [in Russian]
2. Belikov V. V. Ocenka soderganiy flavanolov-proizvodnyx v plodax *Silybum marianum* (L.) Gaertn [Assessment of the content of flavonol derivatives in fruits *Silybum marianum* (L.) Gaertn] / V. V. Belikov // Rastitelnye resyrsi [Plant resources]. – 1985. – V. 21. – P. 350–358. [in Russian]
3. GOST R 52462-2005 Izdelie xlebobylochnye iz pshenichnou myki. Obchie texnicheskie usloviy [Bakery products made of wheat flour. General technical conditions] – М.: Standartinform – 2008. – 14 p. [in Russian]

4. GOST 5667-65 Xleb i xlebobylochnye izdelie. Pravilo priemki, metodi otbora obrazov, metodi opredeleniy organolepticheskix pokazatelei i massi izdelii [Bread and bakery products. Acceptance rules, sampling methods, methods for determining organoleptic parameters and mass of products] – М.: ИПК Publishing House of Standards – 1997 – 5 p. [in Russian]
5. Krolevets T. S. Novoe v diagnostike i terapii glyten-assotsirovannix zabolevanii [New in the diagnosis and therapy of gluten-associated diseases] / Krolevets T. S., Livzan M. A., Syrovenko M. I. // Farmateka [Pharmateca]. – 2022. – №29(2). – P. 18-24. [in Russian]
6. Matveeva, T.V. Flour confectionery products of functional purpose. Scientific foundations, technologies, recipes: monograph / T.V. Matveeva, S.Ya. Koryachkina Eagle: FGOU VPO "Gosuniversitet-UNPK". – 2011 – 343 p. [in Russian]
7. Production of gluten-free products: state and prospects of development / Savkina O. A., Parakhina O. I., Kuznetsova L. I. et al. // Xleboprodykti [Bread products]. – 2019. – № 12. – P. 40-45. [in Russian]
8. Fruit and vegetable phytochemicals: chemistry, nutritional value and stability / Ed. by de la Rosa Laura A. Wiley-Blackwell. – 2010. – 384 p.
9. Effect of pomegranate peel and honey fortification on physi-cochemical, physical, microbiological and antioxidant properties of yoghurt powder / A. Kennas, H. Amellal-Chibane, F. Kessal et al. // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. – 2020. – p. 1-10.
10. Lazaridou A. Effects of Hydrocolloids on Dough Rheology and Bread Quality Parameters in Gluten-Free Formulations / A. Lazaridou, D. Duta, M. Papageorgiou et al. // Journal of Food Engineering. – 2007. – No. 79. – p. 1033-1047.
11. Sakač M. Influence of Breadmaking on Antioxidant Capacity of Gluten Free Breads Based on Rice and Buckwheat Flours / M. Sakač, A. Torbica, I. Sedej et al. // Food Research International – 2011 – No. 44. – p. 2806-2813.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.056>**РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТА ОСНОВАНИЯ ПРИ ОТРЫВЕ СООРУЖЕНИЯ В ПРЕДПОЛОЖЕНИИ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ**

Научная статья

Норина Н.В.*

ORCID: 0000-0003-3126-6648,

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

Аннотация

В статье описаны условия отрыва малозаглубленного сооружения от грунтов основания. Описан эксперимент для фиксации перемещения грунта при действии отрывающих усилий на основе способа фотосъемки. Время отрыва в этом случае определяется временем заполнения полости водой и вертикальным перемещением сооружения. Описан метод расчета прочности основания – способ круглоцилиндрических поверхностей скольжения, предложенный К. Терцаги. Показано, что до возникновения отрыва сооружения по подошве возможен отрыв сооружения с захватом грунта основания, что определяется скоростью нарастания отрывающего усилия и его интенсивностью. Возможность отрыва сооружения с захватом грунта основания увеличивается с уменьшением отрицательных избыточных давлений в воде.

Ключевые слова: отрыв малозаглубленного сооружения от грунта, способ круглоцилиндрических поверхностей скольжения, устойчивость грунтовых оснований, коэффициент запаса устойчивости.

CALCULATION OF FOUNDATION SOIL STABILITY WITH STRUCTURE REMOVED IN SUPPOSITION OF CIRCULAR CYLINDRICAL SLIDING SURFACES

Research article

Norina N.V.*

ORCID: 0000-0003-3126-6648,

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

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

Abstract

The article describes cases of shallow foundation removal from soil. The experiment of fixating the soil movement during pull impact is recorded with photography. The time span of removal in this case is determined by the time needed to fill the cavity with water and move the construction vertically. Method of calculating the foundation endurance, that of circular cylindrical sliding surfaces, presented by K. Terzhagi is described. It is shown that before the construction may be removed down its foundation, it can affect the soil with its removal, which is determined by pull increase and intensity. The possibility of construction and soil removal increases with negative water pressure reduction.

Keywords: shallow construction off soil removal, circular cylindrical sliding surfaces method, soil foundation endurance, stability coefficient.

Введение

В настоящее время вопросы, связанные с определением усилия отрыва сооружений от водонасыщенного грунта, приобретают особую актуальность в связи:

1. С активным строительством и эксплуатацией морских подводных трубопроводов [1], [2]
2. С использованием для разведочного и экспериментального бурения на нефть и газ на континентальном шельфе стационарных платформ, условия строительства которых в открытом море и при штормах обусловили к ним требование возможности быстрого демонтажа при их перебазировке и повторной эксплуатации на других месторождениях [3], [4], [5].
3. С использованием в арктических морях стационарных металлических платформ высокой прочности со сложной многоколонной системой опоры о дно и одноопорных платформ (моноподов)
4. С проведением аварийно-спасательных операций и при судоподъеме

В связи с этим целью работы является разработка методики оценки условий отрыва сооружения при использовании существующих численных методов решения плоской задачи реконсолидации основания под действием отрывающей нагрузки

Основные результаты

При полном отсутствии заглубления условие отрыва сооружения по его подошве может быть представлено в виде уравнения

$$\sum_{-b/2}^{b/2} \sigma_{z,i} \Delta x = \sum_{-b/2}^{b/2} (L - q_{\text{соор}}) \Delta x \quad (1)$$

где σ_z – напряжения в скелете грунта,
 L – липкость грунта,
 $q_{\text{соор}}$ – вес сооружения,
 b – размер сооружения,
 при этом

$$\sum_{-b/2}^{b/2} \sigma_{zi} \Delta x = \sum_{-b/2}^{b/2} (q - p_i) \Delta x,$$

где p_i – давление в поровой воде

q - отрывающая нагрузка

Время отрыва $t_{\text{отр}} = t_L$, т.е. соответствует моменту времени t_L , когда суммарные растягивающие напряжения по подошве равны суммарным силам липкости (L).

В случае даже небольшого заглубления сооружения в грунт (h) время отрыва определяется временем заполнения полости водой и вертикальным перемещением сооружения вверх S , определяемым по зависимости

$$S = \sum_{t_L}^t \Delta Q \Delta t \quad (2)$$

где ΔQ - средний приток воды в полость за расчетный промежуток времени Δt .

Принимая, что после преодоления заглубления в грунт h , происходит заполнение всей полости водой, имеем условие отрыва сооружения от грунта в виде

$$S = h$$

и соответствующее условию (2) время отрыва сооружения от грунта по подошве ($t_{\text{отр}}$).

До возникновения отрыва сооружения по подошве возможен отрыв сооружения с захватом грунта основания [6], [7], [8], [9]. Возможность отрыва с захватом грунта основания существенно определяется скоростью нарастания отрывающего усилия и его интенсивностью. По мере уменьшения величины отрицательных избыточных давлений в воде возможность возникновения отрыва сооружения с захватом грунта основания увеличивается [10], [11].

Для выбора метода расчета прочности оснований были проведены исследования траекторий движения частиц грунта при действии отрывающих усилий. В опытах использовался полностью водонасыщенный кембрийский суглинок (табл. 1). Эксперимент проводился в стеклянном лотке с размерами в плане 225x375 мм, высотой 210 мм. С целью снятия сил трения грунта по стеклянной стенке лотка она предварительно покрывалась тонким слоем вазелина. Затем на поверхность вазелина наносились частицы древесного угля, затем стенка лотка покрывалась слоем грунта. Таким образом, частицы древесного угля оказывались с одной стороны на передней стенке лотка, а с другой – сцепленными с частицами грунта. Затем заполнялось грунтом остальное пространство лотка. На поверхность грунта устанавливался металлический штамп размерами в плане 50x60 мм. Такие размеры штампа обеспечивали полное размещение смещающихся частей грунта в пределах размера лотка.

Таблица 1 – Характеристики кембрийского суглинка

Наименование грунта	Влажность на границе		Число пластичности	Плотность частиц г/см ³	Коэффициент пористости
	текучести	пластичности			
Суглинок кембрийский	0,33	0,20	0,13	2,78	0,5

К штампу прикладывалось отрывающее усилие 30Н. Для фиксации перемещения грунта использовался способ фотосъемки, впервые примененный В.И. Курдюмовым. Фотосъемка производилась при выдержке 2 сек. На рис. 1 представлена фотография грунта с вкрапленными частицами угля за прозрачной стенкой лотка при отрыве штампа. Перемещающиеся вместе со штампом частицы грунта оставляли на пленке «смазанный» след, соответствующие траектории движения грунта. Как видно из фотографии границы между областями и смещающегося грунта («смазанный» след) по форме близки к дуге окружности.

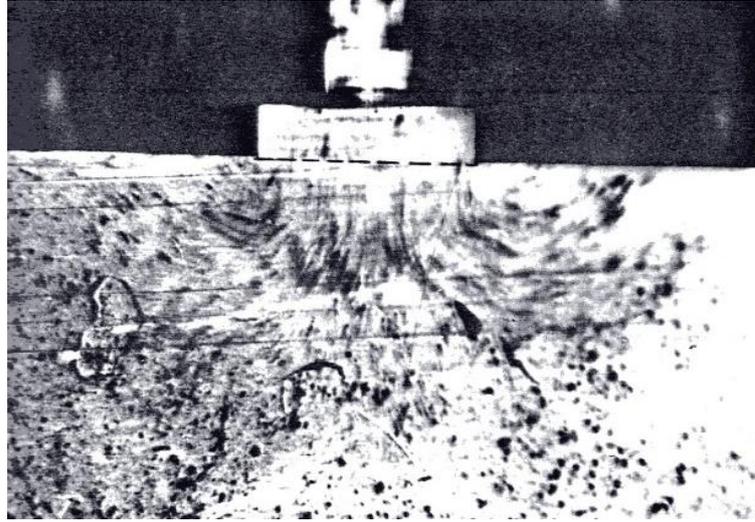


Рис. 1 – Перемещающиеся частицы грунта («смазанный» след), расположенные за прозрачной стенкой лотка при отрыве штампа

Следовательно, в качестве метода оценки возможности отрыва с грунтом основания можно принять способ круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

При расчете устойчивости с захватом грунта основания необходимо учитывать действие отрывающих нагрузок, передающихся на скелет грунта за счет сил адгезии, а также действия фильтрационных сил (рис. 2, а, б). Действие этой системы сил можно заменить эквивалентной (рис. 2, в), прикладывая по подошве сооружения отрывающую нагрузку ($q_{отр}$), принимая грунт полностью насыщенным водой ($\gamma_{нас}$), а по кривой обрушения, прикладывая полные граничные давления в воде (избыточные P и гидростатические $P_{гидрост}$).

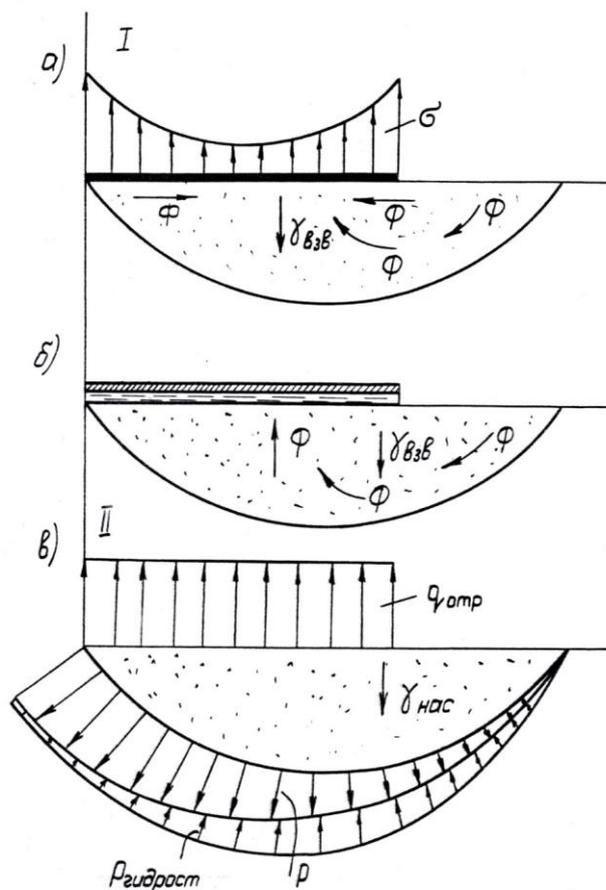


Рис. 2 – Основная расчетная схема действия сил: (I) и эквивалентная схема; (II) при оценке устойчивости

Расчет коэффициента запаса устойчивости для рассматриваемой схемы (рис. 3) производится по зависимости К. Терцаги.

$$K_3 = \frac{Rb_n \sum_{i=1}^n (q_{ni} - p_i^*) \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \phi_i + R \sum_{i=1}^n C_i \Delta S_i}{Rb \sum_{i=1}^n q_{ni} \sin \alpha_i} \quad (3)$$

где $q_{ni} = \gamma_{\text{нас}} \cdot h_i - q_{\text{отр}}$; $p_i^* = P_{\text{гидростат}} - p_i$; $\Delta S_i = \frac{b_n}{\cos \alpha_i}$;

R – радиус расчетной дуги окружности $R = \sqrt{x_R^2 + z_R^2}$; (начало координат находится в крайней точке штампа);

b_n – ширина расчетного столбика;

ϕ_i – угол внутреннего трения;

C_i – сцепление;

h_i – высота каждой полоски;

$P_{\text{гидростат}}$ – гидростатическое давление по подошве столбика ($P_{\text{гидростат}} = \gamma_w h_i$);

p_i – избыточное давление в поровой воде;

ΔS_i – длина подошвы столбика;

α_i – угол между вертикалью и радиусом, проведенным в середину подошвы столбика.

Учитывая для малоуглубленного сооружения симметрию области отрыва, однородность характеристик основания, а также что

$$\gamma_{\text{нас}} - \gamma_w = \gamma_{\text{взв}},$$

уравнение (3) можно представить в виде

$$K_3 = \frac{\operatorname{tg} \phi \sum_{i=1}^n (\gamma_{\text{взв}} \cdot h_i - q_{\text{отр}} + p_i) \cos \alpha_i + C \sum_{i=1}^n \frac{1}{\cos \alpha_i}}{\sum_{i=1}^n q_{\text{отр}} \sin \alpha_i} \quad (4)$$

В задачу расчета входит определение круглоцилиндрической поверхности скольжения, по которой коэффициент запаса устойчивости достигает для данного момента времени отрыва минимального значения $K_{3\text{min}}$.

Отрыв считается возможным при коэффициенте запаса устойчивости $K_3 = 1$.

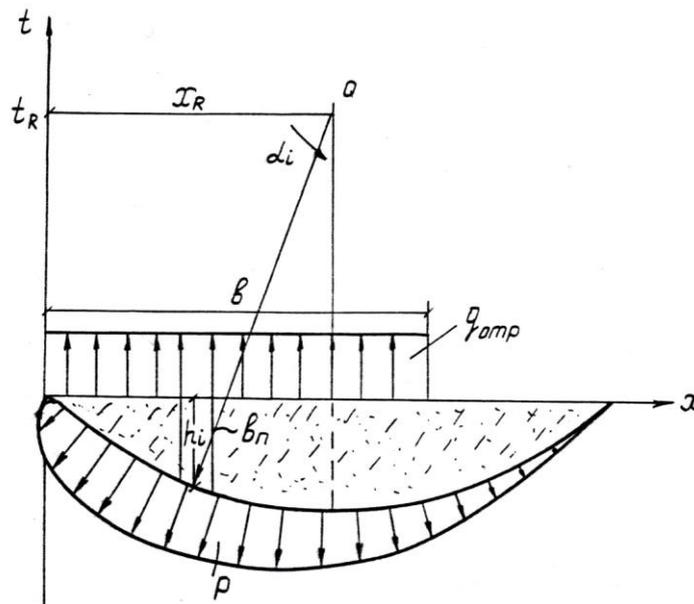


Рис. 3 – Расчетная схема оценки устойчивости по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения

Коэффициент запаса устойчивости $K_3(x_R, y_R)$ является функцией двух переменных параметров x_R, y_R – координат центра расчетной дуги окружности.

Оптимизация K_3 сводится к подбору сочетаний этих параметров в некоторой области таким образом, чтобы функция $K_3(x_R, y_R)$ имела минимальное значение. Поиск производится методом Гаусса-Зейделя. Перед началом процедуры выбирается окружность с параметрами x_{R0}, y_{R0} и начальные шаги поиска Δx и Δy . Поиск производится вариацией параметров x_R, y_R . Вначале изменяем первый параметр x_R от начального значения x_{R0} на величину $\pm \Delta x$, оставляя второй

параметр y_{R0} постоянным, осуществляя одномерный поиск по x_R , пока не получим значение K_3 наименьшим при параметрах $x_{R1} = x_{R0} \pm n_1 \Delta x$ и y_{R0} . Затем из полученной точки начинаем менять второй параметр y_R на величину $\pm \Delta y$, оставив закрепленным первый параметр. Проводим подобную одномерную процедуру поиска по y_R пока не найдем наименьшее значение K_3 в точке $(x_{R1} = x_{R0} \pm n_1 \Delta x; y_{R1} = y_{R0} \pm m_1 \Delta y)$. Затем опять меняем первый параметр с шагом $\pm \Delta x$ из точки $(x_{R1}; y_{R1})$ до получения наименьшего значения K_3 в точке $(x_{R2} = x_{R1} \pm n_2 \Delta x; y_{R1})$ и меняем второй параметр y_{R1} с шагом $\pm \Delta y$, пока не достигнем наименьшего значения K_3 в точке $(x_{R2}; y_{R2} = y_{R1} \pm m_2 \Delta y)$. И так далее пока не получим наименьшее значение K_3 по двум параметрам одновременно. Т.е. попадем в точку $(x_{R*}; y_{R*})$. Такая точка называется стационарной. После этого для уточнения результата процедура поиска повторяется из точки $(x_{R*}; y_{R*})$ с шагами $0,5 \Delta x$ и $0,5 \Delta y$. Шаги дробятся, до тех пор, пока полученные наименьшие значения K_3 в стационарных точках не будут отличаться друг от друга на заранее заданную величину (например, 0,005).

Определяя для различных моментов времени $K_{3\min}$, при получении $K_{3\min} = 1$ определяется момент времени отрыва с захватом грунта основания ($t_{отр}$).

В зависимости от характеристик грунта, размеров сооружения, скорости нарастания и интенсивности приложения отрывающей нагрузки возможен отрыв как по подошве сооружения, так и с захватом грунта основания. Время отрыва принимается минимальным из полученных.

Определение круглоцилиндрических поверхностей скольжения производилось в рамках решения плоской задачи реконсолидации основания под действием отрывающей нагрузки.

В качестве примера решения плоской задачи реконсолидации основания и отрыва малоуглубленного сооружения от грунта приведены результаты расчета, выполненные при следующих исходных данных:

$$\Delta h = 0,5 \text{ м}, e = 0,5; \gamma_w = 0,01 \text{ МПа/м}; K = 10^{-4} \text{ м/с}; a = 1,10^{-4} \text{ МПа}^{-1}; \Delta q = 2 \cdot 10^{-3} \text{ МПа};$$

$$L = 0,05 \text{ МПа}; q_{соор} = 0,02 \text{ МПа}; x_R = 6 \text{ м}; y_R = 12 \text{ м},$$

где e , K , a – коэффициенты пористости, фильтрации, сжимаемости;

Δq – изменение нагрузки за время Δt

На рис. 4 изображена расчетная область. Расстояние между узлами сетки $\Delta x = \Delta z = \Delta h$.

К малоуглубленному сооружению шириной 10 м приложена равномерно распределенная нагрузка q . Нагрузка прикладывается ступенями по $2 \cdot 10^{-3}$ МПа за каждое Δt . Нагрузка возрастает от нулевого значения до 0,036 МПа в течении 18 часов, затем остается постоянной. На рис. 5 представлена трансформация эпюры поровых давлений по дуге скольжения для моментов времени 29,2, 29,3, 300 часов.

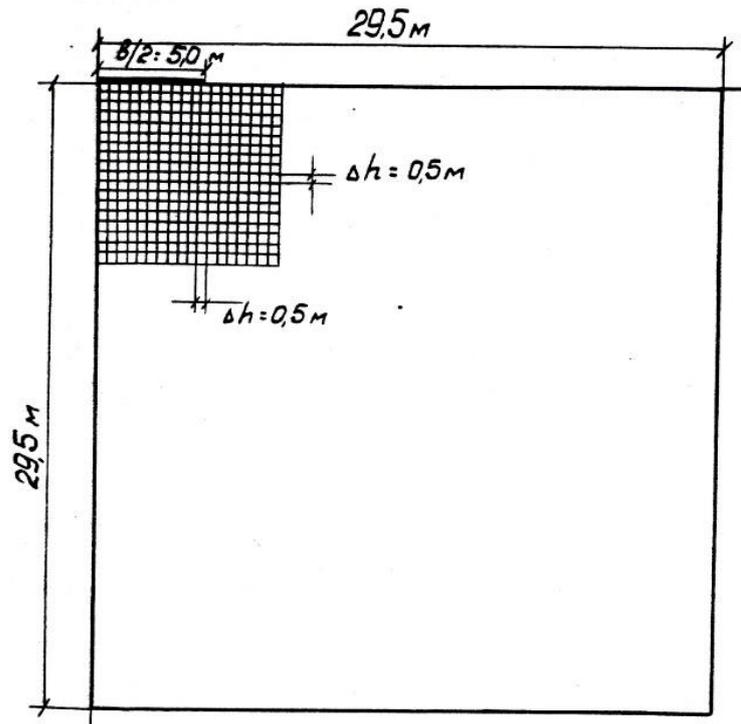


Рис. 4 – Расчетная область

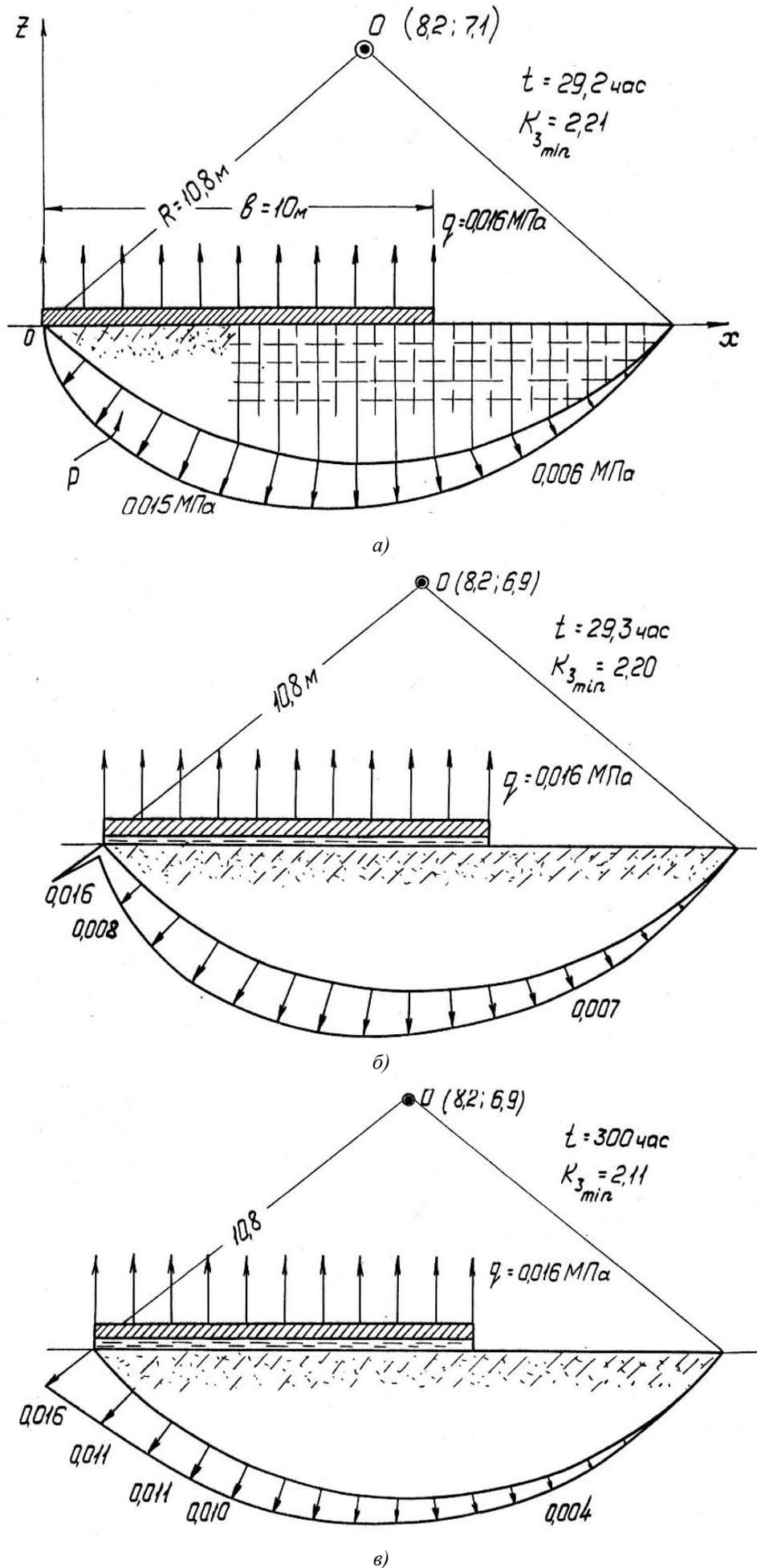


Рис. 5 – Трансформация эпюры поровых давлений по дуге скольжения для моментов времени:
 а) 29,2 часа; б) 29,3 часа; в) 300 часов

Результаты расчетов показывают, что с увеличением скорости приложения отрывающей нагрузки отрыв сооружения происходит с захватом грунта основания при нагрузках больших, чем в случае малых скоростей нагружения и сравнительно малых нагрузках, отрывающих сооружение по контакту с грунтом (без захвата грунта).

Заключение

Лабораторные опыты с отрывом малых штампов от глинистого основания показали, что при нарушении устойчивости (при отрыве) траектории смещения элементов основания близки к круглоцилиндрическим. По характеру перемещений элементов основания случай нарушения устойчивости при отрыве модели сооружения аналогичен случаю выпора грунта из-под модели сооружения, но обратный по направлениям движения штампа и элементов грунта. Поскольку целью эксперимента было установление качественной картины перемещения элементов основания при отрыве модели сооружения, то масштабный эффект не учитывался.

Характер перемещения элементов основания, установленный в результате эксперимента при отрыве модели сооружения на малом штампе, получился аналогичным характеру перемещения при выпоре грунта из-под модели сооружения, который имеет место при стандартных испытаниях грунта на больших штампах, поэтому результат эксперимента можно распространить и на большие штампы.

Разработанная методика оценки условий отрыва сооружения позволяет:

1. Оценить при заданной отрывающей нагрузке длительность ее приложения, которая необходима для отрыва сооружения от грунта.
2. При заданной возможной скорости нарастания отрывающей нагрузки определить время отрыва сооружения от грунта
3. При заданном времени отрыва сооружения от грунта определить требуемую отрывающую нагрузку и скорость ее нарастания
4. Определить каким образом происходит отрыв сооружения, с захватом грунта или только по подошве сооружения

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Эксплуатационная надежность морских трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях континентального шельфа России / Т. И. Лаптева, М. Н. Мансуров, М. В. Шабарчина и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 1. – С. 30-34.
2. Бородавкин, П. П. Механика грунтов / П. П. Бородавкин. – М., Недра Бизнесцентр, 2003. – 349 с.
3. Марченко И. А. особенности инженерных изысканий для постановки буровых платформ в арктических морях // Вести газовой науки. – №2 (39). – 2019. – с. 149-156.
4. Морские трубопроводы в транзитной зоне арктического шельфа. Обеспечение работоспособности / Т. И. Лаптева, М. Н. Мансуров, М. В. Шабарчина и др. // Oil&Gaz Россия. – 2018. – № 9. – С. 78-84.
5. Захаров М. М. К вопросу определения усилий при подъеме опорных колонн буровых установок, погруженных в глинистый грунт / М. М. Захаров. – Азербайджанское нефтяное хозяйство, 1981. – №3. – с. 65-68.
6. Бугров А. К. Расчетная оценка усилия отрыва от водонасыщенного грунта сооружения с неплоской подошвой / А. К. Бугров, А. И. Голубев // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – №5. – [Электронный ресурс]. URL: <http://georeconstruction.net/journals/05/11/11.htm> (дата обращения 10.05.2022).
7. Голубев А. И. К вопросу расчета осадки сооружения при волновом нагружении водонасыщенного основания / А. И. Голубев // Строительная механика и расчет сооружений: Сб. науч. тр. СПбГТУ. СПб. – 1996.
8. Голубев А. И. Расчет процесса консолидации слабых водонасыщенных грунтов / А. И. Голубев // Строительная механика и расчет сооружений: Сб. науч. тр./ СПбГТУ. СПб. – 1992.
9. Бугров А.К. Анизотропные грунты и основания сооружений / А. К. Бугров, А. И. Голубев– СПб.: Недра, 1993.
10. Герасимов В. Н. Фильтрационная составляющая сопротивления грунта отрыву поднимаемого судна / В. Н. Герасимов // Труды Ленинградского кораблестроительного института. Л., Судостроение и судовое машиностроение. – 1959. – № 29. – С. 21-25
11. Кузнецов А. Ю. Явление присоса при отрыве судна от донной постели в процессе перегрузки тяжеловесных грузов накатным способом и методы его преодоления / А. Ю. Кузнецов // Транспортный бизнес в России. – 2014. – №5. – С. 23-26

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ekspluatatsionnaya nadezhnost morskikh truboprovodov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh kontinentalnogo shelfa Rossii [Operational reliability of offshore pipelines in complex engineering and geological conditions of the continental shelf of Russia] / T. I. Lapteva, M. N. Mansurov, M. V. Shabarchina et al. // Bezopasnost truda v promyshlennosti [Occupational safety in industry]. – 2018. – No. 1. – pp. 30-34. [in Russian]
2. Borodavkin, P. P. Mekhanika gruntov [Mechanics of soils] / P.P. Borodavkin. – M., Nedra-Business Center, 2003. – 349 p. [in Russian]
3. Marchenko I. A. Osobennosti inzhenernykh izyskaniy dlya postanovki burovyykh platform v arkticheskikh moryakh [Features of engineering surveys for drilling platforms in the Arctic seas] / I. A. Marchenko // Vesti gazovoy nauki [News of Gas Science]. – 2019. – No.2 (39). – pp. 149-156. [in Russian]
4. Morskiye truboprovody v tranzitnoy zone arkticheskogo shelfa. Obespecheniye rabotosposobnosti [Offshore pipelines in the transit zone of the Arctic shelf. Description of the work] / T. I. Lapteva, M. N. Mansurov, M. V. Shabarchina et al. // Oil&Gaz Rossiya [Oil&Gaz Russia]. – 2018. – No. 9. – pp. 78-84. [in Russian]

5. Zakharov M. M. K voprosu opredeleniya usiliy pri podyeme opornykh kolonn burovykh ustanovok, pogrzhennykh v glinisty grunt [On the issue of determining the forces when lifting the support columns of drilling rigs immersed in clay soil] / M. M. Zakharov // Azerbaydzhanskoye neftyanoye khozyaystvo [Azerbaijan Oil Industry]. – 1981. – No. 3. – pp. 65-68. [in Russian]
6. Bugrov A. K. Raschetnaya otsenka usiliya otryva ot vodonasyshchennogo grunta sooruzheniya s neploskoy podshovoy [Estimated estimation of the separation force from the water-saturated soil of a structure with a non-planar sole] / A. K. Bugrov, A. I. Golubev // Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitelstvo [Urban reconstruction and geotechnical construction]. – 2003. – №5. – [Electronic resource]. URL: <http://georeconstruction.net/journals/05/11/11.htm> (accessed: 11.05.2022). [in Russian]
7. Golubev A. I. K voprosu rascheta osadki sooruzheniya pri volnovom nagruzhении vodonasyshchennogo osnovaniya [On the issue of calculating the precipitation of a structure under wave loading of a water-saturated base] / A. I. Golubev // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy: Sb. nauch. tr. SPbGTU. SPb [Construction mechanics and calculation of structures: Sb. sci. tr. SPbSTU. SPb]. – 1996. [in Russian]
8. Golubev A. I. Raschet protsessy konsolidatsii slabykh vodonasyshchennykh gruntov [Calculation of the consolidation process of weak water-saturated soils] / A. I. Golubev // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy: Sb. nauch. tr./ SPbGTU. SPb [Construction mechanics and calculation of structures: Sb. nauch. tr./ SPbSTU. SPb]. – 1992. [in Russian]
9. Bugrov A. K. Anizotropnyye grunty i osnovaniya sooruzheniy [Anisotropic soils and foundations of structures] / A. K. Bugrov, A. I. Golubev. – St. Petersburg: Nedra, 1993. [in Russian]
10. Gerasimov V. N. Filtratsionnaya sostavlyayushchaya soprotivleniya grunta otryvu podnimayemogo sudna [Filtration component of soil resistance to the separation of the lifted vessel] / V. N. Gerasimov // Trudy Leningradskogo korablestroitel'nogo instituta. L.. Sudostroyeniye i sudovoye mashinostroyeniye [Proceedings of the Leningrad Shipbuilding Institute. L., Shipbuilding and ship engineering]. – 1959. – No. 29. – pp. 21-25. [in Russian]
11. Kuznetsov A. Yu. Yavleniye prisosa pri otryve sudna ot donnoy posteli v protsesse peregruzki tyazhelovesnykh gruzov nakatnym sposobom i metody ego preodoleniya [The phenomenon of suction when the vessel is detached from the bottom bed in the process of overloading heavy loads by rolling method and methods of overcoming it] / A. Yu. Kuznetsov // Transportnyy biznes v Rossii [Transport Business in Russia]. – No. 5. – 2014. – pp. 23-26. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.057>

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ В ТЕКУЧЕЙ СРЕДЕ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ МАСС ВЫДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ

Научная статья

Сандуляк А.А.¹, Киселев Д.О.², Сандуляк Д.А.³, Полисмакова М.Н.^{4,*}, Кочуров К.А.⁵,
Красильников Е.А.⁶, Харин А.С.⁷

¹ ORCID: 0000-0002-5111-6092;

³ ORCID: 0000-0003-4269-6133;

⁴ ORCID: 0000-0002-4564-6206;

⁶ ORCID: 0000-0001-9278-5340;

⁷ ORCID: 0000-0002-0922-1366;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} МИРЭА-Российский технологический университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (m.polismakova[at]mail.ru)

Аннотация

Разработан прибор для использования в лабораторной практике различных отраслей промышленности с целью контроля содержания магнитоактивных частиц в текучей среде. В устройство прибора входит исполнительный магнитный сепаратор, обеспечивающий не менее трех пошагово осуществляемых операций сепарации пробы среды посредством проникающих в поток этой среды последовательно расположенных источников равноценного магнитного воздействия, каждый из которых состоит из неферромагнитного гнезда и периодически помещаемого в это гнездо магнитного блока. Под каждым из гнезд, где осуществляется самопроизвольный сброс частиц, выделенных из потока среды магнитным осаждением их на внешней поверхности гнезд и перемещаемых к начальному участку гнезда при периодическом выведении из него магнитного блока, расположены весы с тензодатчиками, сигналы от которых поступают в системный блок цифровизации контроля содержания магнитоактивных частиц, обладающий функциями визуализации получаемой зависимости операционных масс выделяемых частиц.

Ключевые слова: магнитоактивные частицы, контроль содержания в текучих средах, магнитное выделение, магнитное осаждение, магнитный сепаратор, цифровизация контроля содержания магнитоактивных частиц.

INSTRUMENT FOR MONITORING CONTENT OF MAGNETOACTIVE PARTICLES IN FLUID MEDIUM ON BASIS OF OPERATIONAL MASSES OF THE EMITTED PARTICLES PRODUCTION

Research article

Sandulyak A.A.¹, Kiselev D.O.², Sandulyak D.A.³, Polismakova M.N.^{4,*}, Kochurov K.A.⁵,
Krasil'nikov E.A.⁶, Harin A.S.⁷

¹ ORCID: 0000-0002-5111-6092;

³ ORCID: 0000-0003-4269-6133;

⁴ ORCID: 0000-0002-4564-6206;

⁶ ORCID: 0000-0001-9278-5340;

⁷ ORCID: 0000-0002-0922-1366;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

* Correspondent author (m.polismakova[at]mail.ru)

Abstract

An instrument has been developed for use in laboratory practice of various industries for the purpose of monitoring the magnetoactive particles content in a fluid medium. The device comprises an operative magnetic cobbing machiner which provides for at least three step-by-step separate operations of the medium by means of sequentially arranged sources of equal magnetic action penetrating the flow of the medium, each of which consists of a nonmagnetic socket and a magnetic block periodically placed in the pole piece. Under each of the sockets, where spontaneous discharge of particles separates from the medium flux by magnetic coating on the outer surface of the sockets and transports to the initial section of the socket at the periodic removal of a magnetic block, there are scales with tension gauges, signals of which are transferred to the system digitization unit for the control of the magnetoactive particle content, which has the functions of visualizing the resulting dependency of the operational masses of the emitted particles.

Keywords: magnetic particles, monitoring content of content in fluid medium, magnetic removal, magnetic coating, magnetic cobbing machine, digitization unit for the control of the magnetoactive particle content.

Введение

Разработка промышленного образца прибора, предназначенного для оперативного контроля содержания в текучих (в частности, сыпучих: гранулированных, зернистых, порошковых) средах магнитоактивных частиц является актуальной задачей для различных производств – пищевых, керамических, горнообогатительных, химических, литейных и других. Благодаря объективному контролю содержания таких частиц, повышается результативность последующего решения задачи магнитной сепарации контролируемой среды, что крайне важно для получения полезного и безопасного продукта, повышения качества сырья и рабочих агентов.

Принципиальным требованием к измерительным приборам такого назначения, основанным на принципе магнитного выделения магнитоактивных частиц, является обеспечение достоверных результатов и работоспособности прибора при осуществлении контроля проб разных сред – с разным содержанием этих частиц, что следует из анализа существующих приборов и разработок, приведенных в работах [1], [2], [4], [5]. Учитывая, что массовая доля таких частиц в исследуемых пробах может различаться в пределах до нескольких порядков, дизайн корпуса прибора должен

предоставлять возможность пользователю, визуально отслеживать интенсивность накопления улавливаемых частиц. Что позволит предотвратить искажение результатов контроля и выход прибора из строя или, если корпус прибора выполнен сборно-разборным, необходимости затратного во времени восстановления его работоспособности, в том случае, когда при повышенном содержании магнитоактивных частиц в пробе исследуемой среды, происходит стремительное накопление осаждающихся частиц.

Результаты разработки

Разработанный прибор для контроля магнитоактивных частиц лишен отмеченных описанных выше недостатков. На рис. 1 представлена фотоиллюстрация прибора.



Рис. 1 – Фотоиллюстрация прибора для опытно-цифрового контроля магнитоактивных частиц в текучей среде

Прибор удовлетворяет принципиально важному требованию к измерительным приборам такого назначения, а именно к приборам для контроля содержания магнитоактивных частиц в текучей среде, основанным на принципе магнитного выделения при помощи блоков магнитного воздействия на пробу среды (многозонным, с возможностью определения масс магнитоактивных частиц, принудительно осаждаемых в каждой из зон магнитного выделения). Использование прибора позволяет обеспечивать его бесперебойную работоспособность при осуществлении контроля проб разных сред – с разным содержанием магнитоактивных частиц (как со сравнительно низким, так и высоким их содержанием в пробе).

Так, пользователь прибора, благодаря целенаправленному исполнению корпуса из прозрачного материала (см. рис. 1), в частности, оргстекла, располагает текущей информацией о фактическом накоплении частиц, т.е. в режиме реального времени может наблюдать и оперативно регулировать накопление магнитоактивных частиц в каждой из зон их магнитного выделения в этом приборе. Даже в случае повышенного (разумеется, заранее неизвестного) содержания этих частиц в пробе контролируемой среды, когда осаждающиеся частицы стремительно накапливаются, пользователь прибора, имея возможность визуальной оценки, своевременно принимает соответствующее решение, например, о сокращении объема пробы, тем самым исключая саму возможность перенасыщения зон магнитного выделения, переброс накоплений с одной зоны в другую. А значит, исключается искажение результатов контроля и получение недостоверных измерений, не нарушается работоспособность прибора (демонтаж-монтаж корпуса и других элементов не требуется). В случае же заниженного содержания магнитоактивных частиц в пробе контролируемой среды, когда осаждающиеся частицы накапливаются медленно, пользователь прибора своевременно принимает соответствующее решение, например, об увеличении объема пробы, создавая тем самым более благоприятные условия для получения итоговых результатов контроля.

Следовательно, благодаря исполнению корпуса из прозрачного материала, пользователь прибора имеет возможность оптимизировать процесс контроля. К тому же, корпус прибора (сборно-разборный, снабженный бункерами загрузки и выгрузки пробы среды) содержит необходимые технологические гнезда – для размещения в каждой из зон магнитного выделения блоков магнитного воздействия и датчиков соответствующих цифровых устройств передачи данных на микроконтроллер и монитор компьютера [6].

На рис. 2 показан общий вид с разрезом варианта разрабатываемого прибора для осуществления опытно-цифрового анализа содержания магнитоактивных частиц в сыпучей среде.

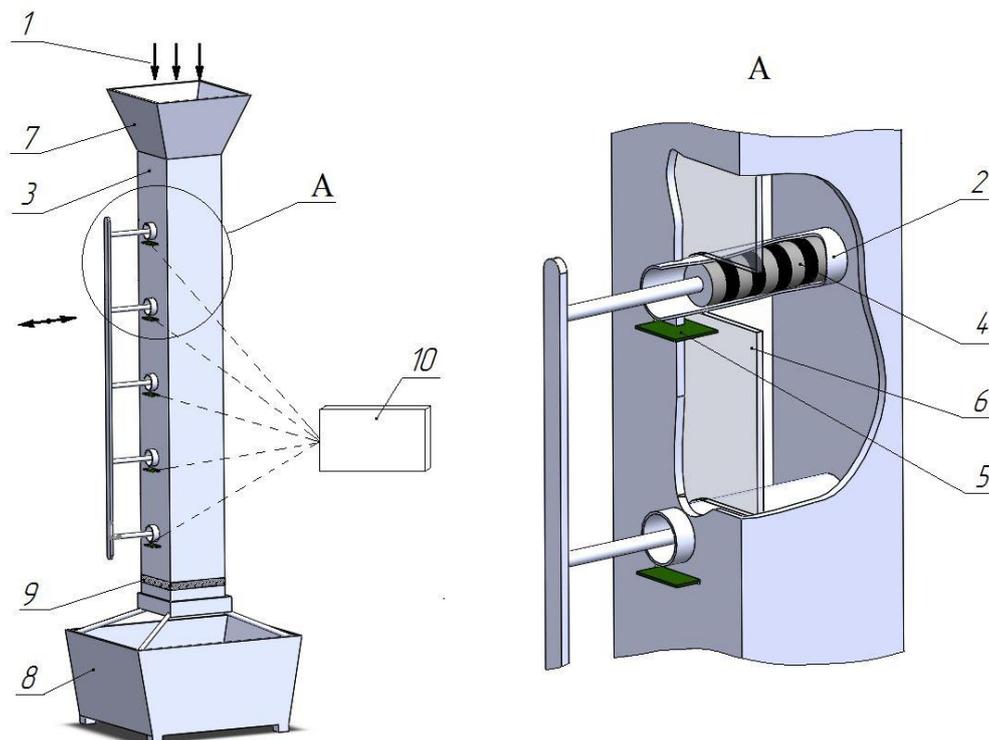


Рис. 2 – Схема прибора для опытно-цифрового контроля магнитоактивных частиц

Он содержит магнитный сепаратор, обеспечивающий пять последовательных операций сепарации контрольной пробы из исследуемой среды 1 путем проникания в поток этой сепарируемой пробы, пяти источников, равнозначных по магнитному воздействию. Каждый из этих источников магнитного воздействия представляет собой магнитный блок 4, состоящий из системы постоянных магнитов (как и другие четыре магнитных блока), которые периодически помещаются в заглушенное в концевой части, неферромагнитное гнездо 2, закрепленное в вертикальной поверхности рабочего канала 3. Под каждым из этих гнезд 2, в месте, где происходит самопроизвольный сброс уловленных частиц, осевших на внешней поверхности гнезд 2, периодически перемещаемых к участку для выведения магнитного блока 4 из гнезда 2, установлены весы 5, выполненные, как проградуированные тензодатчики. Для защиты весов 5, от потока сепарируемой пробы среды 1 предусмотрена неферромагнитная защитная перегородка 6. Для подачи контрольной пробы среды 1 в магнитный сепаратор служит питательный бункер 7, а для её отвода после сепарации приемная емкость 8, для удобства регулирования расхода предусмотрено средство шибера типа 9. Обработка сигналов, поступающих от всех 5 весов с тензодатчиками, поступает на системный блок 10, где происходит цифровизация анализа содержания выделяемых магнитоактивных частиц. Цифровизация процесса анализа, позволяющая получать зависимости операционных масс магнитоактивных частиц, выделяемых из потока среды, с возможностью дальнейшей экстраполяции этой зависимости, интеграции фактических и экстраполяционных данных операционных масс выделяемых частиц.

Проба исследуемой среды 1, подается в прибор через питательный бункер 7, проходя по рабочему каналу 3, подвергается последовательным операциям сепарации пробы за счет магнитного воздействия, осуществляемого магнитными блоками 4, помещенными в неферромагнитные гнезда 2, для объективности и в последующем получении необходимой зависимости, вместо минимальных 3-х операций, предусмотрено 5. Магнитоактивные частицы, присутствующие в исследуемой среде 1, подвергаются воздействию магнитного поля и осаждаются на внешних поверхностях гнезд 2, с закономерным уменьшением массы уловленных магнитоактивных частиц на каждом последующем гнезде 2 по мере прохождения пробы исследуемой среды 1 вниз по рабочему каналу 3. После пропускания нужного количества исследуемой пробы 1 через магнитный сепаратор осуществляется вывод магнитных блоков 4 из гнезд 2, путем перемещения магнитных блоков 4, а с ним и выделенных из потока среды 1 магнитоактивных частиц, осевших на внешней поверхности гнезд 2, с последующим их самопроизвольным сбросом на весы 5 с тензодатчиками. После полного вывода магнитного блока 4 за пределы гнезда 2, магнитное воздействие на уловленные магнитоактивные частицы исчезает. Сигналы от всех весов с тензодатчиками 5 поступают на цифровую обработку в системный блок 10, где происходит цифровизация анализа содержания магнитоактивных частиц в изучаемой пробе среды, в котором осуществляется визуализация получаемой зависимости операционных, выделенных из потока среды масс частиц, экстраполяция этой зависимости, интеграция фактических и экстраполяционных данных операционных масс выделяемых частиц – с получением соответствующей информации оператором [7].

В связи с существующей потребностью цифровизации магнитного контроля, описанного в патенте [8], предложена программа ЭВМ [9]. Ее суть заключается в обработке данных (масс навесок), полученных при проведении такого контрольного числа операций выделения магнитоактивных частиц из пробы, которое позволяет установить функциональный вид зависимости убывания масс навесок.

Получаемая зависимость – это экспоненциальная функция типа $m = a \cdot \exp(-k \cdot n)$ с опытно-расчетными параметрами a и k . Будучи дискретной, такая функция представляет собой убывающую геометрическую прогрессию, а это дает возможность определения полной (соответствует неограниченному числу операций) массы магнитоактивных примесей в пробе: как фактически выделенных, так и остаточных, используя полученную в [10] расчетную формулу:

$$\sum m = \frac{a}{e^k - 1} \quad (1)$$

Ниже приводится принтскрин результатов работы программы (рис.3).

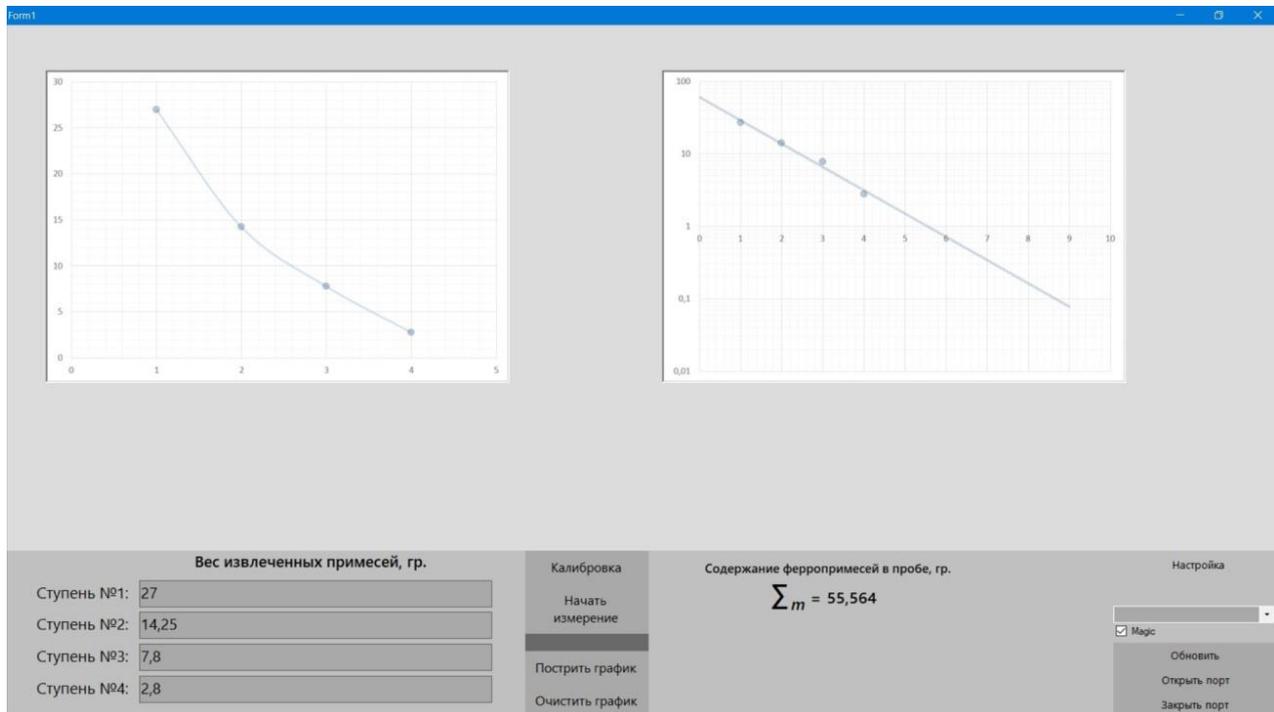


Рис. 3 – Фрагмент работы программы ЭВМ

В верхнем левом углу приводится зависимость убывания масс навесок, в правом верхнем углу – обработка в полулогарифмических координатах с получением экспоненциальной зависимости. В правом нижнем углу приводится итоговый результат расчета [9]. По полученной массе магнитоактивных примесей в пробе $\sum m$, учитывая объем пробы, находится содержание (концентрация) в ней этих примесей.

Заключение

Благодаря объективному контролю содержания магнитоактивных частиц с помощью разработанного прибора, повышается результативность последующего решения задачи магнитной сепарации контролируемой среды, что крайне важно для получения полезного и безопасного продукта, повышения качества сырья и рабочих агентов различных производств – пищевых, керамических, горнообогатительных, химических, литейных и других.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания в сфере науки – проект № 0706-2020-0024.

Funding

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Task in the field of science - project No. 0706-2020-0024.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Patent US 4492921. Method of Determining the Quantity of Solid Fraction of Ferromagnetic Matter in a Fluid / Sandulyak A.V., Garaschenko V.I., Korkhov O.J.
2. Патент РФ 2231394. Магнитный сепаратор-анализатор / Звегинцев А.Г., Килин В.И.
3. Патент РФ 2197529. Устройство для определения содержания металломагнитных примесей в пищевых или кормовых сыпучих продуктах / Самбурский А.И., Перминова З.А., Пучкова Н.А. и др.
4. ГОСТ 20239-74. Мука, крупа и отруби. Метод определения металломагнитной примеси.
5. Патент РФ 2486012. Способ извлечения железосодержащих компонентов из техногенного материала тонкого класса / Прохоров К.В., Александрова Т.Н., Богомяков Р.В.
6. Патент на промышленный образец RU №127016. Прибор для контроля магнитоактивных частиц в текучей среде. / Д. А. Сандуляк, Д. О. Киселев, А. А. Сандуляк и др.

7. Патент RU № 2752578. Устройство для опытно-цифрового анализа содержания в текучей среде магнитно-восприимчивых частиц. / Д. А. Сандуляк, А. А. Сандуляк, Д. О. Киселев и др.

8. Патент RU 2409425. Способ определения концентрации магнитовосприимчивых примесей в текучей среде. / А. В. Сандуляк, М. Н. Пугачева, А. А. Сандуляк и др.

9. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ №2020665261. Программа ЭВМ для цифровой обработки операционных масс магнитно-восприимчивых частиц, выделяемых из текучей среды. / Д. А. Сандуляк, Д. О. Киселев, А. А. Сандуляк и др.

10. Функциональная экстраполяция массово-операционной характеристики магнитофореза как основа прецизионного метода контроля феррочастиц / А. А. Сандуляк, М. Н. Полисмакова, Д. В. Ершов и др. // Измерительная техника. – 2010. – №8. – С. 57 – 60.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Patent US 4492921. Method of Determining the Quantity of Solid Fraction of Ferromagnetic Matter in a Fluid / A. V. Sandulyak, V. I. Garaschenko, O. J. Korkhov.

2. Patent RU 2231394. Magnitnyy separator-analizator [Magnetic separator-analyzer] / A. G. Zvegintsev, V. I. Kilin. [in Russian]

3. Patent RU 2197529. Ustroystvo dlya opredeleniya sodержaniya metallomagnitnykh primesey v pishchevykh ili kormovykh sypuchikh produktakh [A device for determining the content of metallomagnetic impurities in food or feed bulk products] / A. I. Sambursky, Z. A. Perminova, N. A. Puchkova et al. [in Russian]

4. GOST 20239-74. Muka, krupa i otrubi. Metod opredeleniya metallomagnitnoy primesi [Flour, cereals and bran. Method of determination of a metallomagnetic impurity.]. [in Russian]

5. Patent RU 2486012. Sposob izvlecheniya zhelezosoderzhashchikh komponentov iz tekhnogenogo materiala tonkogo klassa [Method of extraction of iron-containing components from technogenic material of a thin class] / K. V. Prokhorov, T. N. Alexandrova, R. V. Bogomyakov. [in Russian]

6. Patent for industrial design RU No. 127016. Pribor dlya kontrolya magnitoaktivnykh chastits v tekuchey srede [A device for monitoring magnetically active particles in a fluid medium] / D. A. Sandulyak, D. O. Kiselev, A. A. Sandulyak et al. [in Russian]

7. Patent RU No. 2752578. Ustroystvo dlya opytно-tsifrovogo analiza sodержaniya v tekuchey srede magnitno-vospriimchivykh chastits [A device for experimental digital analysis of the content of magnetically susceptible particles in a fluid medium] / D. A. Sandulyak, A. A. Sandulyak, D. O. Kiselev et al. [in Russian]

8. Patent RU 2409425. Sposob opredeleniya kontsentratsii magnitovospriimchivykh primesey v tekuchey srede [A method for determining the concentration of magnetically susceptible impurities in a fluid medium] / A. V. Sandulyak, M. N. Pugacheva, A. A. Sandulyak et al. [in Russian]

9. Svidetelstvo o registratsii programmy EVM №2020665261. Programma EVM dlya tsifrovoy obrabotki operatsionnykh mass magnitno-vospriimchivykh chastits, vydelyayemykh iz tekuchey srede [Certificate of registration of the computer program No. 2020665261. A computer program for digital processing of operating masses of magnetically susceptible particles released from a fluid medium] / D. A. Sandulyak, D. O. Kiselev, A. A. Sandulyak et al. [in Russian]

10. Funktsionalnaya ekstrapolyatsiya massovo-operatsionnoy kharakteristiki magnitoforeza kak osnova pretsizionnogo metoda kontrolya ferrochastits [Functional extrapolation of the mass-operational characteristics of magnetophoresis as the basis of the precision method of ferroparticle control] / A.A. Sandulyak, M.N. Polismakova, D.V. Ershov et al. // Izmeritelnaya tekhnika [Measuring technique]. – 2010. – No. 8. – pp. 57-60. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.058>**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ И ПРЕССОВАНИЯ МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛЬНОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ**

Научная статья

Симонян В.А.*

Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

* Корреспондирующий автор (vigensimonyan2017[at]gmail.com)

Аннотация

В данной статье приводится исследование процесса спекания и прессования мартенситно-стареющей стальной порошковой смеси 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe. Материалами исследования выступают порошковые металломатрические композиционные материалы систем 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe и их физико-механические свойства. Методы исследования: определение физико-механических свойств материалов (прочность на изгиб, жесткость), триботехнические испытания в условиях трения без смазочного материала на воздухе. Была осуществлена задача по решению важной научно-технической задачи получения металломатричных композитов на основе систем F18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe с повышенными физико-механическими характеристиками в условиях искроплазменного спекания за счет воздействия на фазо- и структурообразование в материале вводимой мощности спекания, скорости нагрева и времени выдержки. Установлено, что увеличение вводимой мощности при консолидации шихты системы 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe с 1,3 кДж/с до 4 кДж/с за счет изменения гармоничного состава тока позволяет интенсифицировать процессы ионной диффузии и переноса жидкого металла и повысить плотность консолидированных образцов ~80 % до 98 %, жесткость с ~20 HRC до ~50 HRC, уменьшить потерю веса при абразивном износе с 30 % массы до 7 %. Предлагаемый режим искроплазменного спекания позволяет снизить время уплотнения на 20 с и получить средний размер зерна в железной матрице ~2,4 мкм и ~1,5 мкм в соответствии с составом смеси.

Ключевые слова: мартенситно-стареющие стальные порошковые смеси, искроплазменное спекание, физико-механические характеристики.

RESEARCH OF MARAGING STEELS POWDER BLEND FUSING AND COMPRESSION

Research article

Simonyan V.A.*

National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia

* Correspondent author (vigensimonyan2017[at]gmail.com)

Abstract

The article provides research of maraging steels powder blend fusing and compression 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe. Powder metallometric composition materials of 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe system and their physical and mechanical properties serve as research subject. Research methods: materials' physical and mechanical properties determination (bending strength, hardness), tribotechnical tests under friction while outside and without greasing substance. The research carries out the important task of extracting metallometric composition materials of 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe system with enhanced physical and mechanical properties while spark plasmic fusing through phase- and structure formation pressure, heating rate and soak period. It was established that increasing 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe system furnace charge capacity from 1.3 to 4 kJ through balanced current composition change allows to intensify ion diffusion process and liquid metal shift, to enhance consolidated samples density from ~80% to 98%, their hardness from ~20 HRC to ~50 HRC, and to reduce abrasive deterioration weight loss from 30% to 7%. The supposed spark plasmic fusing mode allows to reduce vebe time for 20 s. and get medium particle size in iron-clad matrix of ~2.4 and ~1.5 μm in accordance with mixture components.

Keywords: maraging steels, steel powder blend. spark plasmic fusing, physical and mechanical properties.

Введение

Одним из ключевых направлений современного материаловедения является создание и совершенствование существующих методов получения новых стальных порошковых смесей с высокими функциональными и физико-механическими свойствами. Актуальность этого направления исследований с каждым годом повышается в связи с дефицитом сырья для синтеза основных легирующих элементов для износостойких материалов (вольфрам, молибден, кобальт и др.), а также отсутствием в Российской Федерации разрабатывающих месторождений этих стратегических материалов и их высокой стоимости на внешнем рынке [1].

Анализ работ показал, что использование металломатричных композиционных материалов на основе железа (класса карбидосталей) с равномерно распределенными тугоплавкими частицами ультрадисперсного диапазона позволяет получить материалы с высокими функциональными свойствам. При этом их себестоимость в разы меньше себестоимости материалов на основе высоколегированных сталей.

Для сохранения ультрадисперсных структур в металломатричных композитах стальных порошковых смесей все шире используются технологические процессы спекания материалов электрическим током высокой плотности. Они позволяют обеспечить высокие скорости нагревания, уменьшить время выдержки при максимальной температуре и получать компакты с большей относительной плотностью и более тонкой структурой, чем при использовании традиционных методов консолидации, таких как горячее и изостатическое прессование. К таким методам воздействия относится метод искроплазменного спекания, который позволяет получить материалы высокой плотности за короткий промежуток времени и при незначительном (до 60 МПа) механическом давлении [2]. Значительный вклад в поиск путей

и принципов создания стальных порошковых смесей с повышенными функциональными свойствами внесли отечественные и зарубежные ученые: Г.А. Скороход, М.С. Ковальченко, М.Б. Штерн, О.И. Райченко, В.В. Баглюк, В.А. Маслюк, А.В. Рогуля, О.П. Уманский, Г.Г. Сердюк, В.Д. Рудь, А.Л. Максименко, Ю.Г. Гуревич, И.Д. Быков, В.А. Потапенко, В.С. Полищук, С.С. Кипарисов, Е.Г. Григорьев, Б.А. Калинин, М. Tokita, D.Y Kim, A.C.F Cocks и J Ma. [1] Жарченкова М.И., Перфилов С.А. и Бланк В.Д. изучили влияние углерода на физико-механические свойства композиционного материала на основе вольфрама с мартенситно-старееющей связкой и показали, что в результате применения метода электроискрового спекания удастся минимизировать рост зерен вольфрама, размер которых после спекания остаётся на уровне 1–3 мкм, что приводит к росту прочности, пластичности, твердости композитного материала [1]. В научной статье Жукебаевой Т. Ж., Ахмедия К.А., Жолдангарова Е. М. исследована возможность использования сложных ферросплавов в порошковой металлургии и показано, что сложные ферросплавы можно измельчать, легко фракционировать и хорошо смешивать с порошком железа и углеродсодержащими компонентами [2]. Доказана мысль о том, что конструкционная порошковая сталь подходит для изделий, которые работают в условиях низкой и средней нагрузки. Российскими учеными приведены результаты исследования структуры и свойств наплавленного металла типа мартенситно-старееющей стали системы легирования Fe-Ni-Mo-Cr-V-Si-Ti-Al, упрочненной соединениями бора [3]. Показано, что такой металл имеет высокую теплостойкость, что позволяет рекомендовать его для наплавки рабочих поверхностей штампового инструмента. Ряд иностранных ученых исследовали и показали эффективность применения в качестве связки металлы восьмой группы (Fe, Co, Ni) [11], [12]. Однако все еще остается актуальной тематика исследования процессов спекания и прессования мартенситно-старееющих стальных порошковых смесей с повышенным комплексом характеристик, при этом в имеющейся литературе недостаточно данных, которые позволили бы управлять процессом создания ММК систем 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe. в условиях искроплазменного спекания. Поэтому востребованным предметом исследования являются стальные порошковые смеси 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe. с высокими физико-механическими свойствами за счет управления процессами фазо- и структурообразование в материале в условиях искроплазменного спекания.

Цель статьи - исследование процесса искроплазменного спекания и прессования мартенситно-старееющей стальной порошковой смеси с составом 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe.

Материал и методика

Материалами исследования выступают порошковые металлматрические композиционные материалы систем 18%Ni+9%Co+5%Mo+1%Ti+1%Re+66%Fe и их физико-механические свойства. Методы исследования: определение физико-механических свойств материалов (прочность на изгиб, жесткость), триботехнические испытание в условиях трения без смазочного материала на воздухе.

Полученные результаты

Современные мартенситно-старееющие стали практически безуглеродны (0,03% C), их основными системами легирования является Fe-Ni, Fe-Ni-Co, дополнительно легированные Ti, Be, Al, Nb, W, Mo (например, H18K9M5T, H10X11M2T, H18K14M5T).

Мартенситно-старееющие стали имеют высокий комплекс свойств прочности и пластичности, хорошие тепло- и холодностойкость, соразмерную стабильность при термической обработке [3].

Легированный элемент существенно влияют на температуру начала мартенситного преобразования Mn (рис.1). Элементы, снижающие температуру мартенситного преобразования (Mo, Cr и др.) способствуют увеличению количества аустенита остаточного после закалки, а Al и Co, наоборот, уменьшают его количество. Влияние Co на увеличение количества аустенита остаточного в закаленных высоколегированных быстрорежущих сталях объясняется изменением растворимости в аустените других легированных. Углерод и азот сильно снижают мартенситную точку [4].

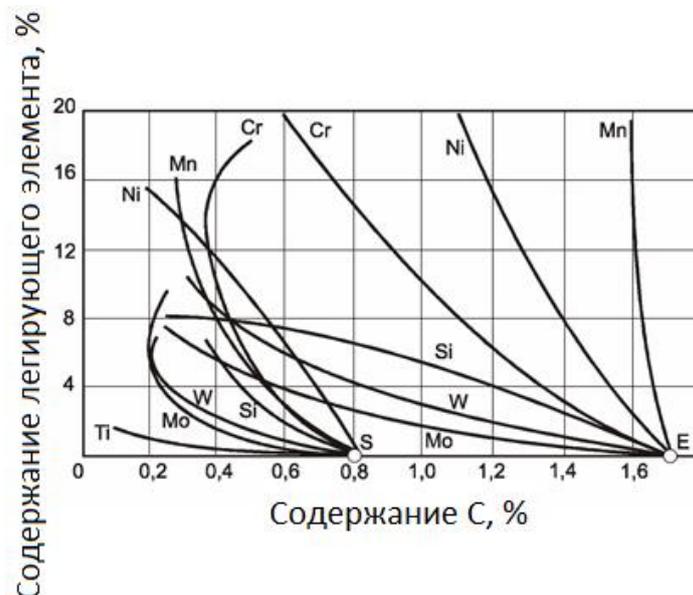


Рис. 1 – Влияние легирующих элементов на температуру начала мартенситного превращения Mn стали в системе железо-углерод

Кинетика превращений аустенита, то есть вид диаграммы преобразования, зависит от многих факторов и прежде всего от химического состава аустенита [5]. Легирования Со увеличивает эффект старения. Значительное количество Ni ведет к резкому снижению температуры начала мартенситного превращения. Такой почти безуглеродной мартенсит имеет невысокую прочность (1000МПа) и высокую пластичность (d 20%, y 80%), малую способность к укреплению при холодной деформации (сталь с такой структурой можно подвергать пластической деформации, обработке резанием и другим технологическим операциям).

Конечные свойства формируются при дальнейшем старении при добавлении Ti и Al, меньше - Со и Мо. В экономнолегированных мартенситно-стареющих сталях с повышенным содержанием углерода 0,1% С используется также карбидное укрепление.

Мартенсито-стареющие стали имеют высокие показатели механических свойств после термообработки: $S_v = 1900 \dots 2100$ МПа, $S_{0,2} = 1800 \dots 2000$ МПа, $d = 8..15\%$, $y = 40 \dots 60\%$, $KCU = 0,4 \dots 0,6$ МДж / м² [6]. Важным преимуществом сплавов этого класса является высокая технологичность (неограниченное закалывание, хорошая свариваемость, высокая деформируемость после закалки, при термической обработке практически не происходит коробления и исключено обезуглероживание).

В таком состоянии стали могут подвергаться пластической деформации и обработке резанием. Основное укрепление связано с введением мелкодисперсных интерметаллических фаз (Ni_3 , $NiTi$, Fe_2Mo , $Ni_3(Ti, Al)$), которые располагаются вокруг дислокаций и блокируют их движение. В результате резко возрастает прочность и твердость [7].

Кроме основных вышеуказанных групп конструкционных сталей существуют и некоторые другие, например: стали для холодной штамповки (08Ю, 12ХМ), рельсовые стали (М76, 75МС), высокопрочные стали, которые имеют S_v 1600 МПа (40ХГСНЗВА, 40Х5М2СФ). Самые известные марки: 03Н18К9М5Т, 04Х11Н9М2Д2ТЮ.

Спекание под высоким давлением (от 1 до 8 ГПа) является одним из наиболее проверенных методов консолидации ультрадисперсных стальных порошковых смесей [8]. Спекание под высоким давлением объединяет невысокие температуры и высокое давление и позволяет максимально уплотнять частицы за минимальное время при минимальном росте зерен. Дополнительную возможность сохранить зерно мелким дают фазовые превращения, стимулированные давлением. В настоящее время серьезное внимание уделяют методам спекания под высоким давлением консолидации с химическим превращением и организуют процесс таким образом, чтобы ультрадисперсная фаза формировалась в результате превращения. В этом случае удается приблизиться к однородному распределению фаз по объему, чего невозможно добиться механическим смешением разных ультрачастиц.

Развитие новых технологий сопровождается растущим с каждым годом дефицитом сырья для синтеза основных легирующих элементов износостойких материалов (вольфрам, молибден, кобальт и др.), а также отсутствием в Российской Федерации разрабатывающих месторождений этих стратегических материалов и их высокая стоимость на внешнем рынке делают крайне актуальной задачей создание новых стальных порошковых смесей с высокими функциональными и физико-механическими свойствами [9]. Решить эту проблему можно путем разработки и продвижения на рынок новых технологических подходов для получения более дешевых стальных порошковых смесей с повышенными прочностными прочностью и износостойкостными характеристиками [10]. Такие составы дают стальным порошковым смесям уникальное сочетание свойств: высокие значения удельной жесткости, вязкости разрушения, электро- и теплопроводности, износостойкости и тому подобное [5], [6], [7], [8].

Выбор состава стальных порошковых смесей зависит от условий их применения, они могут быть армированы волокнами, слоистые и дисперсноукрепленные. С учетом размеров и распределения укрепляющей фазы или армирующих компонентов в каждом классе можно выделить подклассы [9], [10]:

- наноструктурированные: размер частиц, толщина волокон или слоев менее 100 нм;
- субмикроструктурированные: размер компонентов менее 1 мкм;
- микроструктурированные: размер компонентов порядка 1 мкм;
- макроструктурированные: макроскопические размеры компонентов порядка одного миллиметра.

Для получения материалов с высокой износостойкостью используют дисперсно-укрепленные стальные порошковые смеси, в которых матрица является основным элементом, несущим нагрузку, а дисперсные частицы тормозят в ней движение дислокации. Использование в роли укрепляющей фазы карбида кремния (AK9 + 4% SiC, A99 + 10% Ti + 5% SiC) позволяет увеличить износостойкость алюмоматричных композитов на 16 – 25 % относительно антифрикционных сплавов АОМ 20-1 (20% Sn, 1% Cu) [12], [13], [19], [20].

Наиболее эффективными для укрепления бериллия являются оксид BeO и карбид Be_2C . Временное сопротивление стальных порошковых смесей Be – BeO повышается с увеличением содержания оксида, при этом эффективность укрепления растет с повышением температуры [9].

В настоящее время активно проводятся работы по созданию новых технологий получения высокоизносостойких дисперсно-упрочненных материалов и изделий, особенность которых заключается в использовании ультрадисперсных компонентов [4], [5]. Из литературных источников известно, что стальные порошковые смеси класса карбидосталей на основе железа Fe–Ti–C и Fe–Ti–C–B с равномерно распределенными твердыми фазами TiC, Ti₂B и FeB [6] обладают высокими показателями износостойкости, прочности и твердости, при этом их себестоимость в разы меньше вольфрасодержащих материалов и быстрорежущих сталей.

Однако, для получения ультрадисперсных стальных порошковых смесей этих систем необходимо решать следующие задачи: синтез частиц необходимого размера, используя доступные технологии, и разработать методы консолидации, позволяющие получить материалы высокой относительной плотности с однородной структурой и обеспечить сохранность наноструктурных элементов в диапазоне действия размерного эффекта [4].

Ключевой стадией получения дисперсно-упрочненных стальных порошковых смесей является процесс консолидации. В связи с необходимостью сохранения ультрадисперсных компонентов в составе материала для консолидации используют или традиционные методы консолидации порошков, такие как, спекание под высоким давлением, горячее прессование, динамическое прессование, инжекционное формование в изотермических условиях в

режиме быстрой консолидации, или новейшие, сверхбыстрые методы получения ультраструктурированных стальных порошковых смесей с помощью электрического тока, отличающиеся высокими скоростями нагрева и малым временем выдержки, позволяющие получить материалы с относительной плотностью выше 95% с сохранением ультрадиапазона укрепляющих частиц [9].

Была осуществлена задача по решению важной научно-технической задачи получения металломатричных композитов на основе систем $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$ с повышенными физико-механическими характеристиками в условиях искроплазменного спекания за счет воздействия на фазо- и структурообразование в материале вводимой мощности спекания, скорости нагрева и времени выдержки. На рисунке 2 представлены кривые изменения силы тока со скоростью нарастания 16 А/с и 23 А/с, что позволило обеспечить для смеси $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$ скорости нагрева $10\text{ }^{\circ}C/c$ и $15\text{ }^{\circ}C/c$ соответственно.

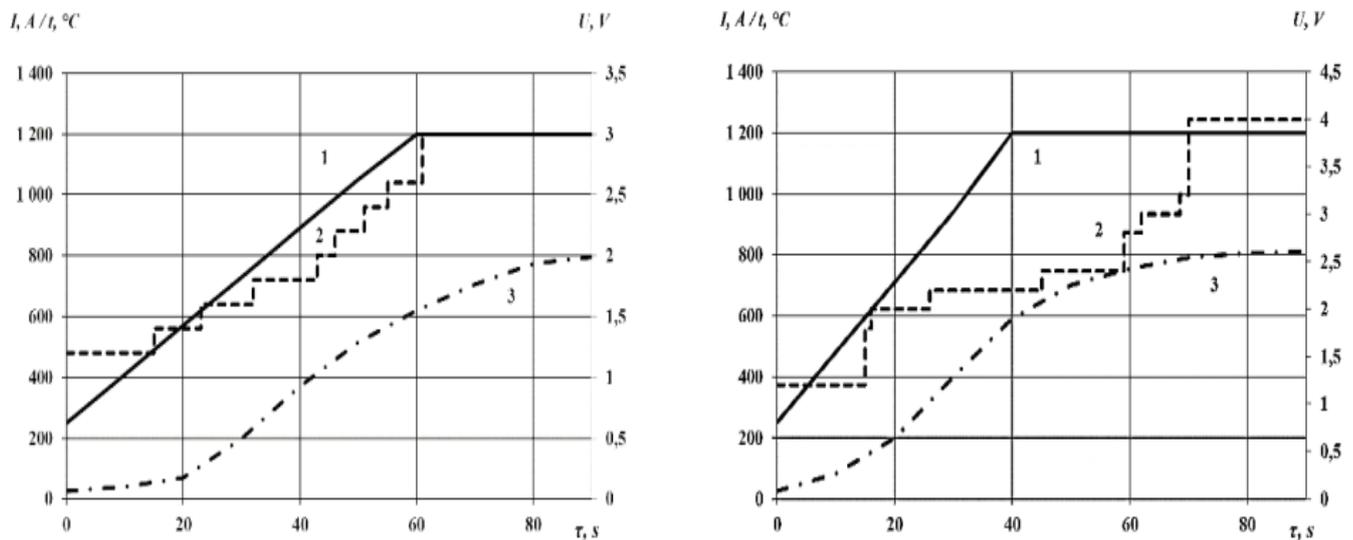


Рис. 2 – Экспериментальные кривые изменения:

(1) силы тока, (2) напряжения; (3) температуры во времени в течение искроплазменного спекания смеси $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$. при разных скоростях нагрева

Показано, что изменение скорости нагрева с $10\text{ }^{\circ}C/c$ до $20\text{ }^{\circ}C/c$ было применено для искроплазменного спекания смесей состава $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$. Выбранные скорости нагрева были обеспечены за счет скорости нарастания тока, которая для шихты $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$ находилась в диапазоне от 16 А/с до 27,5 А/с. При этом на протяжении процесса нарастания тока напряжение увеличилось с 1,2 В до 3 В для режима нагрева со скоростью $10\text{ }^{\circ}C/c$ и с 1,2 В до 4 В - для режима с $15\text{ }^{\circ}C/c$. а а – $10\text{ }^{\circ}C/c$; б – $15\text{ }^{\circ}C/c$.

Также экспериментально установлено, что увеличение скорости нагрева с $10\text{ }^{\circ}C/c$ до $20\text{ }^{\circ}C/c$ влияет на протекание диффузных процессов в системах Fe–Ti–C и Fe–Ti–C–B во время ИПС, замедляя их, что приводит к образованию неоднородности распределения укрепляющей фазы по объему полученного материала и к падению твердости образцов, полученных из шихты состава № III с 49 HRC до 30 HRC (при увеличении износостойкости).

Использование шихты состава № III4 способствует увеличению твердости с 48 HRC до 60 HRC и износостойкости в 7 раз по сравнению со сталью P₆M₅ при ИПС консолидации в режиме со скоростью нагрева $20\text{ }^{\circ}C/c$ с изотермической выдержкой $1100\text{ }^{\circ}C$ на протяжении 180 с, что связано с активизацией процессов карбидо- и боридообразования.

Показано, что изменение гармоничного состава тока позволяет интенсифицировать процессы ионной диффузии и переноса жидкого металла и повысить плотность консолидированных образцов ~80 % до 98 %, жесткость с ~20 HRC до ~50 HRC, уменьшить потерю веса при абразивном износе с 30 % массы до 7 %.

Также теоретически обоснованно и экспериментально установлено, что увеличение скорости нагрева при искроплазменном спекании шихты систем $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$ с $10\text{ }^{\circ}C/c$ до $20\text{ }^{\circ}C/c$ при введенной мощности 4 кДж/с позволяет снизить время уплотнения на 20 с и получить средний размер зерна в железной матрице ~2,4 мкм и ~1,5 мкм в соответствии с составом смеси.

Заключение

Экспериментально установлено, что при искроплазменном спекании шихты систем $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$ с введенной мощностью 4 кДж/с в режиме со скоростью нагрева $20\text{ }^{\circ}C/c$ с давлением 60 МПа и изотермической выдержкой $1100\text{ }^{\circ}C$ в течение 180 с позволяет за счет увеличения количества Ti и Fe получить стальные порошковые смеси твердостью 60 HRC и износостойкостью при абразивном износе в 7 раз выше, чем у вольфрамсодержащей стали P₆M₅. В целом, разработаны технологические приемы создания стальных порошковых смесей на основе системы $18\%Ni+9\%Co+5\%Mo+1\%Ti+1\%Re+66\%Fe$ путем искроплазменного спекания.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Жарченкова М. И. Влияние углерода на физико-механические свойства композиционного материала на основе вольфрама с мартенситно-стареющей связкой / М. И. Жарченкова, С. А. Перфилов, В. Д. Бланк // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2018. – №11. – [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-ugleroda-na-fiziko-mehaniicheskie-svoystva-kompozitsionnogo-materiala-na-osnove-volframa-s-martensitno-stareyushey> (дата обращения: 06.03.2022).
2. Жукебаева Т. Ж. использования сложных ферросплавов в порошковой металлургии / Т. Ж. Жукебаева, К. А. Ахмедия, Е. М. Жолдангаров // StudNet. – 2020. – №3. – [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-ispolzovaniya-slozhnyh-ferrosplavov-v-poroshkovoy-metallurgii> (дата обращения: 06.03.2022).
3. Лосев А. С. Исследование влияния боридов на структуру и свойства мартенситно-стареющей стали / А. С. Лосев, Е. Н. Еремин // Омский научный вестник. – 2011. – № 1. – С. 29-33.
4. Тарасенко Л. В. Влияние технологических нагревов на свойства мартенситно-стареющих сталей при изготовлении силоизмерительных упругих элементов / Л. В. Тарасенко, М. В. Унчикова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2013. – №1 (90). – [Электронный ресурс] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tehnologicheskikh-nagrevov-na-svoystva-martensitno-stareyuschih-staley-pri-izgotovlenii-siloizmeritelnyh-uprugih-elementov> (дата обращения: 06.03.2022).
5. Тарасенко Л. В. Коррозионная стойкость сварных соединений мартенситно-стареющих сталей для силоизмерительных упругих элементов / Л. В. Тарасенко, М. В. Унчикова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – №10. – [Электронный ресурс] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/korroziionnaya-stoykost-svarnyh-soedineniy-martensitno-stareyuschih-staley-dlya-siloizmeritelnyh-uprugih-elementov> (дата обращения: 06.03.2022).
6. Тарасенко Л. В. Коррозионные свойства мартенситно-стареющих сталей с различным типом упрочнения после двойного старения / Л. В. Тарасенко, М. В. Унчикова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – №3. – [Электронный ресурс] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/korroziionnye-svoystva-martensitno-stareyuschih-staley-s-razlichnym-tipom-uprochneniya-posle-dvoynogo-stareniya> (дата обращения: 06.03.2022).
7. XPS and SEM analysis of the surface of gas atomized powder precursor of ODS ferritic steels obtained through the STARS route. / E. Gil, J. Cortés, I. Iturriza et al. // Appl. Surf. Sci. – 2018. – No. 427. – pp. 182-191.
8. Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. / D. C. Kong, X. Q. Ni, C.F. Dong et al. // Mater. Des. – 2018. – No. 152. – pp. 88-101.
9. CoCrWCu alloy with antibacterial activity fabricated by selective laser melting: Densification, mechanical properties and microstructural analysis / Y. J. Lu, L. Ren, S. Q. Wu et al. // Powder Technol. – 2018. – No. 325. – pp. 289-300.
10. Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting. / M. Mazur, P. Brincat, M. Leary et al. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2017. – No. 93. – pp. 881-900.
11. Cong X. Microstructure and highly enhanced mechanical properties of fine-grained tungsten heavy alloy after one-pass rapid hot extrusion / X. Cong, J. L. Fan, F. Ding // Mater. Sci. Eng. – 2011. – No. 538. – pp. 3646-3652.
12. Caliskan N. Swaging of a liquid phase sintered 90W-7Ni-3Fe tungsten heavy alloy. / N. Caliskan, N. Durli, S. Bor // Internat. J. Refract. Metal. Hard Mater. – 2013. – No. 36. – P. 260-264. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.10.001

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zharchenkova M. I. Vliyanie ugleroda na fiziko-mehaniicheskie svoystva kompozitsionnogo materiala na osnove vol'frama s martensitno-stareyushhej svjazkoj [The influence of carbon on the physico-mechanical properties of a composite material based on tungsten with a martensitic-aging bundle] / M. I. Zharchenkova, S. A. Perfilov, V. D. Blank // Izvestiya VUZov. Himiya i himicheskaja tehnologija [Izvestiya VUZov. Chemistry and chemical technology]. – 2018. – № 11. – [Electronic resource] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-ugleroda-na-fiziko-mehaniicheskie-svoystva-kompozitsionnogo-materiala-na-osnove-volframa-s-martensitno-stareyushey> (accessed: 06.03.2022). [in Russian]
2. Zhukebaeva T. Zh. Vozmozhnost' ispol'zovaniya slozhnyh ferrosplavov v poroshkovoj metallurgii [The possibility of using complex ferroalloys in powder metallurgy] / T. Zh. Zhukebaeva, K. A. Akhmediya, E. M. Zholdangarov // StudNet. – 2020. – № 3. – [Electronic resource] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-ispolzovaniya-slozhnyh-ferrosplavov-v-poroshkovoy-metallurgii> (accessed: 06.03.2022). [in Russian]
3. Losev A. S. Issledovanie vlijaniya boridov na strukturu i svoystva martensitno-stareyushhej stali [Investigation of the effect of borides on the structure and properties of martensitic-aging steel] / A. S. Losev, E. N. Eremin // Omskij nauchnyj vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. – 2011. – № 1. – pp. 29-33. [in Russian]
4. Tarasenko L. V. Vliyanie tehnologicheskikh nagrevov na svoystva martensitno-stareyushhih staley pri izgotovlenii siloizmeritel'nyh uprugih jelementov [Influence of technological heating on the properties of martensitic-aging steels in the manufacture of force-measuring elastic elements] / L. V. Tarasenko, M. V. Unchikova // Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Seriya «Mashinostroenie» [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. The series "Mechanical Engineering"]. – 2013. – №1 (90). – [Electronic resource] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tehnologicheskikh-nagrevov-na-svoystva-martensitno-stareyuschih-staley-pri-izgotovlenii-siloizmeritelnyh-uprugih-elementov> (accessed: 06.03.2022). [in Russian]
5. Tarasenko L. V. Korroziionnaja stoykost' svarnyh soedinenij martensitno-stareyushhih staley dlja siloizmeritel'nyh uprugih jelementov [Corrosion resistance of welded joints of martensitic-aging steels for force-measuring elastic elements] / L. V. Tarasenko, M. V. Unchikova // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. Je. Baumana [Science and Education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University]. – 2012. – № 10. – [Electronic resource] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/korroziionnaya-stoykost-svarnyh-soedineniy-martensitno-stareyuschih-staley-dlya-siloizmeritelnyh-uprugih-elementov> (accessed: 06.03.2022). [in Russian]
6. Tarasenko L. V. Korroziionnye svoystva martensitno-stareyushhih staley s razlichnym tipom uprochneniya posle dvoynogo starenija [Corrosion properties of martensitic-aging steels with different types of hardening after double aging] / L. V. Tarasenko,

M. V. Unchikova // *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. Je. Baumana* [Science and Education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University]. – 2014. – № 3. – [Electronic resource] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/korrozionnye-svoystva-martensitno-stareyuschih-staley-s-razlichnym-tipom-uprochneniya-posle-dvoynogo-stareniya> (accessed: 06.03.2022). [in Russian]

7. XPS and SEM analysis of the surface of gas atomized powder precursor of ODS ferritic steels obtained through the STARS route. / E. Gil, J. Cortés, I. Iturriza et al. // *Appl. Surf. Sci.* – 2018. – No. 427. – pp. 182-191.

8. Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. / D. C. Kong, X. Q. Ni, C.F. Dong et al. // *Mater. Des.* – 2018. – No. 152. – pp. 88-101.

9. CoCrWCu alloy with antibacterial activity fabricated by selective laser melting: Densification, mechanical properties and microstructural analysis / Y. J. Lu, L. Ren, S. Q. Wu et al. // *Powder Technol.* – 2018. – No. 325. – pp. 289-300.

10. Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting. / M. Mazur, P. Brincat, M. Leary et al. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2017. – No. 93. – pp. 881-900.

11. Cong X. Microstructure and highly enhanced mechanical properties of fine-grained tungsten heavy alloy after one-pass rapid hot extrusion / X. Cong, J. L. Fan, F. Ding // *Mater. Sci. Eng.* – 2011. – No. 538. – pp. 3646-3652.

12. Caliskan N. Swaging of a liquid phase sintered 90W-7Ni-3Fe tungsten heavy alloy. / N. Caliskan, N. Durli, S. Bor // *Internat. J. Refract. Metal. Hard Mater.* – 2013. – No. 36. – P. 260-264. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.10.001.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.059>

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОТОПЛЕНИЕ ПО НОЧНОМУ ТАРИФУ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА В Г. ХАБАРОВСКЕ

Научная статья

Шумилин Е.В.^{1,*}, Псаров С.А.²

¹ ORCID: 0000-0002-3210-1469;

² ORCID: 0000-0002-4368-7848;

^{1,2} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

* Корреспондирующий автор (002194[at]pnu.edu.ru)

Аннотация

Использование электрической энергии в период ночного минимума нагрузок по пониженному тарифу позволяет существенно снизить платежи на нужды отопления. В данной работе произведен анализ потребления электрической энергии на нужды отопления эксплуатируемого индивидуального жилого дома в условиях г. Хабаровска. Впервые показано, что использование гибридной системы отопления в виде водяной системы «теплый пол» и электрических конвекторов позволяет существенно сократить платежи за электроэнергию при сохранении уровня комфорта в помещениях. Показано, что высокая инерционность системы отопления «теплый пол» позволяет в два раза уменьшить емкость баков аккумуляторов с водой. Используя предложенную авторами методику распределения затрат электроэнергии по интервалам тарифных зон суток, определена емкость баков аккумуляторов с водой, позволяющая максимально приблизиться к использованию только пониженного ночного тарифа на электроэнергию.

Ключевые слова: электроотопление, аккумулятор тепловой энергии, ночной тариф.

ELECTRIC HEATING AT NIGHT RATE OF INDIVIDUAL RESIDENTIAL BUILDING IN Khabarovsk

Research article

Shumilin E.V.^{1,*}, Psarov S.A.²

¹ ORCID: 0000-0002-3210-1469;

² ORCID: 0000-0002-4368-7848;

^{1,2} Pacific National University, Khabarovsk, Russia

* Corresponding author (002194[at]pnu.edu.ru)

Abstract

The use of electrical energy during the night minimum loads at a reduced rate allows to significantly reduce payments for heating needs. The work analyses electric energy consumption for heating needs of an exploited individual residential building in Khabarovsk. For the first time, it has been shown that the use of hybrid heating system in the form of water system «warm floor» and electrical convectors allows to significantly reduce charges for electricity while maintaining the level of comfort in the premises. It has been shown that the high response time of heating system «warm floor» allows reducing twice the capacity of storage water tanks. Using the method of electricity costs distribution by the intervals of daily rate zones, proposed by the authors, the capacity of water tanks accumulators is determined, allowing maximum approximation for usage of only a reduced night rate of electricity.

Keywords: electric heating, thermal energy storage, night rate.

Введение

В последнее время всё большее распространение получает использование электрической энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения индивидуального жилищного строительства (ИЖС). Электроэнергия, как источник теплоты в данном жилом секторе используется, когда другие варианты недоступны или экономически нецелесообразны. Так, центральным отоплением обеспечено только 86 % площадей общего жилищного фонда Российской Федерации, центральным горячим водоснабжением – 70 %, газоснабжением – 66 % [1]. В Дальневосточном Федеральном округе охват газоснабжением существенно ниже – 17 %. Остальной жилой фонд, не охваченный данными видами услуг, это преимущественно ИЖС. Охват индивидуальной жилой застройки централизованным теплоснабжением, как правило, экономически нецелесообразен из-за низкой плотности тепловых нагрузок, приводящих к высоким капитальным и эксплуатационным затратам. Газификация природным газом ИЖС, как наиболее предпочтительный вариант энергоснабжения, требует существенных инвестиций в инфраструктуру. Достижение технически возможной газификации планируется Газпромом только к 2030 году. Каковы будут сроки фактической газификации – неизвестно. Использование твердого топлива не позволяет полностью автоматизировать процессы генерации теплоты в индивидуальных теплогенерирующих установках, что снижает комфорт при проживании. Также к минусам использования твердого топлива в ИЖС можно отнести существенные затраты на транспортировку при удаленности от железнодорожной сети и ухудшение экологической обстановки при сжигании углей. Соотношение стоимости выработки теплоты при использовании жидких топлив или сжиженных углеводородных газов (СУГ) и электрической энергии зависит от региона. Если в европейской части страны электроэнергия вполне конкурирует с СУГ [2], то в условиях Дальнего Востока ситуация существенно отличается. Сравнение стоимости 1 Гкал тепловой энергии, полученной разными способами для ценовых условий г. Хабаровска, приведено в таблице 1. Цены на энергетические ресурсы, поставляемые централизованно, приняты по данным МУП г. Хабаровска «Расчётно-кассовый центр по обработке коммунальных платежей» (<http://khh-rkc.ru/tarify>) для первого полугодия 2022 года. По остальным энергетическим ресурсам приняты текущие розничные цены. Вариант использования тарифа электроэнергии для сетей с напряжением выше 0,4 кВ, как в работе [3], не рассматривался, т. к. суммарная мощность для ИЖС редко превышает 20 кВт.

Таблица 1 – Стоимость выработки тепловой энергии (по цене за ресурс) в г. Хабаровске

Источник тепловой энергии, ед. изм.	Ед. изм. ресурса	КПД преобразования у потребителя, %	Расход ресурса на 1 Гкал	Цена ресурса, руб.	Стоимость выработки 1 Гкал, руб.
Централизованное теплоснабжение от ТЭЦ	Гкал	100	1	1917,1	1917,1
Природный газ	м ³	90	136,8	7,78	1064,5
Сжиженный углеводородный газ (смесь пропан-бутана)	м ³	90	46,15	168,15	7760,6
Дизельное топливо	л	90	128,4	56,85	7300,6
Керосин	л	90	135,3	63,0	8528,0
Уголь (Канско-Ачинский)	кг	60	466,8	4,4	2053,8
Электрическая энергия, 1-ставочный тариф	кВт·ч	100	1163	3,44	4000,7
Электрическая энергия, 2-х ставочный тариф (ночь)	кВт·ч	100	1163	1,11	1290,9

Как видно из таблицы 1, использование жидких топлив и СУГ для выработки тепловой энергии при текущих ценах на другие виды энергетических ресурсов нецелесообразно. При недоступности централизованного теплоснабжения и природного газа, что особенно актуально при реализации программы «Дальневосточный гектар», выбирать остается из угля с дровами и электрической энергии. Как уже было сказано выше, полностью автоматизировать и порой даже механизировать подачу топлива и удаление золы из бытовых теплогенераторов малой мощности на угле не представляется возможным.

Использование электрической энергии по одноставочному тарифу обходится потребителям примерно в два раза дороже, чем теплота из системы централизованного теплоснабжения или использование угля. Поэтому особый интерес представляют автономные системы отопления и горячего водоснабжения с максимальным использованием ночного тарифа на электрическую энергию. Реализация работы данных систем только на ночном тарифе позволяет получить стоимость выработки теплоты существенно ниже, чем в централизованном теплоснабжении. И плотную конкурировать с сетевым природным газом. Такая парадоксальная ситуация связана с тем, что общая эффективность, с учетом капитальных и эксплуатационных затрат, при транспортировке и потреблении тепловой энергии по трубопроводам существенно ниже, чем в электрических сетях [4].

Для того чтобы использовать для нужд отопления и горячего водоснабжения только ночной тариф, необходима аккумуляция теплоты в размере суточного потребления в период его действия.

Проблемы отсутствия аккумуляции и пути их решения потребителями при использовании электрической энергии для нужд горячего водоснабжения рассмотрены авторами в работах [5], [6]. Перевод емкостных водонагревателей на зарядку в ночном режиме решается достаточно просто установкой недорогого программируемого реле времени на работу в диапазоне с 23 до 7 часов. Объем бойлера выбирается исходя из индивидуальных потребностей. Например, на нагрев 200 литров воды с 5 °С до 70 °С потребуется с учетом потерь в окружающую среду около 16 кВт·ч, что при 8 часовом ночном интервале требует мощности электронагревателя 2 кВт. Таким образом, применение емкостных электрических бойлеров с программируемым реле времени для нужд горячего водоснабжения не вызывает существенных технических проблем. Необходимо предусмотреть достаточное пространство для размещения емкостного бойлера вблизи точек водоразбора.

Для нужд отопления аккумуляция теплоты в размере суточного потребления может решаться разными способами. Одним из решений является применение твердотельных теплонакопителей, прообразом которых можно считать традиционную русскую печь. В качестве накапливающего инерционного материала в современных теплонакопителях применяются магнетитовые блоки большой массы. Так, вес отопительного прибора с итоговой теплоотдачей 600 Вт может составлять около 150 кг. Что предъявляет дополнительные требования к прочности несущих конструкций. Нагрев магнетитовых блоков осуществляется металлическими нагревательными элементами. Снаружи блоки закрыты стальным кожухом с тепловой изоляцией. При определенных соотношениях цен на энергетические ресурсы твердотельные теплонакопители оказываются конкурентоспособны с отоплением на природном газе [7]. В России твердотельные теплонакопители широкого распространения не получили. Основной причиной является высокая цена. Зарубежные производители предлагают теплонакопители по цене 700-900 евро за прибор мощностью 750 Вт. До 2017 года в России аналогичные приборы выпускала компания «Тагил-Технотерм» по цене 30-40 тыс. рублей. Также к недостаткам таких приборов можно отнести повышенный уровень шума – до 30 дБ (при использовании наиболее эффективных динамических теплонакопителей с встроеным вентилятором), неизбежные колебания температуры внутреннего воздуха [8].

Наиболее распространенным способом аккумуляция теплоты для нужд отопления является использование накопительных емкостей с водой в качестве теплоносителя. Вода, как теплоноситель, является идеальным вариантом в требуемом для системы отопления диапазоне температур [9], [10]. При этом применяются наиболее распространенные системы водяного отопления со всем многообразием технических решений. В ночном режиме происходит накопление теплоты в емкости за счет пониженного тарифа на электрическую энергию. Днем система отопления расходует накопленное в емкости тепло.

В работах [11], [12] произведено сравнение систем отопления с аккумуляцией в накопительных емкостях с другими вариантами аккумуляции и традиционными источниками теплоты. Сделаны выводы об экономической целесообразности использования аккумуляции теплоты в ночное время за счет пониженного тарифа. В тоже время авторы используют упрощенные модели теплового режима зданий, не учитывающие бытовые теплопоступления и теплопоступления от солнечной радиации, изменение температур наружного воздуха в течение суток и др. Что, с учетом существенного увеличения требований тепловой защиты зданий, вносит дополнительную погрешность в результаты.

Уточнение моделей теплового режима зданий путем анализа эксплуатируемых систем отопления с аккумуляцией теплоты, которых с каждым годом становится все больше в ИЖС и других сферах, является актуальной задачей. Цель такого анализа – оптимизация принимаемых решений, сокращение сроков окупаемости и повышение уровня комфорта потребителей.

Анализ работы систем отопления с аккумуляцией теплоты

Рассмотрим в качестве примера эксплуатируемый многоквартирный двухэтажный жилой дом в г. Хабаровске с общей площадью 192 м². Теплозащита здания соответствует современным требованиям [13]. Ограждающие конструкции имеют приведенный трансмиссионный коэффициент теплопередачи $K_{tr}=0,389$ Вт/(м²·°С). Условный коэффициент теплопередачи за счет инфильтрации и вентиляции $K_{inf}=0,061$ Вт/(м²·°С). Доля остекления фасадов составляет 17 %. Расчетные тепловые потери при температуре наружного воздуха минус 29 °С (наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92) составляют 15,4 кВт. Здание оборудовано гибридной системой отопления. Основная нагрузка покрывается водяной системой «теплый пол». Дополнительно под световыми проемами установлены электрические конвекторы с автоматическим включением по настраиваемой температуре внутреннего воздуха. В целях сокращения платежей за отопление специалистами ООО «Газмонтажкомплект» для использования ночного тарифа была произведена модернизация тепловой схемы с добавлением индукционного котла мощностью 22 кВт и накопительной емкости объемом 750 л. Модернизированная тепловая схема котельной для системы отопления приведена на рисунке 1.

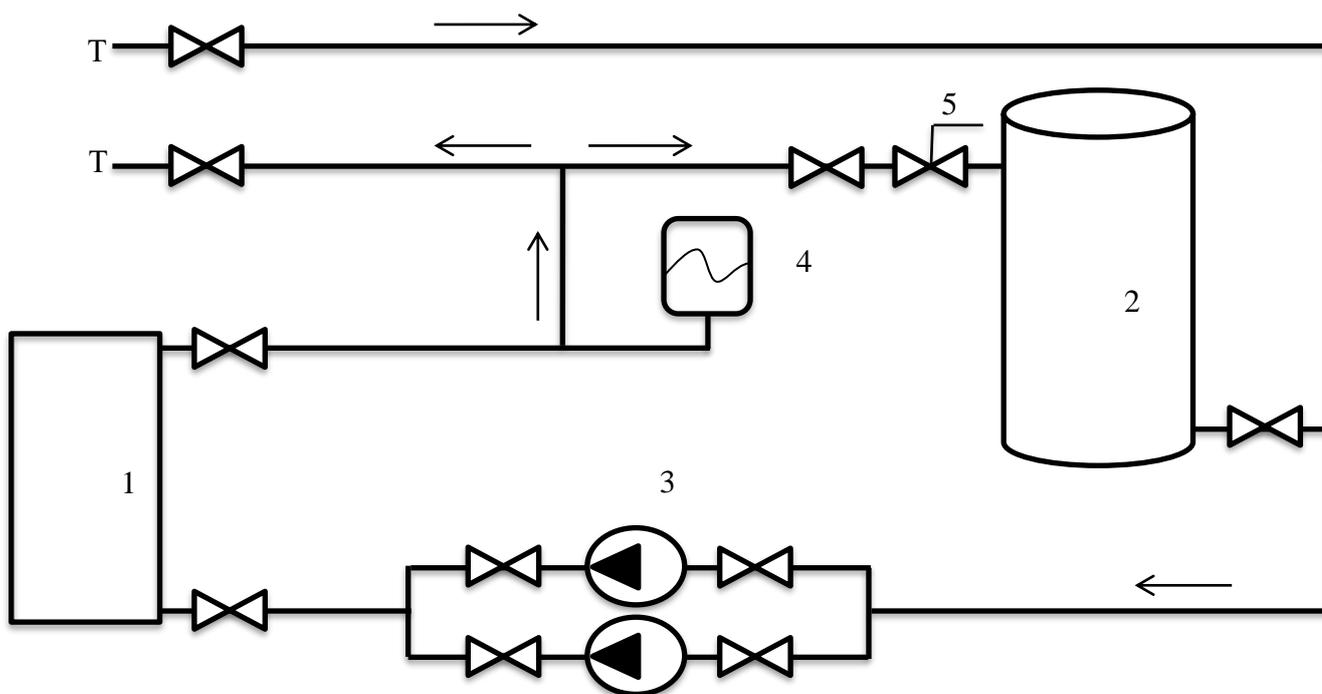


Рис. 1 – Тепловая схема котельной для системы отопления:

1 – индукционный электрический котел мощностью 22 кВт; 2 – теплонакопительная емкость 750 л; 3 – насосная группа; 4 – расширительный бак; 5 – балансировочный вентиль; T_1 – подающий трубопровод в систему отопления; T_2 – обратный подающий трубопровод из системы отопления

Основной принцип выбора решений схемы на рисунке 1 – наиболее бюджетное оборудование и минимум тепловой автоматики. Алгоритм работы тепловой схемы заключается в установке пользователем требуемой температуры в емкости 2. В ночное время включается электрический котел 1 и происходит накопление энергии в емкости 2 и в высоко инерционной системе «теплый пол». При достижении установленной температуры котел 1 автоматически отключается. В дневное время, при недостатке накопленной энергии в емкости 2 и понижении температуры внутреннего воздуха, автоматически включаются резервные электрические конвекторы, расположенные преимущественно под световыми проемами в отапливаемых помещениях. Реализованная система по [10, С. 53] относится к типу аккумуляторов тепла с использованием нагретых жидкостей под давлением со скользкой средней температурой.

Количество тепловой энергии Q_h^m , потребляемой системой отопления за рассматриваемый период, определяется зависимостью [13], [14]:

$$Q_h^m = Q_r^m + Q_{inf}^m - (Q_{nt}^m + Q_{ns}^m) \nu \eta \quad (1)$$

где Q_{tr}^m – трансмиссионные тепловые потери, МДж; Q_{inf}^m – тепловые потери на нагрев вентиляционного воздухообмена и инфильтрации, МДж; Q_{int}^m – бытовые теплопоступления, МДж; Q_{ins}^m – теплопоступления через световые проемы от солнечной радиации, МДж; ν – коэффициент снижения теплопоступлений за счет тепловой инерции ограждающих конструкций (по [13, С. 32] получено значение $\nu = 0,836$); η – коэффициент эффективности авторегулирования (принят $\eta = 0,95$).

Значения, полученные по формуле (1) для рассматриваемого здания, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Потребление системы отопления по месяцам

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Окт.	Ноя.	Дек.
Средняя температура наружного воздуха T_n , °С	-20,2	-16	-6,6	4,6	4,9	-7,2	-17,7
Продолжительность отопления N , сут.	31	28	31	28	26	30	31
Потери в окружающую среду $Q_{tr}^m + Q_{inf}^m$, МДж	34508	27912	22834	11940	10871	22596	32362
Бытовые теплопоступления Q_{int}^m , МДж	1286	1161	1286	1161	1078	1244	1286
Солнечная радиация Q_{ins}^m , МДж	7100	8861	12116	9835	5388	6254	5825
Отопление Q_h^m , МДж	27845	19948	12185	3202	5733	16637	26712

Для распределения затрат электроэнергии на отопление по тарифам «день» и «ночь» необходимо произвести расчеты отдельно для периода с 7-00 до 23-00 и для периода с 23-00 до 7-00 соответственно.

Около 50 % суммарных потерь $Q_{tr}^m + Q_{inf}^m$ в окружающую среду для рассматриваемого здания происходят через малоинерционные световые проемы и за счет инфильтрации (вентиляции) воздуха. Для этой части потерь учитывалось изменение температуры наружного воздуха в течение суток. Была использована модель гармонических колебаний температуры наружного воздуха со средней амплитудой по [15] для каждого рассматриваемого месяца.

Остальные потери в окружающую среду $Q_{tr}^m + Q_{inf}^m$ поделены в пропорции по времени: 8 часов – «ночь» и 16 часов – «день» без учета колебаний температуры наружного воздуха в течение суток.

Бытовые теплопоступления Q_{int}^m поделены в пропорции 20 % – «ночь», 80 % – «день». Теплопоступления от солнечной радиации отнесены полностью на диапазон «день».

Полученное таким образом значение потребления системы отопления в диапазонах «день» и «ночь» приведено в таблице 3. Для апреля поступления тепла в дневное время превышают потери. Избыточное тепло при этом приводит к росту температуры внутреннего воздуха и может сбрасываться в окружающую среду путем увеличения вентиляции помещений.

Таблица 3 – Потребление системы отопления по месяцам с учетом времени суток

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Окт.	Ноя.	Дек.
Потери в окружающую среду $Q_{tr}^m + Q_{inf}^m$, МДж	22577	18155	14693	7451	6822	14655	21175
днем							
ночью	11931	9757	8141	4489	4049	7941	11188
Бытовые теплопоступления Q_{int}^m , МДж	1029	929	1029	929	863	995	1029
днем							
ночью	257	232	257	232	216	249	257
Отопление Q_h^m , МДж	16118	10375	4248	-1102	1855	8894	15729
днем							
ночью	11727	9573	7937	4305	3878	7743	10983

Учитывая гибридность системы отопления, полученные в таблице 3 показатели необходимо разделить между водяной системой «теплый пол» и электрическими конвекторами. Алгоритм такого разделения основан на фактически наблюдаемых параметрах теплоносителя и показаниях электрических счетчиков при эксплуатации. Полученные показатели работы тепловой схемы приведены в таблице 4.

В наиболее холодные зимние месяцы электрический котел мощностью 22 кВт работает все 8 часов льготного времени (с 23-00 до 7-00). При этом часть выработанного котлом тепла аккумулируется в емкости объемом 750 л путем нагрева воды в среднем с 25 °С до 70 °С. Остальная часть идет на аккумулирование в «теплый пол» за вычетом текущей теплоотдачи в помещения. Максимальное изменение температуры теплого пола составляет по результатам расчета 5,5 °С. В зимние месяцы аккумулированной тепловой энергии недостаточно для временного интервала с 7-00 до 23-00. Поэтому в дневное время происходит включение резервных электрических конвекторов (строка «Работа эл. конвекторов днем» в таблице 4). Указанные конвекторы также работают в ночное время для покрытия дефицита теплоты в момент разогрева «теплого пола».

Таблица 4 – Потребление системы отопления по месяцам по времени суток

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Окт.	Ноя.	Дек.
Среднее время работы котла 22 кВт, час в сутки	8,000	8,000	2,915	0,000	1,204	6,746	8,000
Выработка энергии котлом ночью, МДж	19642	17741	7476	0	3264	15651	19642
в т. ч. аккумулирование в ёмкости 750 л, МДж	4381	3957	1667	0	728	3491	4381
аккумулирование в конструкциях, МДж	6781	6125	2581	0	1127	5403	6781
Работа эл. конвекторов днем, МДж	4956	294	0	0	0	0	4567
Работа эл. конвекторов ночью, МДж	3247	1913	4709	4305	2469	986	2503
Потребление эл. энергии по тарифу «день», кВт·ч	1377	82	0	0	0	0	1269
Потребление эл. энергии по тарифу «ночь», кВт·ч	6358	5459	3385	1196	1592	4621	6151

В октябре-ноябре и в марте необходимое среднее время работы котла снижается. Связано это с тем, что избыточное аккумулирование тепловой энергии в емкости и в «теплый пол» приводит к перегреву помещений в дневное время. Поэтому в марте и октябре происходит увеличение потребления резервными электрическими конвекторами в ночное время.

В апреле эксплуатация «теплого пола», исходя из теплового баланса, уже не нужна, достаточно работы резервных электрических конвекторов в ночное время.

Полученное в результате расчетов потребление электроэнергии по тарифам «день» и «ночь» позволяет определить среднюю стоимость вырабатываемой 1 Гкал теплоты. При текущем тарифе «день/ночь» 3,96/1,11 руб./кВт·ч получаем стоимость 1578 руб./Гкал, что ниже значения текущей стоимости в системе централизованного теплоснабжения 1917,1 руб./Гкал.

При отсутствии аккумулирующей емкости и высокоинерционной системы отопления «теплый пол», т. е. использовании только электрических конвекторов, стоимость вырабатываемой 1 Гкал теплоты составит 2964 руб./Гкал. При этом применялась та же методика расчета с разбивкой потребления энергии по времени суток. Стоимость выработки теплоты разными способами для анализируемого здания приведена на рисунке 2.

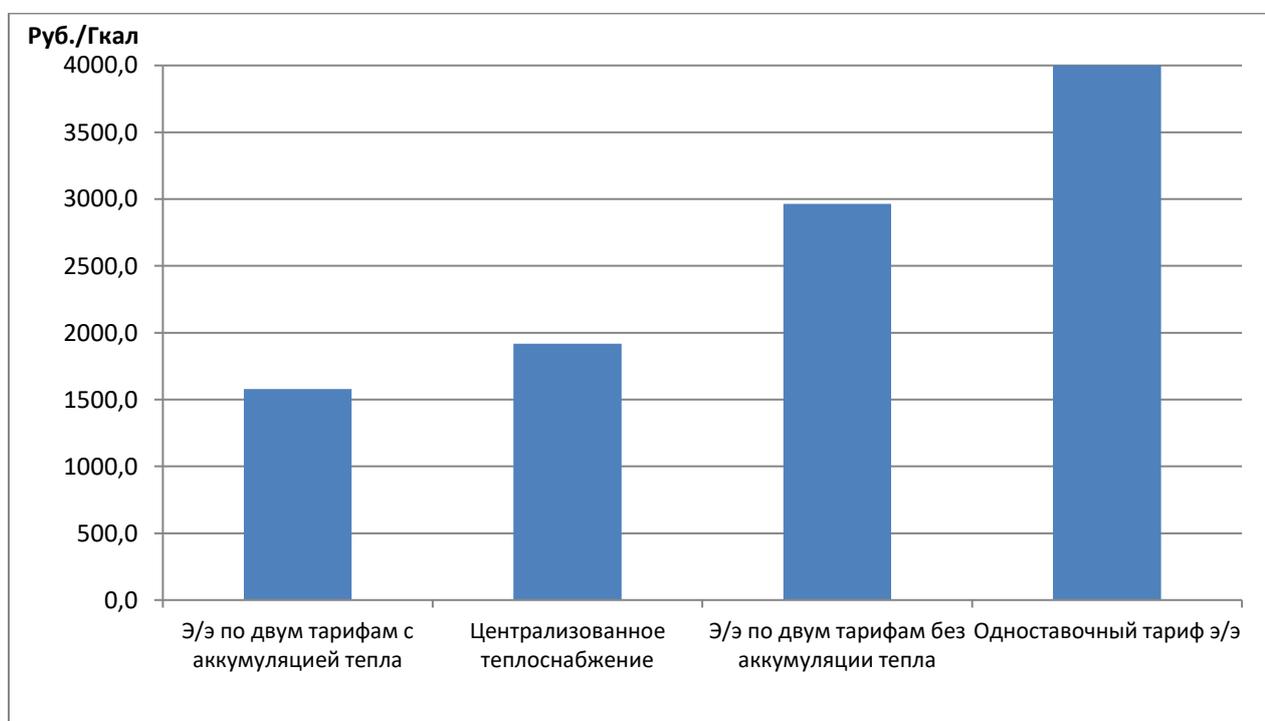


Рис. 2 – Стоимость выработки теплоты различными способами

Также представляет интерес дальнейшее увеличение аккумулирующей емкости и прогнозируемые при этом результаты работы системы отопления. Моделирование работы гибридной системы отопления по приведенной выше методике показывает, что при увеличении аккумулирующей емкости в два раза с 750 л до 1500 л и увеличении мощности котла с 22 кВт до 27 кВт прогнозная себестоимость выработки тепловой энергии по цене электроэнергии составит 1313 руб./Гкал. Дальнейшее увеличение аккумулирующей емкости экономически нецелесообразно, т. к. полученная себестоимость уже близка к теоретическому минимальному значению по тарифу ночь 1290,9 руб./Гкал.

Заключение

Проведенный анализ работы эксплуатируемого объекта показал, что использование гибридной системы отопления в виде водяной системы «теплый пол» вместе с баком аккумулятором горячей воды и электрических конвекторов с терморегуляторами позволяет сократить платежи за электроэнергию на 46 % по сравнению с системой электроотопления без какой-либо аккумуляции тепла.

К преимуществам рассмотренной системы отопления можно отнести снижение требуемой емкости бака-аккумулятора тепловой энергии за счет применения высокоинерционной системы отопления «теплый пол». Расчеты показали, что количество теплоты, накапливаемой за ночь в ограждающих конструкциях, превышают в 1,5 раза накопление теплоты в баке-аккумуляторе объемом 750 л. Для выявления степени влияния колебаний температур «теплого пола» и ограждающих конструкций помещений на уровень комфорта требуется проведение отдельного, более подробного моделирования с помощью специальных программных продуктов.

К недостаткам рассмотренной системы отопления можно отнести необходимость резервирования мощности с помощью электрических конвекторов. Дополнительные затраты на них увеличивают и без того высокую стоимость системы «теплый пол».

Также к недостаткам относится необходимость ручного выставления температуры нагрева воды в системе отопления, которую потребитель определяет эмпирическим путем. Для решения этой задачи требуется разработка индивидуального графика поддержания температуры теплоносителя в аккумулирующей емкости в зависимости от температуры наружного воздуха, что позволит пользователю избежать перерасхода электроэнергии при ручном управлении температуры нагрева воды котлом.

Проведенный анализ работы существующей системы отопления и последующее моделирование выявило, что установленная мощность электрического котла и емкость бака-аккумулятора недостаточны для достижения минимально возможной платы за электроэнергию. Чтобы ответить на вопрос о том, насколько экономически целесообразно достижение минимальной платы за электроэнергию, необходимо проведение более глубокого технико-экономического анализа, что выходит за рамки данной работы.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Жилищное хозяйство в России. 2019: Стат. сб./ Росстат. – М., 2019. – 78 с.
2. Отопление индивидуального жилого дома в условиях отсутствия системы централизованного газоснабжения / В. А. Леонтьев, Д. С. Олейник, А. К. Яшенко и др. // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – № 2(33). – С. 149-155.
3. Силин, Д. С. Выбор оптимального варианта отопления здания торгового центра в г. Дудинке / Д. С. Силин, М. А. Елесин // Научный вестник Арктики. – 2018. – № 4. – С. 42-50.
4. Лелюшкин, Н. В. Перспективы применения электроэнергии для теплоснабжения / Н. В. Лелюшкин // Двойные технологии. – 2009. – № 3(48). – С. 38-45.
5. Шумилин, Е. В. Выбор способа приготовления горячей воды в жилых домах / Е. В. Шумилин, Д. В. Китов // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2019. – Т. 1. – № 2. – С. 545-548.
6. Воронов, Н. Э. Анализ технических решений обеспечения нагрузки горячего водоснабжения за счет электроэнергии (на примере многоквартирного жилого дома в Хабаровске) / Н. Э. Воронов, Е. В. Шумилин // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 246-250.
7. Клен, А. Н. Эффективность применения теплонакопителей в частных домовладениях Украины / А. Н. Клен // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – Т. 6. – № 1(26). – С. 46-49. – DOI 10.15587/2312-8372.2015.56645.
8. Lysak, O. Analysis of the temperature distribution in a space heated by a dynamic (fan) storage heater / O. Lysak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3. – No 8(87). – P. 17-25. – DOI 10.15587/1729-4061.2017.103778.
9. Левенберг В. Д. Аккумуляция тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – К. Тэхника, 1991. – 112 с.
10. Бекман Г. Тепловое аккумулярование энергии / Г. Бекман, П. Гилли; Пер. с англ. под ред. д.т.н В. М. Бродянского. – М.: Мир, 1987. – 272 с.
11. Мацевитый, Ю. М. Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий / Ю. М. Мацевитый, Н. Г. Ганжа, А. В. Хименко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 10(92). – С. 9-16.
12. Андриющенко, А. М. Разработка энергосберегающих систем электрического отопления с ночным аккумулярованием теплоты / А. М. Андриющенко, В. Р. Никульшин, А. Е. Денисова // ScienceRise. – 2017. – Т. 12. – № 1(41). – С. 71-76. – DOI 10.15587/2313-8416.2017.118277.
13. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 100 с.
14. Руководство АВОК-8-2011. Руководство по расчету теплопотребления эксплуатируемых жилых зданий. – М.: ООО ИИП «АВОК-ПРЕСС», 2011. – 24 с.
15. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М.: Стандартинформ, 2021. – 148 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zhilishchnoye khozyaystvo v Rossii. 2019 [Housing in Russia. 2019: Stat. sb.] / Rosstat. – M., 2019. – 78 p. [in Russian]

2. Otopleniye individualnogo zhilogo doma v usloviyakh otsutstviya sistemy tsentralizovannogo gazosnabzheniya [Heating of an individual residential building in the absence of a centralized gas supply system] / V. A. Leont'ev, D. S. Olejnik, A. K. Jashenko, A. A. Sarmina // *Obrazovaniye i nauka v sovremennom mire. Innovatsii* [Education and science in the modern world. Innovations]. – 2021. – № 2(33). – pp. 149-155. [in Russian]
3. Silin, D. S. Vybór optimalnogo varianta otopleniya zdaniya torgovogo tsentra v g. Dudinke [Choosing the optimal heating option for a shopping center building in Dudinka] / D. S. Silin, M. A. Elesin // *Nauchnyy vestnik Arktiki* [Scientific Bulletin of the Arctic]. – 2018. – № 4. – pp. 42-50. [in Russian]
4. Lejushkin N. V. Perspektivy primeneniya elektroenergii dlya teplosnabzheniya [Prospects for the use of electricity for heat supply] / N. V. Lejushkin // *Dvoynnye tekhnologii* [Dual technologies]. – 2009. – № 3(48). – pp. 38-45. [in Russian]
5. Shumilin E. V. Vybór sposoba prigotovleniya goryachey vody v zhilykh domakh [Choosing the method of hot water preparation in residential buildings] / E. V. Shumilin, D. V. Kitov // *Dalniy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* [Far East: problems of development of the architectural and construction complex]. – 2019. – Vol. 1. – № 2. – pp. 545-548. [in Russian]
6. Voronov N. Je. Analiz tekhnicheskikh resheniy obespecheniya nagruzki goryachego vodosnabzheniya za schet elektroenergii (na primere mnogokvartirnogo zhilogo doma v Khabarovske) [Analysis of technical solutions for ensuring the load of hot water supply at the expense of electricity (on the example of an apartment building in Khabarovsk)] / N. Je. Voronov, E. V. Shumilin // *Dalniy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* [Far East: problems of development of the architectural and construction complex]. – 2021. – Vol. 1. – № 1. – pp. 246-250. [in Russian]
7. Klen, A. N. Effektivnost primeneniya teplonakopiteley v chastnykh domovladiyakh Ukrainy [The effectiveness of the use of heat accumulators in private households in Ukraine] / A. N. Klen // *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva* [Technological audit and production reserves]. – 2015. – Vol. 6. – № 1(26). – pp. 46-49. DOI 10.15587/2312-8372.2015.56645. [in Russian]
8. Lysak O. Analysis of the temperature distribution in a space heated by a dynamic (fan) storage heater / O. Lysak // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 3. – No 8(87). – pp. 17-25. – DOI 10.15587/1729-4061.2017.103778.
9. Levenberg V. D. Akkumulirovaniye tepla [Heat storage] / V. D. Levenberg, M. R. Tkach, V. A. Gol'strem. – K. Tjehnika, 1991. – 112 p. [in Russian]
10. Bekman G. Teplovoye akkumulirovaniye energii [Thermal energy storage]. / G. Bekman, P. Gilli // *Trans. from En. ed. by PhD in Engineering V. M. Brodjanskogo*. – M.: Mir, 1987. – 272 p. [in Russian]
11. Macevityj, Ju. M. Otsenka energeticheskoy effektivnosti sistem elektroteploakkumulyatsionnogo otopleniya administrativnykh zdaniy [Assessment of the energy efficiency of electric heat storage heating systems of administrative buildings] / Ju. M. Macevityj, N. G. Ganzha, A. V. Himenko // *Energoberezhniye. Energetika. Energoaudit* [Jenergoberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudi]. – 2011. – № 10(92). – pp. 9-16. [in Russian]
12. Andrijushhenko, A. M. Razrabotka energosberegayushchikh sistem elektricheskogo otopleniya s nochnym akkumulirovaniyem teploty [Development of energy-saving electric heating systems with night heat storage] / A. M. Andrijushhenko, V. R. Nikul'shin, A. E. Denisova // *ScienceRise*. – 2017. – Vol. 12. – № 1(41). – pp. 71-76. – DOI 10.15587/2313-8416.2017.118277. [in Russian]
13. SP 50.13330.2012. Teplovaya zashchita zdaniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-02-2003 [SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Updated edition SNiP 23-02-2003]. – M.: Minregion Rossii, 2012. – 100 p. [in Russian]
14. Rukovodstvo AVOK-8-2011. Rukovodstvo po raschetu teplopotrebleniya ekspluatiruyemykh zhilykh zdaniy [Guide AVOK-8-2011. Guidelines for calculating the heat consumption of operated residential buildings]. – M.: OOO IIP "AVOK-PRESS", 2011. – 24 p. [in Russian]
15. SP 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-01-99 [SP 131.13330.2020. Construction climatology. Updated edition SNiP 23-01-99*]. – M.: Standartinform, 2021. – 148 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.060>

КОНТРОЛЬ И МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

Колбина О.Н.¹, Яготинцева Н.В.², Сафонова Т.В.³, Мокряк А.В.^{4,*}

^{1, 2, 3} Российский Государственный Гидрометеорологический Университет; Санкт-Петербург, Россия;

⁴ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России; Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (Mokryakanna[at]mail.ru)

Аннотация

В статье акцентируется внимание на необходимости контроля и мониторинга окружающей среды на законодательном уровне. Выявлены категории предприятий, подлежащих контролю уровня загрязнений окружающей среды. Определена необходимость внедрения единой геоинформационной системы мониторинга окружающей среды, а также информационные и функциональные требования к ней. Разработана концептуальное представление единой геоинформационной системы мониторинга окружающей среды и предложен прототип измерительных устройств и информационного обеспечения. Проанализированы способы передачи данных и определен оптимальный для обеспечения фиксации информации и отображения на геоинформационной подложке.

Ключевые слова: экологическая обстановка, геоинформационная система, IoT, NRX, DRX, промышленное предприятие.

CONTROL AND MONITORING OF ENVIRONMENTAL SAFETY

Research article

Kolbina O.N.¹, Yagotinceva N.V.², Safonova T.V.³, Mokryak A.V.^{4,*}

^{1, 2, 3} Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia;

⁴ Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

* Corresponding author (Mokryakanna[at]mail.ru)

Abstract

The article focuses on the need to control and monitor the environment at the legislative level. Categories of enterprises subjected to environmental pollution control were established. The necessity of a unified geoinformation system for environmental monitoring, as well as its informational and functional requirements, was introduced. A conceptual presentation of a unified geoinformation system for environmental monitoring was developed, a prototype of measuring devices and informational support proposed. Methods of data transmission were analyzed, and the optimal one for ensuring informational fixation and its display on geoinformation backing was determined.

Keywords: ecological situation geoinformation system, IoT, NRX, DRX, industrial enterprise.

Введение

Каждый человек хочет жить в безопасном и комфортном месте, с чистым воздухом, едой и водой, однако современные мегаполисы нельзя таковыми назвать. Обилие промышленных объектов, густонаселённость и увеличение с каждым годом количества транспорта приводит к плачевному состоянию экологической обстановки вокруг больших городов. Проблема загрязнения атмосферного воздуха становится только острее на протяжении последних десяти лет, однако ситуация стала меняться в 2017 году [1], который стал годом экологии в России. В этот год большое внимание уделялось законодательному аспекту в части Федерального Закона «Об охране окружающей среды». Так в изменениях говорится, что в период с 2018 по 2022 года промышленные объекты, загрязняющие окружающую среду в значительной степени, должны установить специализированные средства измерения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, с автоматической передачей информации в фонд государственного экологического мониторинга.

Цель таких нововведений предотвратить ущерб окружающей среде, так как предполагается реагировать на потенциально опасную ситуацию еще до того времени как она перерастет в критически опасную.

Обзор вопроса и постановка задачи

Согласно статье 4.2. ФЗ 219 «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» Предприятия производящие экологические загрязнения в результате своей деятельности делятся на 4 категории:

- 1 категория. Объекты, оказывающие значительное негативное воздействие на окружающую среду и относящиеся к областям применения наилучших доступных технологий,
- 2 категория. Объекты, оказывающие умеренное негативное воздействие на окружающую среду;
- 3 категория. Объекты, оказывающие незначительное негативное воздействие на окружающую среду;
- 4 категория. Объекты, оказывающие минимальное негативное воздействие на окружающую среду.

Каждая из категорий вносит в бюджет РФ соответствующую плату за негативное воздействие на окружающую среду. Для уменьшения издержек предприятию необходимо доказать уменьшение воздействия и перейти на более легкую категорию [2].

Введение и установка автоматических датчиков сбора данных о состоянии окружающей среды должны исключить любую подтасовку сведений со стороны руководства промышленного объекта, что повысит доверие к передаваемым показателям. Данный подход будет работать при условии модернизации промышленных производств всего региона, иначе невозможно просчитать и увидеть полную картину экологической обстановки, так как оборудование

в существующих городских постах наблюдения за уровнем загрязнения атмосферы не менялось с 70-х годов прошлого века. Старое оборудование способно определять основные примеси, но не ориентировано на новые [3].

В одном из самых крупных городов России, Москве, уже более 70 крупных предприятий оснащены датчиками измерения и учета выбросов загрязняющих веществ. Но на данный момент отсутствует единая информационная инфраструктура позволяющая отслеживать сложившуюся обстановку и обеспечивающая прозрачность процедуры мониторинга.

Для достижения оптимального эффекта от внедрения подобной системы, единая информационная структура должна обеспечивать фиксацию и отображение следующих параметров:

- датчики на дымовые трубы (измерения состава выбросов в воздух на самом предприятии производятся каждые 20 мин)
- датчики состояния атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и на территории предприятия (измерения производятся каждые 12 ч.)
- датчики качества сточных вод на предприятии (измерения проводятся каждые 12 ч.)
- датчики состояния и уровня грунтовых вод (измерения раз в полугодие).

В автоматическом режиме должна происходить передача и анализ данных: по каналам связи результаты измерений могут выводиться на мониторы операторов технологических установок, диспетчеров по заводу и специалистов экологической службы. Полученные в режиме онлайн данные позволяют корректировать режим работы и контролировать уровень их воздействия на окружающую среду [4].

Материалы и методы

Для обеспечения должного уровня доверия к собираемой и отображаемой информации [5] единая информационная инфраструктура должна быть понятна и оператору экологического надзора, и рядовому жителю. В результате исследования были сформированы требования для подобной системы:

1. Отображение собранной информации необходимо выводить на карту (внедрение геоинформационных технологий)
2. Мониторинг необходимо поддерживать в режиме реального времени (внедрение систем передачи GPRS, Wi-Fi)
3. Устройства сбора данных должны быть малогабаритными и автономными (внедрение микроэлектроники, альтернативных источников питания и IoT)
4. Предоставление информации по уровням загрязненности (соотнесение уровней загрязненности в цветовом режиме с нормами ПДК)

Таким образом Прототип ГИС обеспечения принятия решения на основе мобильного мониторинга окружающей среды включает [6]:

- ГИС отображающую текущее экологическое состояние (рисунок 1).
- Портативные многофункциональные измерительные приборы (рисунок 2).

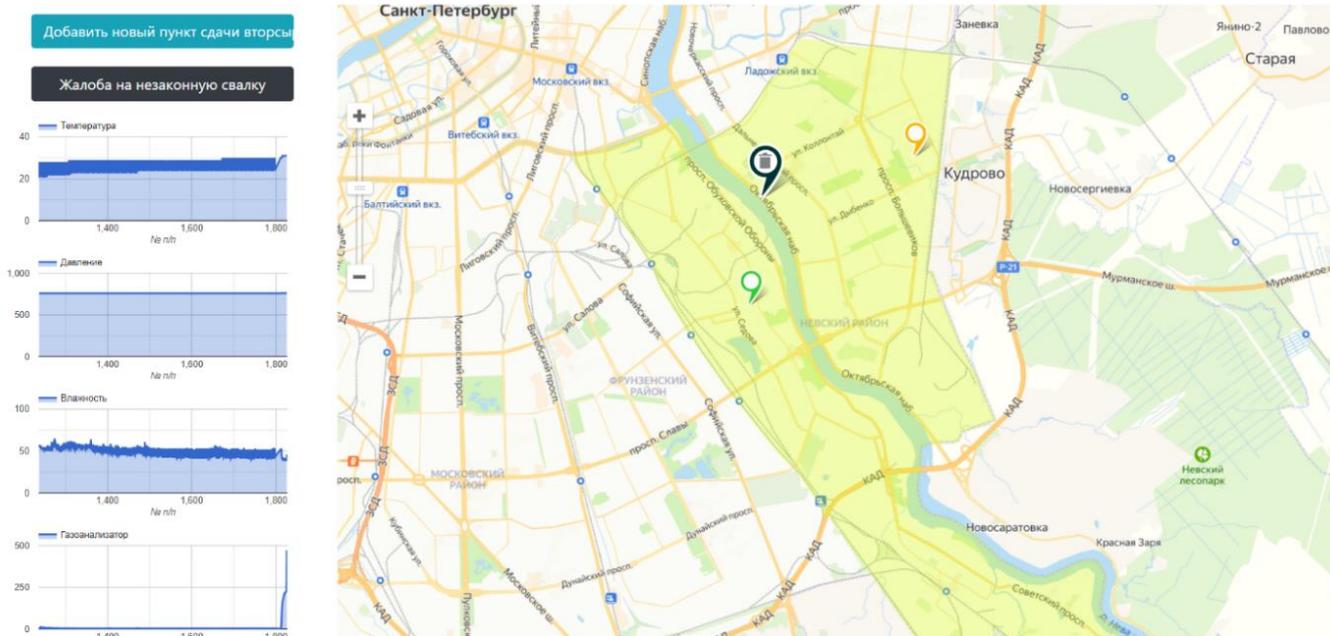


Рис. 1 – Геоинформационная система отображения экологического состояния



Рис. 2 – Прототип многофункционального измерительного прибора

Измеряемые параметры в режиме реального времени пересылаются на webserver, что позволяет формировать сетку с привязанными координатами к каждому устройству, для дальнейшего анализа и планирования контролируемой территории.

Применение в датчиках современных достижений техники, указанных в требованиях к единой системе, позволит уменьшить их стоимость для конечного потребителя и возможность приобретать не только на производство, но и для личного пользования [7].

Применение геоинформационных технологий и адаптация представляемой информации (соотнесение) открывает более широкий функционал для отслеживания и быстрого реагирования на ситуацию. Совокупность же применения датчиков для получения актуальной информации и геоинформационной системы для отображения её на карте территории ведет к своевременной локализации происшествия (рисунок 3).

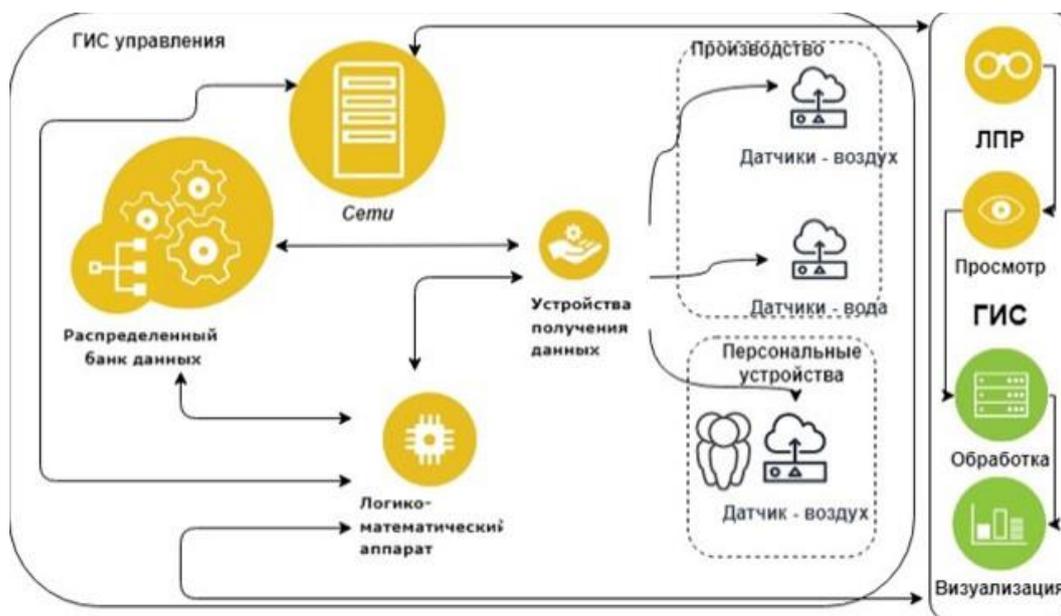


Рис. 3 – Концептуальное представление геоинформационной системы

На рисунке 1 показана Геоинформационная система управления экологической обстановкой города, которая будет апеллировать большим количеством информации, что накладывает на неё особые ограничения в технологиях создания баз данных и защите информации.

Измеряемые параметры в режиме реального времени пересылаются на webserver показания по углекислому газу и основным метеопараметрам, что позволяет формировать сетку с привязанными координатами к каждому устройству.

Поскольку данное решение может быть только как программно-аппаратный комплекс, то для реализации программного слоя была выбрана технология интернет вещей, которая имеет перспективы в цифровизации. Совокупность технологий, позволяющая осуществлять сбор данных и, возможно в дальнейшем, контроль за объектами, называется «Интернет вещей» (дословно – «интернета всего» от английского Internet of Everything, IoE) [8], которая позволяет получить доступ к источнику необходимых данных в реальном времени.

Работу интернета вещей поддерживают электронные устройства, взаимодействующие с физическим реальным миром. Данные в таких системах предоставляют контекстную, актуальную и прогностическую информацию, которая оказывает влияние на геоинформационную систему для поддержки принятия управленческих решений. Взаимодействие компонентов IoT, обеспечивающих ее работу представлены на рисунке 4 [9].

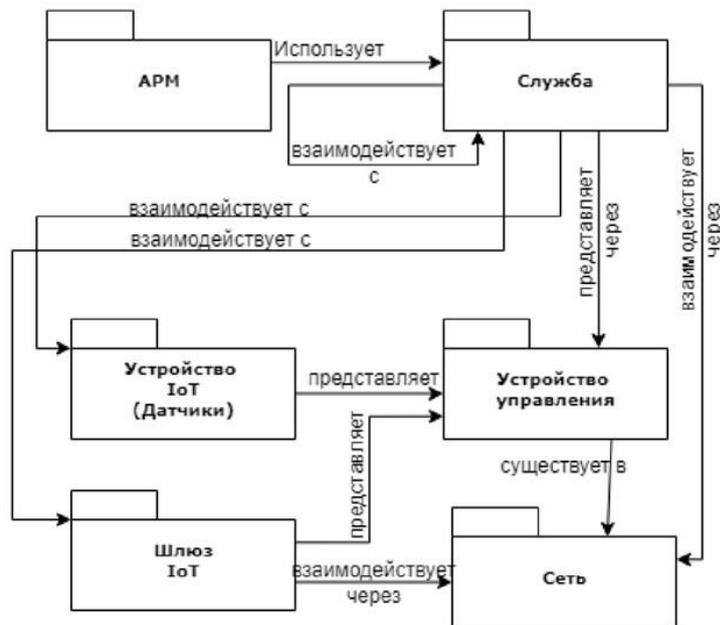


Рис. 4 – Службы и компоненты технологии IoT в системе мониторинга

Каналами передачи данных могут быть двухточечные соединения внутри или между системами IoT, внутри или между доменами, а также с другими системами и организациями. Подключенные сети должны управлять подключаемостью от одной сети до другой. Ключевая роль сетей заключается в поддержке и обеспечении деятельности и взаимодействий для коммуникаций и обмена данными [10].

Для реализации передачи данных от устройств к серверу оптимальным режимом работы является NRX (No RX). В отличие от DRX (Discontinuous RX) и CRX (Continuous RX), такой режим работы обеспечивает только передачу данных с заданной частотой [11], остальное время модем находится в режиме «сон», что позволяет «экономно» использовать полосу пропускания и режим энергосбережения. При реализации систем автономного питания с использованием альтернативных источников питания вопрос энергосбережения достаточно критичен.

В режиме работы NRX не поддерживаются переотправка «потерянных» данных и режим автоматического выбора оптимальной скорости связи.

Заключение

В ходе исследования был определен новый подход к облику информационной системы мониторинга окружающей среды в пределах территории производства, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду.

Определены основные составляющие единой информационной системы. Представление такой информации с применением геоинформационной технологии позволит обеспечить оперативное реагирование в случае выявления системой нарушения. Выбранный режим передачи данных от датчиков до хранилища данных обеспечит экономию используемого канала связи.

Положено начало для дальнейшего исследования:

1. Определения минимального размера сетки для размещения датчиков по контуру;
2. Рассмотреть вопрос большого хранения данных для дальнейшего использования;
3. Рассчитать показатели надежности к геоинформационной системе мониторинга.

Ввод в эксплуатацию подобных систем – это важный этап модернизации предприятий, особенно тех, которые находятся в черте городов. Именно поэтому повышение экологической эффективности – это, наряду с производственными задачами, одно из важнейших направлений работы крупных компаний. Наличие таких экологических систем позволяет не только сделать работу предприятий более прозрачной и экологически эффективной, но и помогает им выстроить конструктивный диалог как с контролирующими органами, так и непосредственно с жителями близлежащих регионов, что очень важно.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Peculiarities of creating a database for the IoT system of urban forest management in the city of St. Petersburg / O. Kolbina, E. Istomin, N. Yagotinceva et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2021. – No. 876(1). – pp. 012039.
2. Formation of a data network in a geo-information system for forest inventory / M. Kalambet, V. Mikheev, E. Istomin et al. // M. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2021. – 876(1). – pp. 012036.
3. The use of information and infocommunication technologies in the management of urban forests of St. Petersburg using geographic information systems / O. Kolbina, N. Yagotinceva, P. Bogdanov et al. // M. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2020. – 507(1). – pp. 012013.
4. Method for solving problems of the theory restrictions of infocommunication systems using linear equations with many unknowns / D.M. Malikova, E.S. Slashchev, E.P. Istomin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2020. – No. 507(1). – pp. 012018.
5. Robotic systems in forestry / A. Boitsov, M. Vagizov, E. Istomin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2021. – 806(1). – pp. 012034.
6. Визуальная цифровая модель леса на основе данных дистанционного зондирования и данных лесоустройства / М.Р. Вагизов, Е.П. Истомин, И.Л. Михеев // Дистанционное зондирование. – 2021. – № 13(20). – Номер статьи 4092. DOI: 10.3390/rs13204092
7. Five technologies required to create IoT-applications. [Electronic resource] URL : <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID=187126> (Accessed 15.03.21). [in Russian]
8. Model of geo-information support for decision-making while natural risk management / V.M. Abramov, E.P. Istomin, V.L. Mikheev et al. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2019. – Vol. 19. – № 2.1. – pp. 951-956.
9. Kvochkin D.O. Mobile device of the automated forest inventory / D.O. Kvochkin, V.A. Ustyugov // Journal of Industrial Pollution Control. – 2017. – No. 331(1). – pp. 976-980.
10. Bogatyrev V. A. 2012 Of the computing systems with redistribution of queries / V. A. Bogatyrev, S. V. Bogatyrev, A. V. Bogatyrev // Izvestia vuzov. Instrumentation. – No 55 – Vol. 10. – pp 53-56.
11. The use of multi-agent systems in forestry / T V Safonova, O N Kolbina, N V Yagotintceva and A V Mokryak // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 806. – 2021. – pp. 012028.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Peculiarities of creating a database for the IoT system of urban forest management in the city of St. Petersburg / O. Kolbina, E. Istomin, N. Yagotinceva et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2021. – No. 876(1). – pp. 012039.
2. Formation of a data network in a geo-information system for forest inventory / M. Kalambet, V. Mikheev, E. Istomin et al. // M. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2021. – 876(1). – pp. 012036.
3. The use of information and infocommunication technologies in the management of urban forests of St. Petersburg using geographic information systems / O. Kolbina, N. Yagotinceva, P. Bogdanov et al. // M. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2020. – 507(1). – pp. 012013.
4. Method for solving problems of the theory restrictions of infocommunication systems using linear equations with many unknowns / D.M. Malikova, E.S. Slashchev, E.P. Istomin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2020. – No. 507(1). – pp. 012018.
5. Robotic systems in forestry / A. Boitsov, M. Vagizov, E. Istomin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled. – 2021. – 806(1). – pp. 012034.
6. Vizualnaya tsifrovaya model lesa na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya i dannykh lesoustroystva [Visual digital model of the forest based on remote sensing data and forest management data] / M.R. Vagizov, E.P. Istomin, I.L. Mikheev // Distantionnoye zondirovaniye [Remote sensing]. – 2021. – № 13(20). – p. 4092. DOI: 10.3390/rs13204092. [in Russian]
7. Five technologies required to create IoT-applications. [Electronic resource] URL : <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID=187126> (Accessed 15.03.21).
8. Model of geo-information support for decision-making while natural risk management / V.M. Abramov, E.P. Istomin, V.L. Mikheev et al. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2019. – Vol. 19. – № 2.1. – pp. 951-956.
9. Kvochkin D.O. Mobile device of the automated forest inventory / D.O. Kvochkin, V.A. Ustyugov // Journal of Industrial Pollution Control. – 2017. – No. 331(1). – pp. 976-980.
10. Bogatyrev V. A. 2012 Of the computing systems with redistribution of queries / V. A. Bogatyrev, S. V. Bogatyrev, A. V. Bogatyrev // Izvestia vuzov. Instrumentation. – No 55 – Vol. 10. – pp 53-56.
11. The use of multi-agent systems in forestry / T V Safonova, O N Kolbina, N V Yagotintceva and A V Mokryak // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 806. – 2021. – pp. 012028.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.061>

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕРРИТОРИИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ АГРОКЛАСТЕРА РЕСПУБЛИКИ КРЫМ
Научная статья

Папаскири Т.В.^{1,*}, Баданина А.А.²

^{1,2} Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (aleksandra_asher[at]mail.ru)

Аннотация

В условиях формирования конкурентоспособной инновационной экономики Российской Федерации, в том числе ее аграрной отрасли, достижение устойчивости развития является приоритетной задачей государства, направленной на обеспечение продовольственной безопасности и независимости страны, повышение уровня и качества жизни сельского населения, рациональное использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды для будущих поколений.

Одним из важнейших направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства в сложившихся условиях является формирование и территориальная организация агрокластеров. В статье рассмотрены вопросы организации территории землепользования агрокластера и размещение объектов капитального строительства. Выявлена и обоснована необходимость разработки проектов землепользования агрокластеров на основании землеустроительной документации.

Ключевые слова: землеустройство, агрокластер, Генеральная план (схема) использования и охраны земель.

ORGANIZATION OF THE LAND USE TERRITORY OF THE AGRO CLUSTER OF THE REPUBLIC OF CRIMEA
Research Article

Papaskiri T.V.^{1,*}, Badanina A.A.²

^{1,2} State University of Land Management, Moscow, Russia

* Corresponding author (aleksandra_asher[at]mail.ru)

Abstract

In the context of the formation of a competitive innovative economy of the Russian Federation, including its agricultural sector, achieving sustainable development is a priority task of the state aimed at ensuring food security and independence of the country, improving the level and quality of life of the rural population, rational use of natural resources and preservation of the environment for future generations.

One of the most important directions of increasing the efficiency of agricultural production in the current conditions is the formation and territorial organization of agricultural clusters. The article deals with the organization of the land use territory of the agro cluster and the placement of capital construction projects. The necessity of developing agricultural cluster land use projects based on land management documentation has been identified and justified.

Keywords: land management, agro cluster, General plan (scheme) of land use and protection.

Введение

Основным землеустроительным документом, в котором определены направления развития землепользования агрокластера, является Генеральный план (схема) использования и охраны земель землепользования агрокластера [1].

При этом объектом землеустройства является территория агрокластера, а предметом – территориальная организация землепользований сельскохозяйственных предприятий, вошедших в состав агрокластера [4].

Основные результаты

Сельскохозяйственные предприятия землепользования агрокластера Республики Крым находятся в различных муниципальных районах одного субъекта Российской Федерации, при развитии данных территорий и экспорта продукции за границы Республики Крым задачи организации рационального использования земель и их охраны в землепользовании агрокластера не способны отобразить все вопросы в Схеме землеустройства территории Российской Федерации и схемах землеустройства муниципальных районов [1].

На основании этого вопросы должны отобразить свое решение в Генеральном плане, который подготавливается в увязке с данными видами землеустроительной документации, а также схемами территориального планирования субъекта (субъектов) Российской Федерации и муниципальных образований (рис. 1).

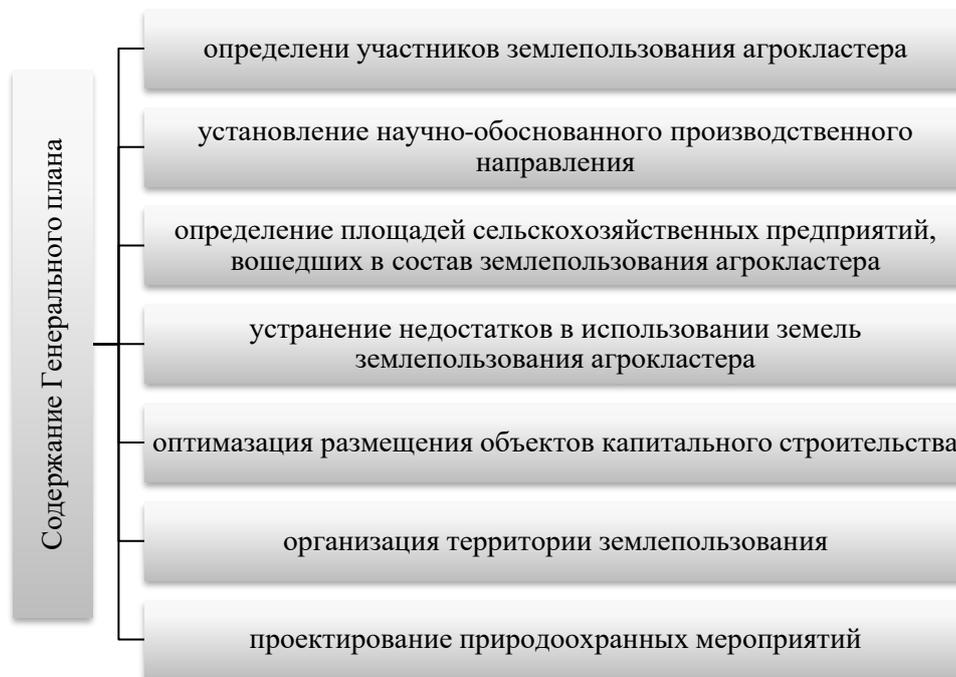


Рис. 1 – Содержание Генерального плана (схемы) использования и охраны земель землепользования агрокластера

В использовании земель и объектов недвижимости сельскохозяйственных предприятий – участников землепользования существуют недостатки в области землепользования:

- несоответствие площади сельскохозяйственных организаций, входящих в состав землепользования;
- отсутствие в животноводческих комплексах полнофункциональной кормовой базы;
- наличие недостатков землепользования (чересполосицы, дальнотемелья, вкрапления и других недостатков);
- нерациональная организация территории сельскохозяйственных предприятий (системы севооборотов, пастбищеоборотов, сенокособоротов, комплекса противозерозионных мер и др.) [6], [7].

На основании вышеизложенного, в Генеральном плане (схеме) использования и охраны земель землепользования агрокластера проблемы организации территории необходимо решать следующим образом.

Для приведения в соответствие размеров участников кластерной структуры следует применять методику оптимизации площадей сельскохозяйственных предприятий.

Сельскохозяйственные предприятия вошедшие в состав землепользования агрокластера, специализируются на производстве продукции животноводства.

Рост продукции животноводства невозможен без модернизации производства. На основании анализа особенностей сельскохозяйственных предприятий, с учетом наличия имеющихся животноводческих построек, трудоустроенности, кормовыми угодьями, состояния объектов инфраструктуры, установлены следующие объекты недвижимости, рекомендуемые к учету в Генеральных планах (схемах) использования и охраны земель землепользования агрокластера для капитального строительства и реконструкции:

- ООО «Крым Агро Цех» (строительство животноводческой фермы крупного рогатого скота и свиноводческой ферм);
- АО «Победа» (строительство элеватора);
- СПК «Юбилейный» (строительство коневодческой фермы).

В землепользовании агрокластера существует необходимость реконструкции объектов агропромышленного комплекса:

- свиноводческой фермы, ферм крупного рогатого скота, птицеводческих ферм.
- комбикормового завода;
- зерносушильных комплексов.

Локализация животноводческих комплексов, ферм и формирования кормовой базы в согласование с планируемыми объемами работ по мелиорации, трансформации угодий и улучшению их качественного состояния, являются одним из главных вопросы организации землепользования агрокластера, специализирующихся на производстве продукции животноводства. При проектировании необходимо ориентироваться на собственное производство кормов, в случае необходимости потребность в кормах может быть сбалансирована за счет других поставок.

Площадь сельскохозяйственных угодий, необходимая для обеспечения комплекса кормами собственного производства ($S_{с.х.уг.}$) можно вычислить по формуле:

$$S_{с.х.уг.} = \frac{N_j}{\sum_{i=1}^m b_{ij} y_{io} a_{ij}} \quad (1)$$

где: N_j – общая потребность в кормах, за исключением поставляемых в j хозяйства землепользования агрокластера, корм. ед;

b_{ij} – коэффициент, учитывающий качество земель в j хозяйстве землепользования агрокластера ($b_{ij} = \frac{B_{ij}}{B_{i0}}$), где B_{ij} – средний балл оценки сельскохозяйственных угодий i -го вида в j -м хозяйстве; B_{i0} – балл оценки сельскохозяйственных угодий i -го вида по землепользованию агрокластера в целом;

u_{i0} – продуктивность сельскохозяйственных угодий i -го вида в землепользовании агрокластера, корм. ед.;

a_{ij} – доля i -го угодия в составе всех сельскохозяйственных угодий [5].

Для выполнения укрупненных расчетов определена площадь сельскохозяйственных угодий, необходимая для обеспечения молочных комплексов землепользования агрокластера кормами собственного производства (табл. 1).

Таблица 1 – Примерная площадь сельскохозяйственных угодий, необходимая для обеспечения молочных комплексов и ферм кормами собственного производства

Поголовье коров на комплексе (ферме)	Удельный вес пашни в составе сельскохозяйственных угодий, %			
	50	70	80	90
300	363	339	329	318
700	845	791	767	744
1000	1208	1130	1096	1063
1500	1811	1695	1645	1594
2000	2415	2260	2192	2125

На основании табл. 1, можно сделать вывод, что на 2000 коров потребуется кормовая площадь в размере примерно 2125 га. Остальное поголовье КРС можно перевести в условные головы и выполнить аналогичный укрупненный расчет.

Мероприятия по организации землепользования агрокластера должны составлять законченную технологическую цепочку «наука – производство – переработка сырья – хранение – реализация». На основании этого разница во времени между производством и переработкой сельскохозяйственной продукции должна стремиться к минимуму. Это устранил потери продукции в холоде её перевозке и хранения, и создаст условия соблюдения производственных технологий. Поэтому предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции следует размещать в центре обслуживаемой территории, вблизи дорог, на пригодных для строительства земельных участках [9].

Повышение кормовых ресурсов при землеустройстве участников землепользования агрокластера может быть получено на основании:

- использование в сельскохозяйственном производстве неиспользуемых земель в границах землепользования агрокластера;
- проектирование орошаемых культурных пастбищ вблизи животноводческих ферм;
- увеличение в структуре сельскохозяйственных угодий удельного веса пашни и других высокопродуктивных угодий;
- подготовка мероприятий по повышению интенсивности применения отдельных видов сельскохозяйственных угодий (оптимизации структуры посевов, проектирование севооборотов, использование интенсивных технологий возделывания культур и др.).

В Генеральном плане (схеме) использования и охраны земель землепользования агрокластера следует решать вопросы строительства капитальных объектов сооружений инженерной инфраструктуры, так как в Республики Крым такие объекты создавались только на локальном уровне. В итоге многие производственные центры, севообороты, населенные пункты остались без дорог с твердым покрытием и подъездов [10].

В связи с этим при территориальной организации землепользования агрокластера в Генеральном плане необходимо учитывать наличие всей имеющейся инфраструктуры, расположенной в границах сельскохозяйственных предприятий [8].

При территориальной организации объектов недвижимости следует обратить особое внимание на формирования машинно-технологической станции.

В настоящее время сельскохозяйственные предприятия нарушают сроки выполнения полевых работ из-за недостатка сельскохозяйственной техники. Машино-тракторный парк на сегодняшний день характеризуется высокой степенью износа и требуется материальных вложений [3].

Заключение

Таким образом, вопросы размещения объектов капитального строительства и организации территории должны быть решены в Генеральном плане (схеме) использования и охраны земель землепользования агрокластера, как основным землеустроительным документом, определяющим основные развития землепользования в данной интегрированной структуры.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Российская Федерация. Законы. О землеустройстве [Электронный ресурс]: федер. закон: [принят Гос. Думой 24 мая 2001 г.: одобр. Советом Федерации 6 июня 2001 г. , № 78–ФЗ] : (в ред. от 18.07.2011 № 78–ФЗ) // КонсультантПлюс : справ. правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32132/ (дата обращения 14.06.2019).

2. Ащерова А.А. Землеустроительное обеспечения формирования землепользования агрокластеров. / А.А. Ащерова // Поиск и выбор инновационных решений: сборник статей Международной научно-практической конференции (04 мая 2020 г., г. Киров). – Уфа: OMEGA SCIENCE, 2020. – с. 288-290.
3. Бугаева Т.Н. Сельское хозяйство Крыма: проблемы и перспективы / Т.Н. Бугаева // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. [Электронный ресурс]. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30586009> (дата обращения 12.05.2022).
4. Волков С.Н. Генеральная схема землеустройства территории Российской Федерации (содержание и методы разработки) [Текст]: монография / С.Н. Волков; Гос. ун-т по землеустройству. – М., 2009.– 370 с.
5. Гайнутдинова Г.Ф. Особенности использования земель в агрохолдинге [Текст] / Г.Ф. Гайнутдинова // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2011. – №7. – С.40-48.
6. Папаскири Т.В. Организационно-экономический механизм формирования системы автоматизированного проектирования в землеустройстве: диссертация ... доктора экономических наук: 08.00.05 [Текст] / Папаскири Тимур Валикович; Москва, , 2016. – 399с.
7. Папаскири Т.В. Территориальная организация агротехнопарков в системе «наука – образование – производство». [Текст]: Монография/ Т.В. Папаскири, Е.П.Ананичева; под ред. Т.В.Папаскири. – М.: Изд-во ГУЗ, 2013. – 256 с., – ил. Папаскири Т.В., Ананичева Е.П. Территориальная организация агротехнопарков в системе «наука – образование – производство». [Текст]: Монография/ Т.В. Папаскири, Е.П.Ананичева; под ред. Т.В.Папаскири. – М.: Изд-во ГУЗ, 2013. – 256 с.
8. Устойчивое пространственное развитие: ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ / Н. В. Комов, С. А. Шарипов, С. И. Носов и др. – Москва : Губарев Евгений Владимирович, 2021. – 752 с.
9. Агротехнопарк как модель интеграции науки, образования и производства [Текст] / А.Е. Шамин, Н.Ю. Кузичева, О.Ю. Анциферова и др. // Никоновские чтения. – 2010. – №15. – С. 188-189.
10. Агротехнопарк как модель интеграции науки, образования и производства [Текст] / И.П. Шаляпина, , Н.Ю. Кузичева, О.Ю. Анциферова и др. // Никоновские чтения. – 2010. – №15. – С. 188

Список литературы на английском языке / References in English

1. Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. O zemleustroytve [The Russian Federation. Laws. About land management] [Electronic resource]: feder. The law: [adopted by the State Duma on May 24, 2001: approved. By the Federation Council on June 6, 2001, No. 78–FZ]: (as amended. dated 18.07.2011 No. 78–FZ) // ConsultantPlus : reference. the legal system. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32132/ (accessed 14.06.2019). [in Russian]
2. Ascherova A.A. Zemleustroitelnoye obespecheniya formirovaniya zemlepolzovaniya agroklastеров [Land management support for the formation of land use of agro-clusters. Search and selection of innovative solutions] / A.A. Ascherova // Poisk i vybor innovatsionnykh resheniy: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (04 maya 2020 g.. g. Kirov) [collection of articles of the International Scientific and Practical Conference (May 04, 2020, Kirov)]. – Ufa: OMEGA SCIENCE, 2020. – pp. 288-290. [in Russian]
3. Bugaeva T.N. Selskoye khozyaystvo Kryma: problemy i perspektivy [Agriculture of the Crimea: problems and prospects] / T.N. Bugaeva // Nauchnyy vestnik: finansy. banki. Investitsii [Scientific Bulletin: finance, banks, investments]. [Electronic resource]. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30586009> (accessed: 12.05.2022). [in Russian]
4. Volkov, S.N. Generalnaya skhema zemleustroystva territorii Rossiyskoy federatsii (soderzhaniye i metody razrabotki) [The general scheme of land management of the territory of the Russian Federation (content and methods of development) [Text]: monograph] / S.N. Volkov // State University of Land Management. – M., 2009. – 370 p. [in Russian]
5. Gainutdinova, G.F. Osobennosti ispolzovaniya zemel v agrokholdinge [Features of land use in agroholding] [Text] / G.F. Gainutdinova // Land management, cadastre and land monitoring. – 2011. – No.7. – pp.40-48. [in Russian]
6. Papaskiri T. V. Organizatsionno-ekonomicheskij mekhanizm formirovaniya sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya v zemleustroytve: dissertatsiya ... doktora ekonomicheskikh nauk: 08.00.05 [Organizational and economic mechanism of formation of computer-aided design system in land management: dissertation ... Doctor of Economics: 08.00.05] [Text] / Papaskiri Timur Valikovich; Moscow. – 2016. – 399 p. [in Russian]
7. Papaskiri T.V. Territorialnaya organizatsiya agrotekhnoparkov v sisteme «nauka – obrazovaniye – proizvodstvo». [Territorial organization of agrotechnoparks in the system "science – education – production"]. [Text]: Monograph/ T.V. Papaskiri, E.P.Ananicheva; edited by T.V.Papaskiri. – М.: GUZ Publishing House, 2013. – 256 p. [in Russian]
8. Ustoychivoye prostranstvennoye razvitiye: PROYEKTIROVANIYE I UPRAVLENIYE [Sustainable spatial development: DESIGN AND MANAGEMENT] / N. V. Komov, S. A. Sharipov, S. I. Nosov et al. – Moscow : Gubarev Evgeny Vladimirovich, 2021. – 752 p.[in Russian]
9. Agrotekhnopark kak model integratsii nauki. obrazovaniya i proizvodstva [Agrotechnopark as a model of integration of science, education and production] [Text] / A.E. Shamin, N.Yu. Kuzicheva, O.Yu. Antsiferova et al. // Nikon readings. - 2010. – No. 15. – pp. 188-189. [in Russian]
10. Agrotekhnopark kak model integratsii nauki. obrazovaniya i proizvodstva [Agrotechnopark as a model of integration of science, education and production] [Text] / I.P. Chaliapina, N.Yu. Kuzicheva, O.Yu. Antsiferova et al. // Nikon readings. - 2010. – No. 15. – p. 188. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.062>

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА РЕЧНЫХ ВОД, ДРЕНИРУЮЩИХ ДОНЕЦКИЙ И КУЗБАССКИЙ УГОЛЬНЫЕ БАСЕЙНЫ

Научная статья

Хорошевская В.О.*

ORCID: 0000-0002-7072-0500,

Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, Россия

* Корреспондирующий автор (vv.z2[at]yandex.ru)

Аннотация

С целью оценки состояния речных вод в 2013 г. были проведены исследования особенностей состава микроэлементов в реках бассейна Нижнего Дона (рек Дон, Северский Донец, Кундрючья) и р. Миус бассейна Западного Приазовья. В пробах воды определяли валовые содержания 70 химических элементов.

Анализ полученных результатов позволил выявить группу микроэлементов, характерных для речных вод Донецкого угольного бассейна, а также установить сезонную изменчивость их содержания в воде изученных рек.

Источники поступления этих металлов в поверхностные воды исследуемых рек региона связаны с угленосной и угледобывающей территорией Восточного Донбасса. В работе проведен сравнительный анализ характерных групп микроэлементов вод речных вод, дренирующих Донецкий и Кузбасский угольные бассейны. Особый интерес представляют собой редкоземельные элементы, характерные для шахтных вод Донецкого угольного бассейна и являющиеся своеобразными трассерами гидрогеохимических процессов. Установлено непосредственное влияние в летне-осеннюю межень воды затопленных шахт Восточного Донбасса на основные гидрохимические характеристики воды р. Дон в его нижнем течении.

Несмотря на сложившиеся природно-хозяйственные условия водосборных бассейнов, наиболее существенные изменения состава речных вод происходят вследствие возрастающего антропогенного влияния. Это наглядно проявляется в бассейне р. Кундрючья, где на протяжении длительного времени складывается напряженная экологическая ситуация.

Полученные экспериментальные данные, результаты которых положены в основу настоящей статьи, вошли в разработанную "Базу данных элементного состава вод Нижнего течения р. Дон и рек бассейна Западного Приазовья", прошедшую государственную регистрацию в 2020 году [21].

Ключевые слова: микроэлементы, р. Дон, р. Северский Донец, р. Кундрючья, р. Миус, р. Обь и её притоки.

COMPARATIVE CHARACTERISTIC OF MICROELEMENT COMPOSITION OF RIVER WATERS DRAINING DONETSK AND KUZBASS COAL BASINS

Research article

Horoshevskaya V.O.*

ORCID: 0000-0002-7072-0500,

Hydrochemical Institute Rostov-on-Don, Russia

* Corresponding author (vv.z2[at]yandex.ru)

Abstract

In order to assess the status of river waters in 2013, studies were carried out on the characteristics of the microelements composition in the rivers of the lower Don basin (the Don, Seversky Donets, Kundryuchya rivers) and the Mius river of the Western Pryazovia basin. In the water samples, the total content of 70 chemical elements was determined.

The results analysis revealed a group of microelements specific to river waters of the Donetsk coal basin, as well as seasonal variability of their amount in the water of the studied rivers.

Sources of these metals in the surface waters of the rivers in the region are connected with the coal-bearing and coal mining territory of the Eastern Donbas. The article conducts a comparative analysis of characteristic groups of microelements of river waters draining Donetsk and Kuzbass coal basins. Of particular interest are the rare earth elements specific to the mine waters of the Donetsk coal basin, which are a kind of tracers of hydrogeochemical processes. The direct influence of flooded mines of the Eastern Donbass on the main hydrochemical characteristics of the Don river water in its lower reach during the time of summer-autumn low water levels was determined.

Despite the prevailing natural-economic conditions of reservoir basins, the most significant changes in the composition of river waters occur due to increasing anthropogenic influence. This is evident in the Kundryuchya river basin, where there has been a tense ecological situation for a long period of time.

The experimental data obtained, the results of which form the basis of this article, were included in the developed "Database of elemental composition of the waters of the Lower reach of the Don river and rivers of the Western Pryazovia basin", which passed state registration in 2020 [21].

Keywords: microelements, the Don River, Seversky Donets, the Kundryuchya, the Mius, the Ob River and its inflows.

Введение

Мощный геохимический поток, создаваемый речными водами, играет важную роль в общепланетарном массообмене между сушей и океаном. Речные воды представляют собой сложные растворы, которые содержат как дисперсные взвеси, так и соединения, находящиеся в истинно растворимом состоянии. В речных водах различают следующие главные формы нахождения химических элементов: ионы простые и комплексные (размер 1 нм и менее); нейтральные молекулы (1 нм и менее); частицы коллоидных размеров (0,001-0,1 мкм), на поверхности которых

находятся сорбированные ионы; высокодисперсные частицы, состоящие преимущественно из глинистых минералов (0,5-2 мкм); более крупные взвешенные частицы, представленные обломочными минералами (2-10 мкм).

В речных водах содержатся также растворимые формы рассеянных элементов, не захваченные в биологический круговорот. На поверхности суши текущие воды характеризуются значениями pH от 4,5 до 8,5. Многие металлы (цинк, хром, медь, бериллий, свинец, кадмий, никель, кобальт и др.) при таких значениях pH могут находиться в растворенном состоянии, выпадать в осадок и вновь переходить в раствор [15, С.2-3]. В составе растворимых соединений в речных водах преобладают макрокомпоненты – анионы (гидрокарбонат, сульфат и хлорид) на долю, которых приходится более 50 % от суммы растворенных веществ, и катионы, среди которых присутствуют кальций – 12,5 %, натрий – 5 %, магний – 3,5 % и калий – 2 %. Все остальные элементы присутствуют в варьирующих микроколичествах [1, С.10]. К микроэлементам (микрокомпонентам) называют химические элементы, встречающиеся в природных водах в концентрациях менее 1 мг/дм³. Микроэлементы представляют собой самую большую группу элементов химического состава природных вод, в которую входят практически все элементы периодической системы Д.И. Менделеева, не относящиеся к группам растворенных компонентов (главные ионы, растворенные газы, биогенные и органические вещества). Условно микроэлементы подразделяются на: типичные катионы (литий, цезий, бериллий, стронций, барий и др.); ионы тяжелых металлов (медь, серебро, золото, свинец, железо, никель, кобальт и др.); амфотерные комплексообразователи (хром, молибден, ванадий, марганец); типичные анионы (бром, йод, фтор, бор); радиоактивные элементы (уран, родий, торий и др.) [14, С.99-100].

Очевидно, что разнообразие растворимых форм элементов и геохимические и биоклиматические различия водосборных площадей приводят к значительной вариации концентраций микроэлементов в водах различных рек. Далее представлен анализ и сравнение характеристик компонентного состава микроэлементов речных вод, которые дренируют Донецкий и Кузбасский угольные бассейны.

Методика исследований микроэлементов в реках, дренирующих Донецкий угольный бассейн. В качестве объектов исследований были выбраны реки бассейна Нижнего Дона - Дон, Северский Донец, Кундрючья) и бассейна Западного Приазовья - р. Миус (табл. 1). Водосборы рек Северский Донец, Кундрючья и Миус находятся в районе Донецкого угольного бассейна. Пробы воды отбирали в основные гидрологические фазы (весенний паводок, летняя, осенняя и зимняя межени). Для установления влияния стока р. Северский Донец на р. Дон пробы отбирали на участках, расположенных в 1 км ниже гидроузла г. Константиновск, выше впадения р. Северский Донец (эта проба использовалась в качестве фоновой) и ниже по течению в районе устья [2]. Всего было отобрано 20 проб.

Таблица 1 – Географические координаты пунктов отбора проб воды в реках бассейна Нижнего Дона и р. Миус

Расположение пункта отбора проб	Широта	Долгота
р. Дон, г. Константиновск, 1 км ниже гидроузла	47°56'86" с. ш.	41°09'91" в. д.
р. Дон, устье	47°07'56" с. ш.	39°30'35" в. д.
р. Северский Донец, г. Каменск-Шахтинский	48°20'05" с. ш.	40°16'30" в. д.
р. Кундрючья, ст. Верхнекундрюченская	47°45'15" с. ш.	40°53'35" в. д.
р. Миус, д. Андреево-Милентьево	47°30'12" с. ш.	38°81'13" в. д.

В нефилтрованных пробах воды определяли валовое содержание (сумму растворенных и взвешенных форм) 70 элементов. Анализы выполняли в специализированной аккредитованной лаборатории ВИМС (ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского” г. Москва) масс-спектральным методом (МС) с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионным с индуктивно-связанной плазмой (АЭ), по методикам НСАМ № 480-ХС [2] и ГОСТ 31870-2012 [3]. Погрешность определений соответствует нормам погрешности по ГОСТ 27384-2002 [4]. Полученные экспериментальные данные вошли в разработанную “Базу данных элементного состава вод Нижнего течения р. Дон и рек бассейна Западного Приазовья”, прошедшую государственную регистрацию в 2020 г. [21].

Результаты исследований

В результате анализа полученных данных установлено, что в воде всех исследуемых рек, дренирующих Донецкий угольный бассейн, скандий, хром, рутений, родий, олово, палладий, серебро, индий, теллур, осмий, иридий, платина, золото, висмут находятся в следовых количествах. В р. Дон на участке в 1 км ниже гидроузла г. Константиновска также не обнаруживаются: уран, бериллий, ванадий, селен, ниобий, тулий, лутеций. Ниобий не обнаружен также и в воде р. Северский Донец. Тантал отсутствовал в воде всех рек, кроме р. Кундрючья.

Для сравнительного анализа были рассчитаны среднегодовые концентрации элементов, представляющих собой арифметические значения концентраций всех элементов, полученных для каждого пункта наблюдений как в различные сезоны (весенний паводок, летняя, осенняя и зимняя межени), так и в целом за год (табл. 2).

Рассчитанные среднегодовые концентрации сопоставлялись с опубликованными данными других исследователей. Так, в работе [8] приведены средние содержания взвешенных форм для 31 химического элемента в речных водах РФ. Проведенный анализ показал, что ряд микроэлементов в течении года присутствует в воде рек Донецкого угольного бассейна в концентрациях ниже, чем в среднем в реках РФ, а концентрации других микроэлементов значительно выше [20].

Обсуждение результатов

Проведенный анализ суммарных концентраций микроэлементов в воде рек Донецкого угольного бассейна позволил выделить реки с их максимальными значениями, к ним относятся р. Кундрючья и р. Миус (рис.1).

Река Кундрючья – правобережный приток р. Северский Донец. Водосбор реки расположен в районе Донецкого угольного бассейна со сложным геологическим рельефом, ложе реки также пересекают тектонические разломы. Здесь расположены как затопленные, так и действующие угольные шахты, что не исключает воздействия шахтных вод на формирование элементного состава воды реки [20].

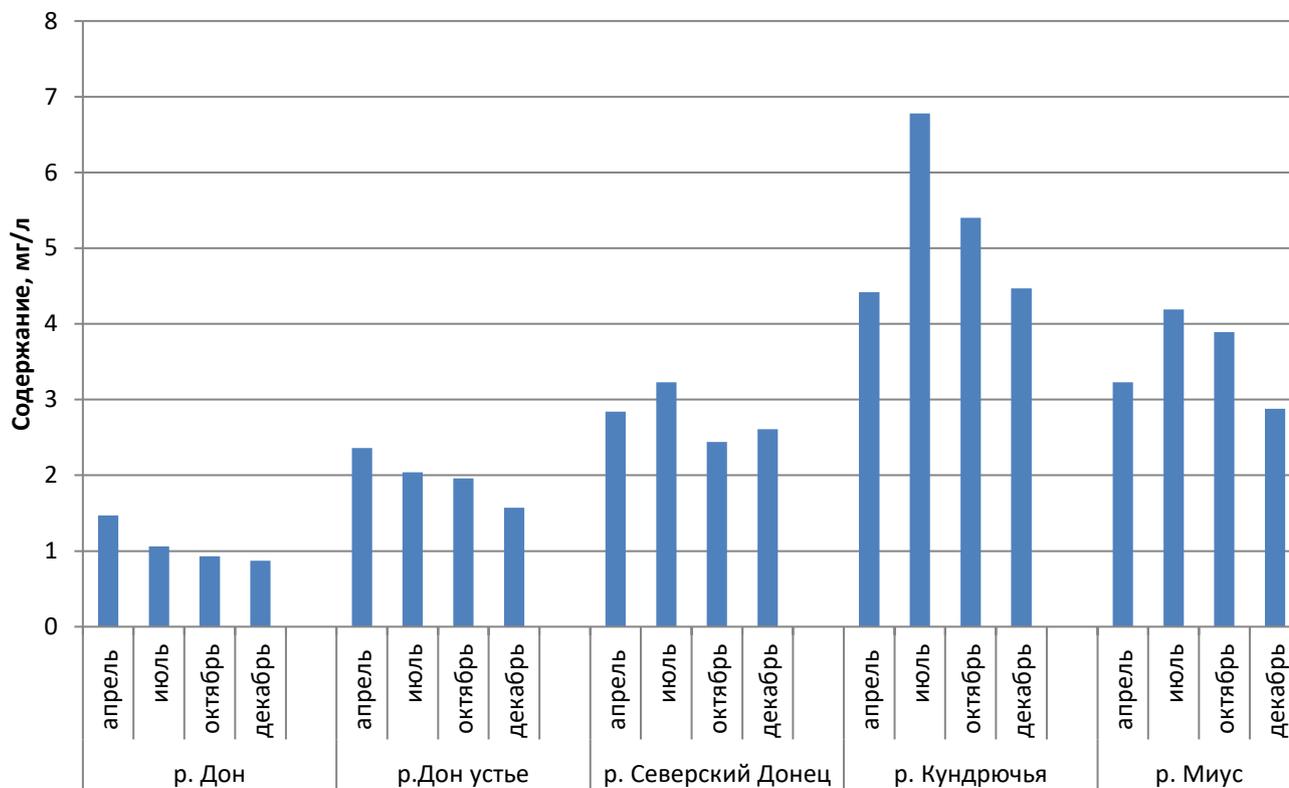


Рис.1 – Распределение суммарных концентраций микроэлементов по сезонам в воде рек, дренирующих Донецкий угольный бассейн (реки бассейна Нижнего Дона и р. Миус)

Истоки реки Миус, впадающей в Миусский лиман Азовского моря, также связаны с Донецким угольным бассейном, с угольными шахтами и тектоническими разломами. Формирование химического состава шахтных вод происходит под действием двух групп факторов – природных и антропогенных, но роль природных геологических факторов в большинстве случаев является решающей [19, С.1]. Основной источник шахтных вод – подземные воды, дренируемые горными выработками, а дополнительным источником может быть фильтрация в горные выработки атмосферных осадков и поверхностных вод из прилегающих водных объектов. Химический состав шахтных вод определяется исходным составом формирующих их подземных вод и может существенно изменяться как во времени, так и по мере отработки угольных пластов. Шахтные воды формируются путём смешения подземных вод разных горизонтов, взаимодействия их с рудничной атмосферой и породами, вскрытыми горными выработками. Химический состав и общая минерализация их отличаются от подземных вод, окружающих горные выработки, что связано с окислением шахтных вод, активизацией выщелачивания горных пород, изменением газового и бактериального состава, а также с их загрязнением нефтепродуктами, маслами и др. [19, С.2].

В 2013 г. среднегодовая водность исследуемых рек в целом за год была значительно ниже средней многолетней. Так для р. Дон в нижнем течении (гидропост ст. Раздорская) она составляла 75 %; р. Северский Донец (гидропост г. Белая Калитва) – 63 %; р. Кундрючья (гидропост г. Красный Сулин) – 61 %; р. Миус (гидропост г. Матвеев Курган) – 47 % [13]. При снижении водности уменьшается степень разбавления загрязняющих веществ в воде, а, значит, возрастают их концентрации, что позволяет сделать вывод о наличии возможных стационарных источников загрязнения.

Для большинства микроэлементов характерна сезонная изменчивость. Так в реках Северский Донец, Кундрючья и Миус повышенные концентрации микроэлементов в воде отмечались в летнюю межень, а в р. Дон – в паводок. Повышение концентраций микроэлементов в летнюю межень вероятнее всего связано с увеличением доли грунтовых вод в питании рек, содержащих большое количество микроэлементов и обогащающихся ими речные воды. Снижение значений суммарных концентраций микроэлементов для рек Северский Донец и Кундрючья отмечалось в осеннюю межень, что вероятнее всего является следствием десорбции микроэлементов донными отложениями, в связи с изменением в них физико-химических параметров по окончании жизненного цикла фитопланктона и начала деструкции его биомассы [20].

Согласно литературным данным [8, С.10-11], аналогичные исследования были проведены в 1990-1994 гг. в пределах Кузбасского угольного бассейна, на реках бассейна Средней Оби (рр. Томь, Тым, Кеть, Чулым, Васюган, Парабель, Чай). В целом содержания многих микроэлементов в водах изученных рек близки к соответствующим показателям для

рек мира. Однако на этом фоне, отражающем сложившиеся природно-хозяйственные условия в водосборных бассейнах, отмечающиеся существенные изменения состава речных вод в микроэлементном составе могут быть следствием значительного антропогенного влияния. Особенно сильно эти отклонения проявляются в бассейне р. Томь. Также отмечается обнаруженное аномальное увеличение содержаний редких и редкоземельных элементов в водах р. Обь в нескольких пунктах на участке от г. Колпашево до г. Стрежевого. По данным Росгидромета в 1990-1993 гг. основными источниками загрязнения р. Обь в районе г. Новосибирск являлись сточные воды предприятий теплоэнергетики, металлургии, а в наибольшей степени предприятий оборонного комплекса [9], [10], [11], [12]. В створах г. Колпашево ниже по течению г. Новосибирск в 1990 - 1992 гг. не наблюдали случаев высокого и экстремально высокого загрязнения по показателям (исключая единичный случай экстремально высокого загрязнения фенолами), определяемым на государственной сети наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши Росгидромета. По данным Росгидромета одним из крупных и наиболее загрязненных притоков р. Обь является р. Томь, дренирующая территорию Кузбасского угольного бассейна. Бассейн р. Томь в районе г. Междуреченск был подвержен влиянию сбросов неочищенных сточных вод угледобывающих предприятий, расположенных выше города. Кроме того, следует учитывать влияние на качество воды р. Томь ее притоков.

Приведем сравнительную характеристику микроэлементного состава речных вод, дренирующих Донецкий (реки бассейна Нижнего Дона и Западного Приазовья) и Кузбасский (реки бассейна Средней Оби) угольные бассейны (табл. 2). В качестве основной региональной закономерности, наиболее ярко проявляющейся для рек Кундрючья и Миус, можно выделить высокие концентрации урана, стронция, никеля, лития по сравнению как с концентрациями в речных водах в целом, так и в водах рек бассейна Средней Оби.

При сопоставлении выявлено, что в воде рек, содержится больше урана, стронция, никеля, лития по сравнению как с концентрациями в речных водах в целом так и в водах рек бассейна Средней Оби.

Для реки Кундрючья характерны как повышенные суммарные концентрации микроэлементов (рис. 2), так и максимальные концентрации редкоземельных элементов, таких как лантан, церий, европий, тербий, иттербий (табл. 2).

К группе редкоземельных элементов (РЗЭ) или лантаноидов относятся элементы, входящие в 3-ю группу таблицы Менделеева от лантана до лютеция (всего 14 элементов). Их делят на две группы: легкие РЗЭ (LREE) – лантан, церий, празеодим, неодим, самарий и тяжелые РЗЭ (HREE) – европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций; иногда на три: легкие (лантан - празеодим), средние (неодим - гадолиний), тяжелые (тербий - лютеций) [22].

Интерес к исследованию РЗЭ в водах связан с тем фактом, что профиль их распределения в воде в целом повторяет профиль распределения этих элементов в водовмещающих породах. Выявлено, что характер распределения РЗЭ является важным показателем для понимания природы водных растворов в системе “вода-порода”, который в ряде случаев, может быть использован для оценки особенностей эволюции вод различного состава. Миграция РЗЭ в поверхностных водах осуществляется в виде растворенной (коллоидов) и взвешенной формы (взвеси).

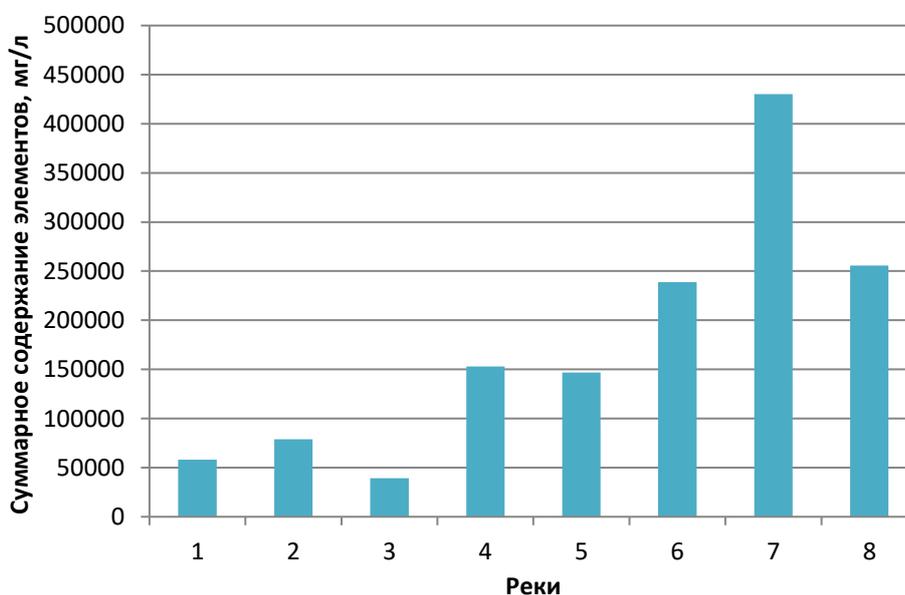


Рис. 2 – Гистограммы распределения годовых суммарных концентраций элементов в речных водах, дренирующих Кузбасский (реки бассейна Средней Оби) и Донецкий угольные бассейны (реки бассейна)

Примечание: 1 – р. Обь (в среднем течении), 2 – Притоки р. Обь (реки Тым, Кеть, Чулым, Васюган, Парабель, Чая); 3 – р. Томь; 4 – р. Дон (ниже г. Кантонтиновск, выше впадения р. Северский Донец); 5 – р. Дон (устье); 6 – р. Северский Донец; 7 – р. Кундрючья; 8 – р. Миус

К растворенным формам элементов, как правило, относят содержание элементов в фильтрате, полученном на фильтрах 0,45 мкм, как наиболее часто принятое в практике разделения фаз. При этом наиболее тонкая коллоидная часть взвешенных веществ, проходит через фильтр этой размерности и может нести значительное количество РЗЭ. Из ряда работ известно, что главной формой переноса РЗЭ в реках является взвешенная форма. Содержание РЗЭ во взвеси разных рек мира могут различаться весьма значительно.

Таблица 2 – Среднегодовые валовые содержания элементов в речных водах, дренирующих Кузбасский (реки бассейна Средней Оби) и Донецкий (реки бассейна Нижнего Дона и р. Миус) угольные бассейны

Элемент	Водные объекты								Концентрации взвешенных форм в речных водах по [8], мг/л	Взвешенные формы от суммарного выноса, % по [7]
	Кузбасский угольный бассейн			Донецкий угольный бассейн						
	р. Обь (в среднем течении), [18], мг/л	Притоки р. Обь, [18], мг/л	р. Томь, [18], мг/л	р. Дон (фон), мг/л	р. Дон (устье), мг/л	р. Северский Донец, мг/л	р. Кундрючья, мг/л	р. Миус, мг/л		
Концентрации микроэлементов в водах рек дренирующих Донецкий угольный бассейн выше концентраций в водах рек дренирующих Кузбасский угольный бассейн										
Стронций	0,186	0,137	0,20	1,08	0,97	1,85	3,125	2,075	–	–
Никель	0,001	0,0012	0,0011	0,0024	0,0024	0,0037	0,02	0,013	0,0025 ¹⁾	–
Медь	0,0023	0,0017	0,0019	0,004	0,0025	0,00313	0,0046	0,0035	0,037	83,1
Литий	0,007	0,0088	0,0092	0,01973	0,0165	0,03025	0,14	0,145	0,0014	86,4
Рубидий	0,00248	0,00089	0,00063	0,0029	0,00252	0,0066	0,00198	0,041	0,055	98,6
Концентрации микроэлементов в водах рек дренирующих Донецкий угольный бассейн ниже концентраций в водах рек дренирующих Кузбасский угольный бассейн										
Цинк	0,0302	0,0279	0,098	0,0037	0,0048	0,005	0,006	0,0043	0,143	87,7
Кадмий	0,0002	0,0002	0,0005	0,00003	0,00003	0,00004	0,00003	0,00004	0,00032	59,8
Гафний	0,0002	0,0002	0,0002	0,00003	0,00001	0,00001	0,00003	0,00002	–	–
Таллий	0,0013	0,0036	0,0015	н/п	н/п	0,00001	0,00002	0,00011	–	–
Хром	0,0028	0,0026	0,0021	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	–	–
Скандий	0,00025	0,00014	0,00025	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	–	–
Лютеций	0,00014	0,00007	0,00013	н/п	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	–	–
Самарий	0,00018	0,00014	0,00017	0,00003	0,00007	0,00007	0,00021	0,00005	–	–
Концентрации микроэлементов в водах рек дренирующих Донецкий угольный бассейн, не сопоставимые с концентрациями в водах рек, дренирующих Кузбасский угольный бассейн										
Марганец	0,0189	0,0431	0,0085	0,0625	0,0518	0,064	0,121	0,083	0,50	63,5
Железо	0,22	0,79	0,15	0,0888	0,228	0,142	0,433	0,187	23,5	–

Окончание таблицы 2 – Среднегодовые валовые содержания элементов в речных водах, дренирующих Кузбасский (реки бассейна Средней Оби) и Донецкий (реки бассейна Нижнего Дона и р. Миус) угольные бассейны

Элемент	Водные объекты								Концентрации взвешенных форм в речных водах по [8], мг/л	Взвешенные формы от суммарного выноса, % по [7]
	Кузбасский угольный бассейн				Донецкий угольный бассейн					
	р. Обь (в среднем течении), [18], мг/л	Притоки р. Обь, [18], мг/л	р. Томь, [18], мг/л	р. Дон (фон), мг/л	р. Дон (устье), мг/л	р. Северский Донец, мг/л	р. Кундрючья, мг/л	р. Миус, мг/л		
Барий	0,0472	0,0343	0,0366	0,035	0,036	0,039	0,055	0,033	0,280	91,8
Свинец	0,008	0,0011	0,0018	0,0029	0,0025	0,0066	0,00198	0,041	–	–
Кобальт	0,0006	0,0005	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,001	0,0005	0,0083	97,1
Сурьма	0,0004	0,0009	0,0004	0,00028	0,00022	0,00048	0,00069	0,00096	0,0009	50,0
Цезий	0,00013	0,00004	0,00012	0,00004	0,00002	0,0001	0,00006	0,00058	–	–
Лантан	0,00047	0,00035	0,00049	0,00018	0,00031	0,00045	0,0008	0,00023	–	–
Церий	0,00092	0,00068	0,00097	0,00029	0,00076	0,00036	0,0019	0,00053	–	–
Европий	0,00002	0,00001	0,00001	0,00001	0,00002	0,00002	0,00005	0,00002	–	–
Тербий	0,00003	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00002	0,00004	0,00001	–	–
Иттербий	0,00003	0,00002	0,00002	0,00001	0,00003	0,00002	0,00006	0,00002	–	–
Концентрации остальных микроэлементов в реках, дренирующих Донецкий угольный бассейн										
Алюминий	–	–	–	0,0393	0,0988	0,077	0,352	0,099	38,2	99,8
Титан	–	–	–	0,006	0,0079	0,0074	0,0243	0,0124	184,0	92,8
Торий	–	–	–	0,00004	0,00004	0,00003	0,00012	0,00005	0,0046	99,6
Галлий	–	–	–	0,00004	0,00007	0,00006	0,00014	0,00012	0,0083	98,8
Бор	–	–	–	0,129	0,129	0,147	0,223	0,265	0,032	64,0
Мышьяк	–	–	–	0,004	0,0034	0,0053	0,0050	0,0092	0,0023	53,4
Стронций	–	–	–	1,08	0,97	1,85	3,125	2,075	0,069	46,3
Уран	–	–	–	0,003	0,003	0,00425	0,0121	0,0071	0,00014	32,2
Ванадий	–	–	–	14	0,005	0,0061	0,0133	0,095	0,001 ¹⁾	–
Молибден	–	–	–	0,0024	0,0023	0,0038	0,0026	0,0083	0,0014 ¹⁾	–

Примечание: ¹⁾ Содержание растворенных форм по данным [7]; “н/н” – ниже предела обнаружения; “–” – данные отсутствуют

Уровень концентраций и подвижность РЗЭ в водных средах сульфатного состава значительно выше, чем в кислых гидрокарбонатных. Формирующиеся в сульфатных водах устойчивые комплексные соединения РЗЭ по степени миграционных свойств сопоставимы с легко подвижными соединениям [6, С.1-2]. В 2013 г. по данным Росгидромета среднегодовое содержание сульфатов в воде р. Северский Донец фиксировалось на уровне 3,5-15,54 ПДК, а в воде р. Кундрючья 12-16 ПДК (ПДК -100,0 мг/л). В то время как в воде р. Оби (в средней её части) на момент проводимых исследований количество сульфатов равнялось 14,5 мг/л, в воде её притоков 7,7 мг/л, а в воде р. Томь - 17,4 мг/л, т.е. было значительно ниже ПДК. Этими геохимическими различиями дренируемых территорий и объясняется различие в концентрациях редкоземельных металлов, в водах рек дренирующих различные угольные бассейны – Кузбасский и Донбасский. Хотя качественные составы в реках обоих дренируемых угольных бассейнов схожи и в них значительно преобладают легкие и средние группы редкоземельных элементов (табл. 2).

Чаще всего основными источниками антропогенного загрязнения поверхностных водотоков редкоземельными элементами являются фосфорные удобрения, золотвалы крупных ТЭЦ, месторождения сульфидных руд, отходы горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий, а также неочищенные хозяйственно-бытовые стоки урбанизированных территорий [15].

Как известно, в 90-е годы прошлого века началась реструктуризация угледобывающей отрасли, в основу которой легла ликвидация нерентабельных шахт на Восточном Донбассе, в том числе путем затопления. Именно р. Кундрючья, где в 2013 г. фиксировались превышения концентраций по ряду редкоземельных элементов, больше всего испытывала влияние техногенных подземных вод ликвидируемых шахт (рис. 3) [17]. Поскольку р. Кундрючья является притоком р. Северский Донец, а тот в свою очередь - р. Дон, то влияние шахтных вод можно проследить в р. Дон (среднегодовой сток р. Дон - 26,2 км³) ниже впадения р. Северский Донец (среднегодовой сток р. Северский Донец – 3,7 км³). В воде устьевой части р. Дон фиксируются возрастания относительно фонового створа концентраций тех же редкоземельных элементов, характерных для шахтных вод и являющихся своеобразными трассерами гидрогеохимических процессов (рис.4). Максимальными концентрациями отличается церий. По данным [6] для всех типов поверхностных вод обычно отмечается дефицит церия, который меньше мигрирует в растворах и задерживается в подземных водах зоны гипергенеза благодаря гидролизу. Этот факт подтвержден и другими исследователями, например, при нормировании содержания РЗЭ на кларк речных вод Хакасии на профиле сохранялась явная положительная аномалия церия, особенно ярко проявляющаяся для пресных подземных вод (рис. 5).

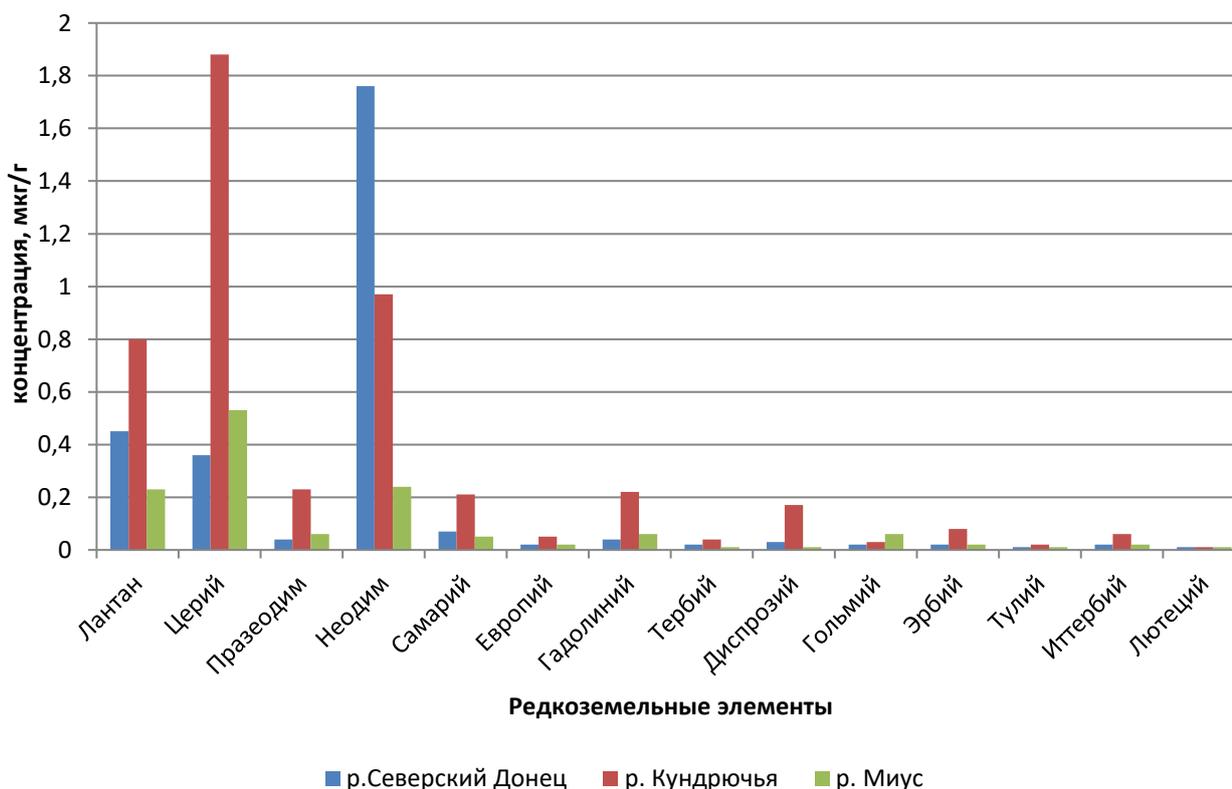


Рис. 3 – Среднегодовые концентрации редкоземельных элементов в воде рек, непосредственно дренирующих Донецкий угольный бассейн

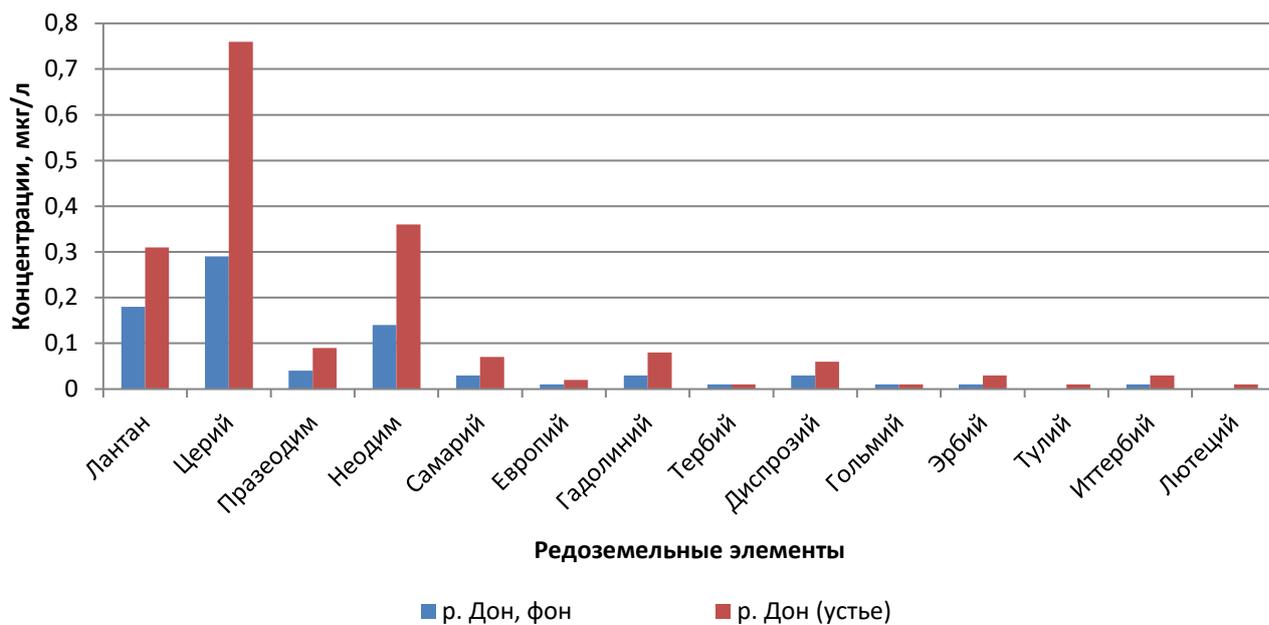


Рис. 4 – Среднегодовые концентрации редкоземельных элементов в воде р. Дон



Рис. 5 – Профиль распределения редкоземельных элементов в водах Хакассии при нормировании на кларк речной воды [5]

Повышенные содержания церия в р. Кундрючья в летне-осеннюю межень (рис.6) свидетельствовали о поступлении на поверхность подземных вод из зоны гипергенеза, чему способствовала ликвидация шахт в районе г. Красный Сулин путем затопления [17].

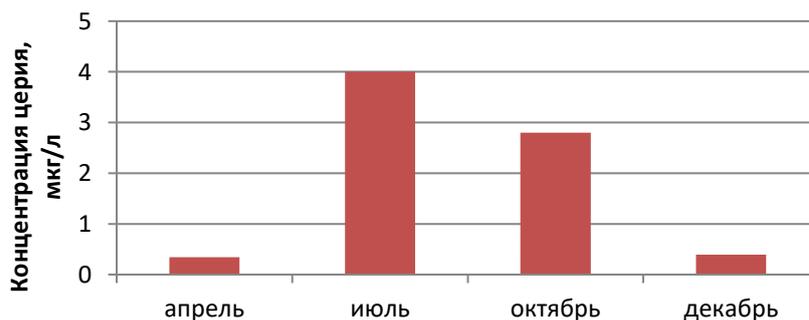


Рис. 6 – Распределение церия в воде р. Кундрючья по сезонам

Кроме того, содержания церия возрастали в 2,6 раза в целом за год и в воде устьевой части р. Дон по сравнению фоновым створом, расположенным выше впадения р. Северский Донец. Следует отметить, что в устье р. Дон концентрации церия в воде имеют такую же сезонную динамику, как и р. Кундрючья, с максимумом в летне-осеннюю межень (рис.7), что свидетельствует о непосредственном влиянии в летне-осеннюю межень воды затопленных шахт Восточного Донбасса на основные гидрохимические характеристики воды р. Дон в нижнем течении.

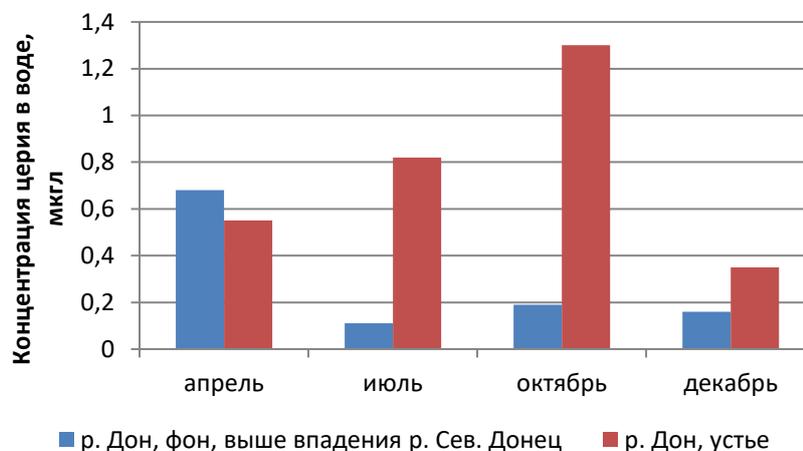


Рис. 7 – Распределение церия в воде р. Дон по сезонам

Заключение

Исследование особенностей микроэлементного состава вод являются основой для установления степени загрязнения рек региона различными микроэлементами (включая тяжелые металлы и редкоземельные элементы) и источников их поступления. На основании проведенных исследований установлено, что источники поступления этих металлов в поверхностные воды исследуемых рек региона связаны с угленосной и угледобывающей территорией Восточного Донбасса. Поскольку в примесях углей этого региона присутствует достаточно большое количество различных элементов, с большой долей уверенности можно говорить, что микроэлементы, присутствующие в воде рек, дренирующих Донбасский и Кузбасский угольные бассейны, имеют природно - антропогенный генезис. Однако на этом фоне, отражающем сложившиеся природно-хозяйственные условия в водосборных бассейнах, отмечаются существенные изменения состава речных вод ввиду возрастающей антропогенной нагрузки, что наиболее наглядно проявляется в бассейнах р. Кундрючья и р. Томь. Концентрации церия, выбранного нами в качестве природного трассера, позволили определить степень влияния вод, поступающих из затопленных шахт Восточного Донбасса на формирование гидрохимического состава р. Дон в нижнем течении, что частично объясняет причины ряда экологических проблем, испытываемых рекой в этом районе в последние десятилетия.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии / О.А. Алекин. – Л.: Гидрометеиздат, 1953. – 296 с.
2. Методика "ICP-MS определение элементного состава природных и питьевых вод со степенью минерализации до 2000 мг/л" НСАМ №480-х. ФГУП "ВИМС".
3. ГОСТ 31870-2012. Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии. Госстандарт. - 2013. – 19 с.
4. ГОСТ 27384-2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств (с Изменением N 1). Госстандарт. - 2004. – 7 с.
5. Гусева, Н. В. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах Хакасии / Н. В. Гусева, Ю. Г. Копылова, С. К. Леушина // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 141-146.
6. Вах Е.А. Редкоземельные элементы в природных и техногенных водах Дальнего Востока России: автореф. дисс. канд. геол. мин. Наук / Вах, Е.А.- Томск: Политехнический институт. – 2012. – 22с.
7. Геохимическое земледование: Учебное пособие для вузов по специальности «География» / Под ред. В. В. Добровольский. – М.: Владос, 2008. – 206 с.
8. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии.- М.: Наука, 1983. - 160 с.
9. Ежегодник качества поверхностных вод СССР за 1990 год – Изд-во: Обнинск. ВНИИГМИ – МЦД – 1991. – 466 с.
10. Ежегодник качества поверхностных вод СССР за 1991 год – Изд-во: Обнинск. ВНИИГМИ – МЦД – 1992. – 455 с.
11. Ежегодник качества поверхностных вод СССР за 1992 год – Изд-во: Обнинск. ВНИИГМИ – МЦД – 1993.387 с.
12. Ежегодник качества поверхностных вод СССР за 1993 год – Изд-во: Обнинск. ВНИИГМИ – МЦД – 1994.480 – с.
13. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник / Под ред. А.М. Никанорова, 2013 – 568 с.
14. Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник. / А.М. Никаноров. – Изд. 3-е, дополненное. – Ростов: Д: "НОК", 2008. – 461 с.

15. Добровольский В.В. Основы биогеохимии: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Добровольский – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
16. Основной солевой состав и редкоземельные элементы как индикаторы экологического состояния рек Южного Приморья / Е.А. Вах, Г.Ю. Павлова, Т.А. Михайлик и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 39-49.
17. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно - нарушенных геосистем Восточного Донбасса: монография / В.Е. Закруткин, Г.Ю. Скляренко, Е.Н. Бакаева и др. // Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – 172 с.
18. Савичев О. Г. Исследование эколого-геохимического состояния речных вод бассейна Средней Оби: автореф. дисс канд. геогр. наук / Савичев О. Г. – Томск: Политехнический институт, 1996. – 24 с.
19. Улицкий А. А. Геохимические особенности шахтных вод Донбасса / А. А. Улицкий // Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина Серия: Геология. География. Экология. – Харьков: Издательство ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. – № 31. – С.79–82.
20. Хорошевская В.О. Оценка состояния речных вод бассейнов Нижнего Дона и Западного Приазовья по содержанию микроэлементов / Хорошевская В.О. // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно - практической конференции, г. Сочи, 08-14 октября 2018 г. – Том II. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С.212-219.
21. Хорошевская В.О. База данных элементного состава вод Нижнего течения р. Дон и рек бассейна Западного Приазовья, № 2020621440 государственной регистрации от 17 августа 2020 г. / В.О Хорошевская., А.М. Шевченко // Правообладатель: ФГБУ «ГХИ».
22. Behavior of major and minor elements in a temperate river estuary to the coastal sea / S. Patra, C.Q. Liu, F.S. Wang et al. // International journal of Environmental Science and Technology. – 2012. – V. 9. – P. 647-654.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Alekin O.A. Osnovy gidrohimii [Fundamentals of hydrochemistry] / O.A. Alekin. – L.: Gidrometeoizdat, 1953. – 296 p. [in Russian]
2. Metodika "ICP-MS opredelenie jelementnogo sostava prirodnyh i pit'evykh vod so stepen'ju mineralizacii do 2000 mg/l" [Method "ICP-MS determination of the elemental composition of natural and drinking waters with a degree of mineralization up to 2000 mg/l"] NSAM №480-h. FGUP "VIMS". [in Russian]
3. GOST 31870-2012. Voda pit'evaja. Opredelenie soderzhanija jelementov metodami atomnoj spektrometrii. Gosstandart. [Drinking water. Determination of the content of elements by methods of atomic spectrometry. Gosstandart]. – 2013. – 19 p. [in Russian]
4. GOST 27384-2002. Voda. Normy pogreshnosti izmerenij pokazatelej sostava i svojstv (s Izmeneniem N 1). Gosstandart. [Water. Standards of measurement error of indicators of composition and properties (with Change No. 1). Gosstandart]. – 2004. – 7 p. [in Russian]
5. Guseva N. V. Rasprostranennost' redkozemel'nyh jelementov v prirodnyh vodah Hakassii [The prevalence of rare earth elements in the natural waters of Khakassia] / N. V. Guseva, Ju. G. Kopylova, S. K. Leushina // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2013. – Vol. 322. – № 1. – P. 141-146. [in Russian]
6. Vah E.A. Redkozemel'nye jelementy v prirodnyh i tehnogennykh vodah Dal'nego Vostoka Rossii [Rare earth elements in natural and technogenic waters of the Russian Far East]: avtoref. diss kand. geol. min. nauk/ E.A. Vah. – Tomsk: Politehnicheskij institut, 2012. – 22 p. [in Russian]
7. Geohimicheskoe zemlevedenie: Uchebnoe posobie dlja vuzov po special'nosti "Geografija" [Geochemical geography: Textbook for universities in the specialty "Geography"] / Ed. by V. V. Dobrovol'skij. – M.: Vlados, 2008. – 206 p. [in Russian]
8. Gordeev V.V. Rechnoj stok v okean i cherty ego geohimii [River runoff into the ocean and features of its geochemistry]. – M.: Nauka, 1983. – 160 p. [in Russian]
9. Ezhegodnik kachestva poverhnostnyh vod SSSR za 1990 god [Yearbook of surface water quality of the USSR for 1990] – Izd - vo: Obninsk. VNIIGMI – MCD – 1991. – 466 p. [in Russian]
10. Ezhegodnik kachestva poverhnostnyh vod SSSR za 1991 god [Yearbook of surface water quality of the USSR for 1991] – Izd - vo: Obninsk. VNIIGMI – MCD – 1992. – 455 p. [in Russian]
11. Ezhegodnik kachestva poverhnostnyh vod SSSR za 1992 god [Yearbook of surface water quality of the USSR for 1992] – Izd - vo: Obninsk. VNIIGMI – MCD – 1993. – 387 p. [in Russian]
12. Ezhegodnik kachestva poverhnostnyh vod SSSR za 1993 god [Yearbook of surface water quality of the USSR for 1993] – Izd - vo: Obninsk. VNIIGMI – MCD – 1994. – 480 p. [in Russian]
13. Kachestvo poverhnostnyh vod Rossijskoj Federacii. Ezhegodnik [Quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook] / Pod red. A.M. Nikanorova. – 2013 – 568 p. [in Russian]
14. Nikanorov A.M. Gidrohimiya: Uchebnik [Hydrochemistry: Textbook]. / A.M. Nikanorov. – Izd. 3-e, dopolnennoe. – Rostov. – "NOK, 2008. – 461 p. [in Russian]
15. Dobrovol'skij V.V. Osnovy biogeohimii: Uchebnik dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij [Fundamentals of biogeochemistry: Textbook for students. higher textbook establishments] / V. V. Dobrovol'skij. – M.: Izdatel'skij centr "Akademija", 2003. – 400 p. [in Russian]
16. Osnovnoj solevoj sostav i redkozemel'nye jelementy kak indikatory jekologicheskogo sostojanija rek Juzhnogo Primor'ja [Basic salt composition and rare earth elements as indicators of the ecological state of the rivers of Southern Primorye] / E.A. Vah, G.Ju. Pavlova, T.A. Mihajlik et al. // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2017. – Vol. 328. – № 1. – P. 39-49. [in Russian]

17. Poverhnostnye i podzemnye vody v predelah tehnogenno narushennyh geosistem Vostochnogo Donbassa: monografija [Surface and underground waters within the technogenically disturbed geosystems of the Eastern Donbass: monograph] / V.E. Zakrutkin, G.Ju. Skljarenko et al. // Juzhnyj federal'nyj universitet. – Rostov-na-Donu: Izdatel'stvo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2016. – 172 p. [in Russian]

18. Savichev O. G. Issledovanie jekologo - geohimicheskogo sostojanija rechnyh vod bassejna Srednej Obi [Study of the ecological and geochemical state of river waters in the Middle Ob basin]: avtoref. diss kand. geogr. nauk / Savichev O. G. – Tomsk: Politehnicheskij institut, 1996. – 24 p. [in Russian]

19. Ulickij A. A. Geohimicheskie osobennosti shahtnyh vod Donbassa [Geochemical features of Donbass mine waters] / A.A. Ulickij // Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo universiteta im. V. N. Karazina Serija: Geologija. Geografija. Jekologija. – Har'kov: Izdatel'stvo HNU im. V. N. Karazina, 2009. – Vol. 31. – P.79-82. [in Russian]

20. Horoshevskaja V.O. Ocenka sostojanija rechnyh vod bassejnov Nizhnego Dona i Zapadnogo Priazov'ja po sodержaniju mikrojelementov [Assessment of the state of river waters in the basins of the Lower Don and the Western Azov region by the content of trace elements] / V.O. Horoshevskaja // Vodnye resursy Rossii: sovremennoe sostojanie i upravlenie: sbornik materialov Vserossijskoj nauchno - praktičeskoj konferencii, g. Sochi, 08-14 oktjabrja 2018 g. – Vol. II. – Novočerkassk: Lik, 2018. – P.212-219. [in Russian]

21. Horoshevskaja V.O. Baza dannyh jelementnogo sostava vod Nizhnego tečenija r. Don i rek bassejna Zapadnogo Priazov'ja [Database of the elemental composition of the waters of the Lower reaches of the river . Don and the rivers of the basin of the Western Azov Sea] / V.O. Horoshevskaja, A.M. Shevchenko // № 2020621440 gosudarstvennoj registracii ot 17 avgusta 2020 g. Pravoobladatel': FGBU "GHI". [in Russian]

22. Behavior of major and minor elements in a temperate river estuary to the coastal sea / S. Patra, C.Q. Liu, F.S. Wang et al. // International journal of Environmental Science and Technology. – 2012. – V. 9. – P. 647-654.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.063>

**ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВОДЫ НА СОСТАВ ОСТАТОЧНЫХ СТЕКОЛ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ
В ОЛИВИНЕ В БАЗАЛЬТАХ ВУЛКАНА МЕНЬШИЙ БРАТ, КАЛЬДЕРА МЕДВЕЖЬЯ (О. ИТУРУП)**

Научная статья

Низаметдинов И.Р.*

ORCID: 0000-0002-9213-0958,

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия,
Институт Геологии и Минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

* Корреспондирующий автор (inizametdinov[at]igm.nsc.ru)

Аннотация

В данной работе представлены результаты определения состава остаточных стекол расплавных включений во вкрапленниках оливина из магнезиальных посткальдерных базальтов вулкана Меньший Брат, о. Итуруп. По данным энерго-дисперсионной спектроскопии остаточные стекла сильно отличаются от составов исходных расплавов и обогащены по сравнению с последними по Al_2O_3 и SiO_2 . Помимо этого, анализы составов этих стекол имеют значительный дефицит суммы оксидов. Наиболее вероятно, что это явление с высокими исходными концентрациями воды в захваченных расплавах. Наличие воды в стеклах подтверждено методом Рамановской спектроскопии. Накопление воды вследствие кристаллизации оливина-хозяина на стенках включений могло задерживать кристаллизацию плагиоклаза и способствовать накоплению глинозема в поздних, остаточных порциях захваченного расплава.

Ключевые слова: расплавные включения, летучие компоненты, магнезиальные базальты, Курильские острова.

**EVALUATION OF INFLUENCE OF WATER ON RESIDUAL MELT-CONTAINING OLIVINE GLASS
COMPOSITION IN BASALT IN CALDERA OF VOLCANOS OF MEDVEZHAYA, SMALLER BROTHER (ITURUP
ISLAND)**

Research article

Nizametdinov I.R.*

ORCID: 0000-0002-9213-0958,

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia,
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

* Corresponding author (inizametdinov[at]igm.nsc.ru)

Abstract

This paper presents the results of composition of residual melting glass in olivine from magnesian postcaldera basalt determination of the Smaller Brother volcano, Iturup Island. According to energy-dispersion spectrometry, the residual glass is very different from the original primitive liquids and is enriched with Al_2O_3 and SiO_2 compared to the latter. Besides, these glass compositions have a significant amount of oxide deficiency. It is most likely to happen with high initial water concentrations in extracted melting. The presence of water in the glass is confirmed by the Raman spectroscopy method. The accumulation of water due to the crystallization of the olivine host on the walls can delay the crystallization of plagioclases and contribute to the accumulation of alumina in later, residual portions of the extracted melting.

Keywords: melted inclusions, light constituents, magnesian basalts, the Kuril Islands.

Введение

Кальдеры, массивные вулканические депрессии, как правило образуются при катастрофических (десятки и сотни $км^3$ изверженного материала) эксплозивных извержениях крупных малоглубинных очагов кислых магм. Как правило, такая эксплозивность кальдерообразующих извержений обусловлена высокой степенью закристаллизованности кислых магм и высоким давлением летучих компонентов, главным образом воды. Существующие представления предполагают несколько ее источников. Во-первых, вода может высвобождаться при плавлении корового субстрата, а ее накопление в расплаве происходит за счет разрушения водосодержащих минералов, таких как слюды, амфибол, эпидот [13]. Во-вторых, очаги кислых магм могут быть результатом кристаллизационной дифференциации исходно мантийных базитовых расплавов, а вода будет накапливаться в более поздних, кислых порциях расплава [15], [16].

Роль базитовых расплавов в кальдерообразующих извержениях, с другой стороны, может быть обусловлена привнесом летучих компонентов в области образования малоглубинных очагов кислых магм. В таком случае мантийные расплавы будут источником летучих компонентов в областях коровой магмогенерации при подготовке кальдерных извержений [12].

В любом из обозначенных случаев прямое определение концентраций воды в расплавах является необходимым для понимания ее роли в эндогенных процессах подготовки вулканических извержений. На данный момент существует несколько способов прямого измерения воды в силикатных стеклах расплавных включений – вторично-ионная масс-спектрометрия (SIMS), ИК-спектроскопия с Фурье преобразованием (Фурье ИКС) [14], [18], титрование по методу Карла Фишера (КФТ). SIMS и КФТ это разрушающие методы, а Фурье ИКС требует трудоемкой подготовки образцов.

Метод Рамановской спектроскопии тоже применяется для прямого определения содержания воды в силикатных

стеклах и лишен вышеописанных недостатков. С применением методики из [5] успешно определены содержания воды в стеклах расплавных включений во вкрапленниках дацитовых пемз крупного кальдерного извержения перешейка Ветровой, о. Итуруп.

Однако методики для измерения содержания воды в стеклах основного состава Рамановской спектроскопией до настоящего времени не опубликовано. В данной работе использовано сопоставление данных Рамановской спектроскопии и энерго-дисперсионной спектрометрии при определении воды и оценке ее роли при фракционировании магнезиальных базальтовых расплавов, захваченных в виде включений во вкрапленниках оливина в лавовых потоках вулкана Меньший Брат, о. Итуруп.

Материалы и методы исследования

В основу работы легли образцы посткальдерных лавовых потоков вулкана Меньший Брат, который расположен в пределах кальдеры Медвежья в северо-восточной оконечности о. Итуруп. Кальдера Медвежья имеет размеры 10x12 км и является самой крупной среди всех кальдер Курильской гряды. Выделяется три этапа формирования данной вулканической структуры: докальдерная, кальдерообразующая и посткальдерная [3].

Докальдерная стадия связывается с образованием крупного щитового вулкана, лавовые потоки которого сложены глиноземистыми базальтами. Минимальный возраст этих платобазальтов по данным К-Аг датирования составляет $1,03 \pm 0,6$ млн. лет [3].

На кальдерообразующей стадии произошло образование кальдерной депрессии в результате серии мощных извержений кислого пирокластического материала. Абсолютный возраст синкальдерных игнимбритов, залегающих непосредственно на докальдерных платобазальтах по данным К-Аг датирования составляет $0,41 \pm 0,1$ млн. лет, что позволяет датировать возраст образования кальдеры средним плейстоценом [3]. На завершающей стадии синкальдерного этапа происходило внедрение многочисленных андезит-дацитовых экструзивных тел внутри кальдеры, самые крупные из которых образуют купола современных вулканов Медвежий, Средний, Кудрявый и Меньший Брат.

Посткальдерная стадия характеризуется возрождением основного вулканизма и связана с образованием базальтовых и андезитобазальтовых лавовых потоков вулканов вышеуказанных вулканов. На сегодняшний день вулканическая активность локализована в пределах вулкана Кудрявый и выражается в активно функционирующих фумаролах и фумарольных полях, приуроченных к вершинным кратерам этого вулкана.

Среди всех посткальдерных вулканов выделяется вулкан Меньший Брат. Он представляет собой экструзивный андезит-дацитовый купол, который перекрыт шлаковыми конусом и лавовыми потоками кратеров Восток и Коротышка. Эти потоки сложены магнезиальными оливин-пироксен-плагиоклазовыми базальтами и андезитобазальтами [4], [6], [9], [10], возраст которых не превышает нескольких сотен лет. Высокие содержания Mg (MgO до 10 мас. %) и присутствие в этих породах оливина с Fo_{84-90} предполагает мантийную природу исходных расплавов, участвовавших в образовании этих базальтов [6], [9], [10], что и отличает Меньший Брат от других вулканов в кальдере Медвежья.

Повсеместно вкрапленники оливина содержат первичные включения минералообразующих сред. Как правило они представляют собой частично-раскристаллизованные расплавные включения и группы расплавных включений, не приуроченные к конкретным внутренним или внешним зонам роста оливина-хозяина. Среди них были встречены включения, содержащие хорошо ограненные кристаллические фазы и остаточное стекло (Рис. 1).

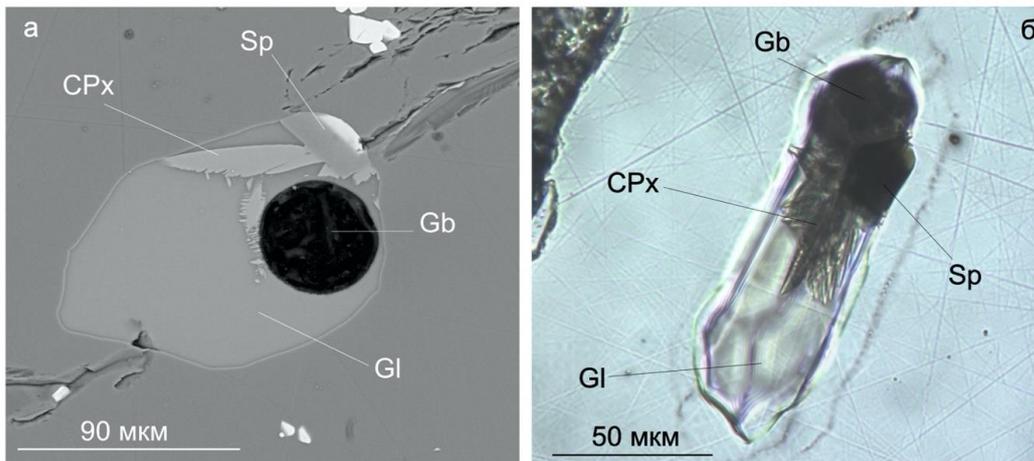


Рис. 1 – Первичные частично раскристаллизованные расплавные включения во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат:

a – изображение включения в обратно-рассеянных электронах; *b* – в проходящем свете;
G1 – остаточное стекло; *Gb* – газовый пузырь; *Sp* – шпинель; *CPx* – клинопироксен

Для определения состава дочерних фаз расплавных включений в этой работе использовались методы Рамановской спектроскопии и энерго-дисперсионной спектрометрии, которые широко используются при исследовании включений минералообразующих сред во вкрапленниках изверженных пород.

Определение содержания главных элементов в оливине-хозяине и стеклах расплавных включений проводилось на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 450 + XMax

80 (Oxford Instruments Ltd) методом энерго-дисперсионной спектроскопии в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований (ЦКП МИИ) ИГМ СО РАН. Состав фаз измерялся при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 1 нА, времени набора сигнала – 60 секунд, а размер области анализа подбирался в зависимости от размера интересующей фазы и, обычно, не превышал 20 мкм.

Оценка присутствия воды в остаточных стеклах расплавных включений выполнялась методом Рамановской спектроскопии в ИГМ СО РАН на Рамановском спектрометре Horiba LabRAM HR 800. Позиционирование лазерного луча на анализируемой фазе производилось с помощью встроенного поляризационного микроскопа Olympus BX-41. В ходе работы использовался твердотельный Nd:YAG лазер с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 75 мВт. Регистрация спектров проводилась с помощью CCD детектора с рабочей температурой -70 °С, охлаждаемого по методу Пельтье. Для сбора рассеянного света использовался объектив 100х с высокой числовой апертурой. Спектры получены в диапазоне 100-1200 см⁻¹ и 2900-3900 см⁻¹. Размер конфокальной диафрагмы и время накопления спектра устанавливались в зависимости от размера исследуемой фазы.

Основные результаты

Первичные частично раскристаллизованные расплавные включения в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат имеют размер до 150 мкм. Среди дочерних фаз в таких включениях обнаружены высокоглиноземистый клинопироксен, глиноземистая шпинель, минерал подгруппы рёнита [7], силикатное стекло (Табл. 1) и газовый или усадочный пузырек (Рис. 1).

Таблица 1 – Измеренные составы остаточных стекол расплавных включений во вкрапленниках оливина из базальтов вулкана Меньший Брат по данным ЭДС

Образец	SiO ₂ , мас. %	TiO ₂ , мас. %	Al ₂ O ₃ , мас. %	FeO, мас. %	MgO, мас. %	CaO, мас. %	Na ₂ O, мас. %	K ₂ O, мас. %	Сумма, мас. %
MD-6	55,60	0,23	23,43	2,61	1,39	5,16	4,99	1,08	94,49
	56,69	0,35	20,12	2,33	1,13	5,32	4,03	0,66	90,63
	53,66	0,48	18,91	2,56	1,67	5,15	4,02	0,67	87,12
	59,09	0,43	20,73	2,52	1,08	4,21	4,48	0,83	93,37
	58,83	0,47	20,67	1,84	0,51	4,32	3,80	0,96	91,40
	58,64	0,52	20,58	1,97	0,60	5,41	3,48	0,86	92,06
	56,09	0,58	18,59	1,90	0,93	4,93	4,04	0,88	87,94
	58,36	0,47	20,10	2,32	0,90	4,42	3,84	0,72	91,13
	59,50	0,40	20,33	2,43	0,99	4,66	4,07	0,69	93,07
MD-18	54,51	0,60	19,86	1,69	1,69	4,20	4,73	1,19	88,47
	52,46	0,75	20,26	4,16	2,57	6,24	4,95	0,82	92,21
	50,66	0,73	20,28	6,60	2,80	14,47	2,77	0,34	98,64
	48,84	0,73	19,76	5,79	2,22	13,53	2,99	0,39	94,25
	47,14	0,84	19,03	7,00	4,59	13,63	2,59	0,28	95,10
46,21	0,97	19,69	6,18	3,47	15,34	2,53	0,33	94,72	

Обращает на себя внимание достаточно большой разброс в дефиците суммы анализов остаточных стекол расплавных включений от 1 до 12 % (Табл. 1). В большинстве случаев подобный дефицит образуется за счет неизмеряемых элементов. С учетом того, что определение состава проводилось методом ЭДС рентгено-спектрального микроанализа, то дефицит суммы может быть вызван наличием в стеклах легких элементов: С, N, В, и в первую очередь воды, которые не определяются этим методом. Как нами уже было показано [6] содержание воды в исходных расплавах базальтов вулкана Меньший Брат могло достигать 5 мас. %. Если учесть кристаллизацию оливина-хозяина на стенках включения и кристаллизацию дочерних высокоглиноземистых минералов, для которых вода является несовместимым компонентом, то можно предположить, что по мере уменьшения объема остаточного стекла количество воды в нем будет возрастать. При этом если потеря воды при постзахватной эволюции включения была минимальной, то количество воды в остаточном стекле может увеличиться в несколько раз, что и должно привести к наблюдаемому недостатку суммы анализов.

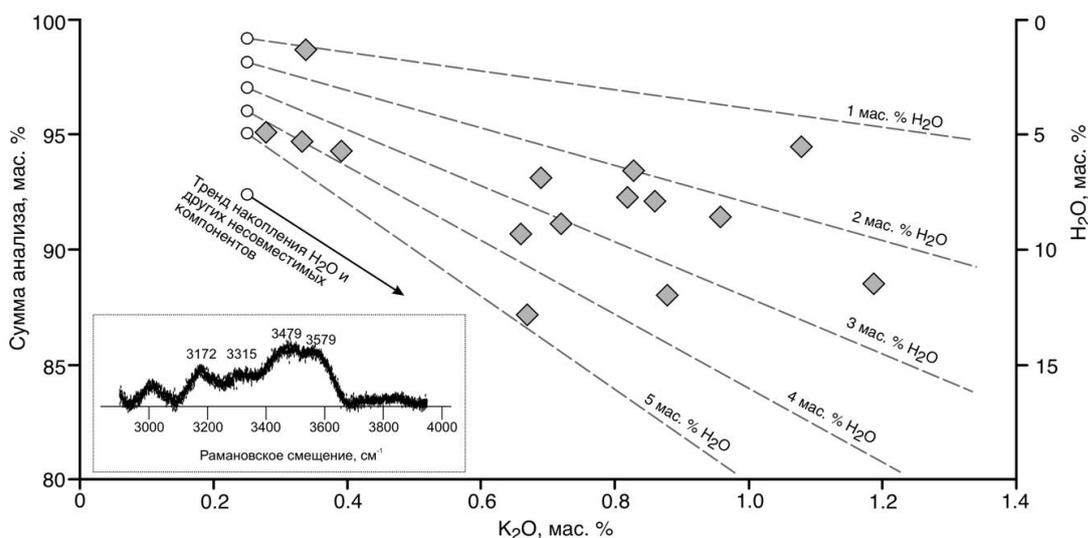


Рис. 2 – Зависимость суммы окислов в составе стекол расплавных включений в оливине от степени накопления калия в этих стеклах:

пунктирные линии – расчетное накопление H_2O по мере кристаллизации оливина на стенках и дочерних фаз с различными начальными концентрациями от 1 до 5 мас. %; *на врезке* – высокочастотная часть спектра комбинационного рассеяния остаточного стекла включений с характерными пиками в области $3172-3579\text{ см}^{-1}$, характеризующими наличие воды в стекле

Для проверки достоверности вышеизложенных рассуждений можно использовать другой несовместимый для кристаллизующейся ассоциации дочерних минералов элемент – К. Если во включении будет происходить значительное отложение оливина на стенках и кристаллизация дочерних фаз, то в расплаве будут возрастать не только содержания воды, но и калия. Как показано на (Рис. 2), между содержанием K_2O в остаточных стеклах расплавных включений и суммой окислов при электронно-зондовом анализе этих стекол имеется обратная корреляция. Анализы с наибольшими содержаниями калия характеризуются наибольшими дефицитами сумм окислов, что и подтверждает, что недостаток суммы определяется влиянием воды и не является артефактом.

Наличие воды в остаточных стеклах расплавных включений подтверждается методом Рамановской спектроскопии (Рис. 2) по наличию широкой асимметричной линии высокочастотной области спектра ($3100-3600\text{ см}^{-1}$).

На основании баланса масс рассчитывалось изменение концентраций K_2O и H_2O по мере уменьшения количества остаточного расплава, получаемого путем вычитания из исходной массы расплава суммарной массы закристаллизовавшихся безводных минералов (оливин-хозяин и дочерние кристаллы). Стартовое содержание K_2O было принято 0,25 мас. % (состав исходных расплавов базальтовых потоков вулкана Меньший Брат [4, 6]), а содержание H_2O бралось от 1 до 5 мас. %. Результаты расчетов суммы электронно-зондового анализа- K_2O показаны на Рис. 2 пунктирными линиями для различных исходных содержаний H_2O . На рисунке видно, что содержания воды в остаточных стеклах включений в оливинах вулкана Меньший Брат могут достигать 10 мас. %, что укладывается в диапазон исходных, захваченных включениями содержаний воды от 2,5 до 4,9 мас. %. Ранее было показано, что исходные расплавы содержали до 5 мас. % H_2O [6], что хорошо согласуется с приведенными расчетными оценками.

Все вариации содержаний воды во включениях, оцененное по дефициту сумм анализа вероятно связаны с параллельным протеканием двух процессов: накопление воды в остаточном расплаве по мере кристаллизации дочерних фаз и оливина-хозяина на стенках включений и диффузией воды из включения в процессе извержения до закалки.

Составы остаточных стекол природно-закаленных расплавных включений (Табл. 1) значительно отличаются от составов исходных расплавов, из которых кристаллизовался оливин. В частично раскристаллизованных расплавных включениях в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат природно-закаленные стекла обогащены Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , K_2O и обеднены по MgO , FeO , CaO , TiO_2 в сравнении с исходным расплавом, находящимся в равновесии с наиболее ранним оливином Fo_{90} [6].

Обсуждение результатов

Сильное обогащение остаточных стекол расплавных включений алюминием до ~24 мас. % Al_2O_3 (Табл. 1) по сравнению с исходными расплавами от 15 мас. % Al_2O_3 включений в оливине вулкана Меньший Брат [6] - не является типичным для базальтовых расплавов известково-щелочной серии. Проблема образования высокоглиноземистых рёнит-содержащих ассоциаций в расплавных включениях в оливине была поднята в предыдущих исследованиях [1], [11] и до сих пор остается дискуссионной. С одной стороны, это связывается с постзахватной кристаллизацией оливина на стенках включения, а с другой – возможностью образования рёнита за счет дегидратации и распада чермакитового амфибола [17].

Образование рёнита при разложении амфибола в присутствии ортопироксена, предложенное в [17], может объяснить накопление кремнезема и воды в остаточных расплавах включений, но не предполагает увеличения в них содержания Al_2O_3 . Кроме этого, дегидратация амфибола в расплаве должна требовать существенного сброса давления практически без изменения температуры, что выглядит нереалистично для постзахватных преобразований расплавных включений. Нам не удалось обнаружить амфибола и признаков замещения его рёнитом в исследованных включениях.

В рассматриваемых нами условиях при подъеме магм с вкрапленниками оливина, содержащими расплавные включения, адиабата островодужной мантии проходит выше по температуре поля стабильности амфибола [6].

Очевидно, что глинозем может накапливаться в расплаве в том случае, если происходит кристаллизация безплаггиоклазовых ассоциаций Fe-Mg фаз, которые, при этом, ненасыщены кремнеземом. В нашем случае - при кристаллизации оливина-хозяина на стенки расплавных включений. Считается, эволюция состава расплавов в расплавных включениях не в полной мере отражает эволюцию состава расплава в остывающей магматической камере. Но, в данном случае, мы можем оценить роль воды в образовании высокоглиноземистых расплавов при фракционировании магнезиальных расплавов. Кристаллизация плаггиоклаза в некоторых случаях может быть подавлена ростом концентрации воды в базальтовых расплавах [2]. Для того, чтобы концентрации воды росли, необходимо чтобы фракционирование расплавов происходило в закрытых условиях. Если из расплава будут кристаллизоваться железо-магнезиальные минералы, то это будет приводить к накоплению воды в остаточных порциях расплава и подавлению кристаллизации плаггиоклаза, что, в свою очередь, будет вызывать накопление Al_2O_3 в расплаве.

Заключение

Образование высокоглиноземистых расплавов и производных от них ассоциаций высокоглиноземистых дочерних минералов может быть связано с накоплением воды в закрытых системах расплавных включений по мере кристаллизации безводных дочерних минералов при температурах, превышающих температуру стабильности амфибола. Высокие содержания воды в расплавах включений могут подавлять кристаллизацию плаггиоклаза, что способствует обогащению остаточного расплава Al_2O_3 .

Предполагается, что подобный механизм с преимущественной массовой кристаллизацией оливина может быть причиной образования высокоглиноземистых расплавов в малоглубинных камерах в областях островодужного вулканизма при условии быстрого подъема водосодержащих базитовых расплавов с мантийных глубин и их дальнейшей эволюции в закрытых условиях.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-35-90038 и № 20-55-12013, а также Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию ИГМ СО РАН.

Funding

The reported study was funded by RFBR, projects number 19-35-90038 20-55-12013 and Complex Fundamental Research Program of SB RAS.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Ананьев В.В. Ренит в расплавных включениях из оливина алливалитовых нодулей вулкана Малый Семячик и базальтов вулкана Ключевской (Камчатка) / В.В. Ананьев, О.Б. Селянгин // Вулканология и Сейсмология. – 2011. – № 5. – С. 1-7.
2. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана / А.А. Арискин, Г.С. Бармина, А.Ю. Озеров и др. // Петрология. – 1995. – № 5 (3). – С. 42-67.
3. Ермаков В.А. Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры Медвежья (о-в Итуруп, Курильские о-ва) / В.А. Ермаков, Г.С. Штейнберг // Вулканология и Сейсмология. – 2009. – № 3. – С. 19-40.
4. Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавных включений / В.И. Коваленко, В.Б. Наумов, М.Л. Толстых и др. // Геохимия. – 2004. – № 5. – С. 467-487.
5. Методика определения содержания воды в природных расплавах риолитового состава методами спектроскопии комбинационного рассеяния и электронно-зондового микроанализа / А.А. Котов, С.З. Смирнов, П.Ю. Плечов и др. // Петрология. – 2021. – Т. 29. – № 14. – С. 429-448.
6. Вода в родоначальных базальтовых магмах вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова) / И.Р. Низаметдинов, Д.В. Кузьмин, С.З. Смирнов и др. // Доклады Академии наук. – 2019. – № 486 (1). – С. 93-97.
7. Ренит-содержащая ассоциация из расплавных включений как индикатор эволюции магнезиальных базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп) / И.Р. Низаметдинов, Д.В. Кузьмин, С.З. Смирнов и др. // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика Д.С. Коржинского. Москва, 7-9 октября 2019 г. Материалы конференции. – М.: ИГЕМ РАН, 2019. – С. 130-132.
8. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) / А.В. Рыбин, М.В. Чибисова, С.З. Смирнов и др. // Геосистемы переходных зон. – 2018. – № 4 (2). – С. 377-385.
9. Толстых М.Л. Три типа расплавов, участвовавших в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) / М.Л. Толстых, В.Б. Наумов, Н.Н. Кононова // Геохимия. – 1997. – № 4. – С. 391-397.
10. Химический состав и минералогия базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова) / М.В. Чибисова, А.В. Рыбин, Ю.А. Мартынов и др. // Вестник Краунц. Науки о земле. – 2009. – № 1. – № 13. – С. 179-186.
11. Ренит в щелочных базальтах: включения расплава в фенокристах оливина / В.В. Шарыгин, К. Котай, Ч. Сабо и др. // Геология и геофизика. – 2011. – № 52 (11). – С. 1695-1717.

12. Bachmann O. Gas percolation in upper-crustal silicic crystal mushes as a mechanism for upward heat advection and rejuvenation of near-solidus magma bodies / O. Bachmann, G.W. Bergantz // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2006. – No. 149(1-2). – pp. 85-102.
13. Beard J.S. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites / J.S. Beard, G.E. Lofgren // *Journal of Petrology*. – 1991. – V. 32(2). – pp. 365-401.
14. Comparison of microanalytical methods for estimating H₂O contents of silicic volcanic glasses / J.D. Devine, H.P. Brack, G.D. Layne et al. // *American Mineralogist*. – 1995. – No. 80. – pp. 319-328.
15. Gertisser R. From basalt to dacite: origin and evolution of the calc-alkaline series of Salina, Aeolian Arc, Italy / R. Gertisser, J. Keller // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2000. – No. 139(5). – pp. 607-626.
16. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends / L.T. Elkins-Tanton, W.S. Parman, N. Chatterjee et al. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2003. – No. 145(5). – pp. 515-533.
17. Treiman A.H. Rhönite in Luna 24 pyroxenes: First find from the Moon, and implications for volatiles in planetary magmas / A.H. Treiman // *American Mineralogist*. – 2008. – № 93 (2-3). – pp. 488-491
18. A composition-independent quantitative determination of the water content in silicate glasses and silicate melt inclusions by confocal Raman spectroscopy / Z. Zajacz, W. Halter, W.J. Malfait et al. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2005. – No. 150. – pp. 631-642.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Anan'ev V.V. Renit v rasplavnykh vklucheniyaх iz olivina allivalitovykh noduley vulkana Malyy Semyachik i bazaltov vulkana Klyuchevskoy (Kamchatka) [Rhönite in Molten Inclusions from the Olivine of Allivalite Nodules from Malyy Semyachik Volcano and Basalts of Klyuchevskoi Volcano, Kamchatka] / V.V. Anan'ev, O.B. Selyangin // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 2011. – No. 5. – pp. 335-340. [in Russian]
2. Genezis vysokoglinozemistykh bazaltov Klyuchevskogo vulkana [Genesis of High-Alumina Basalts from Klyuchevskoi Volcano] / A.A. Ariskin, G.S. Barmina, A.Yu. Ozerov et al. // *Translated from Petrologiya*. – 1995. – No. 3. – pp. 496-521. [in Russian]
3. Ermakov V.A. Vulkan Kudryavyy i evolyutsiya kaldery Medvezh'ya (o-v Iturup, Kuril'skiye o-va) [Volcano Kudryavyy and the evolution of the Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands)] / V.A. Ermakov, G.S. Steinberg // *Volcanology and Seismology*. – 2009. – No. 3. – pp. 19-40. [In Russian]
4. Sostav i istochniki magm kaldery Medvezh'ya (o. Iturup, Yuzhnyye Kurily) po dannym izucheniya rasplavnykh vklucheniya [Composition and sources of magmas in Medvezh'ya Caldera (Iturup Island, Southern Kuriles) from a study of melt inclusions] / V.I. Kovalenko, V.B. Naumov, M.L. Tolstykh et al. // *Geochemistry International*. – 2004. – No. 42(5). – pp. 393-413. [in Russian]
5. Metodika opredeleniya soderzhaniya vody v prirodnykh rasplavakh riolitovogo sostava metodami spektroskopii kombinatsionnogo rasseyaniya i elektronno-zondovogo mikroanaliza [Method for determining water content in natural rhyolitic melts by Raman spectroscopy and electron microprobe analysis] / A.A. Kotov, S.Z. Smirnov, P.Yu. Plechov et al. // *Petrology*. – 2021. – No. 29(24). – pp. 386-403. [in Russian]
6. Voda v rodonachalnykh bazaltovykh magmakh vulkana Menshiy Brat (o. Iturup, Kuril'skiye ostrova) [Water in Parental Basaltic Magmas of Menshiy Brat Volcano (Iturup Island, Kurile Islands)] / I.R. Nizametdinov, D.V. Kuzmin, S.Z. Smirnov et al. // *Doklady Earth Sciences*. – 2019. – No. 486(1). – pp. 525-528. [in Russian]
7. Renit-soderzhashchaya assotsiatsiya iz rasplavnykh vklucheniya kak indikator evolyutsii magnezialnykh bazaltov vulkana Menshiy Brat (o. Iturup) [Rhönite-bearing association from melt inclusions as an indicator of the evolution of magnesian basalts of the Menshiy Brat volcano (Iturup Island)] / I.R. Nizametdinov, D.V. Kuzmin, S.Z. Smirnov et al. // *Physicochemical factors of petro- and ore genesis: new frontiers. All-Russian conference dedicated to the 120th anniversary of the birth of the outstanding Russian scientist Academician D.S. Korzhinsky. Moscow, October 7-9. Conference materials*. – 2019. – pp. 130-132. [In Russian]
8. Petrokhimicheskiye osobennosti vulkanicheskikh kompleksov kaldery Medvezh'ya (o. Iturup, Kuril'skiye ostrova) [Petrochemical features of volcanic complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands)] / A.V. Rybin, M.V. Chibisova et al. // *Geosistemy Perekhodnykh Zon*. – 2018. – No. 4(2). – pp. 377-385. [In Russian]
9. Tri tipa rasplavov. uchavstvovavshikh v formirovaniі andezitobazaltov kaldery Medvezh'ya (o. Iturup, Yuzhnyye Kurily) [Three types of melt in the basaltic andesite from the Medvezh'ya Caldera, Iturup, Southern Kuril Islands] / M.L. Tolstykh, V.B. Naumov, N.N. Kononkova // *Geochemistry International*. – 1997. – No. 35(4). – pp. 339-34. [in Russian]
10. Khimicheskiy sostav i mineralogiya bazaltov vulkana Menshiy Brat (o. Iturup, Kuril'skiye ostrova) [Chemical composition and mineralogy of basalts of the Menshiy Brat volcano (Iturup Island, Kuril Islands)] / M.V. Chibisova, A.V. Rybin, Yu.A. Martynov et al. // *Bulletin of KRAUNC. Earth Sciences*. – 2009. – No. 13(1). – pp. 178-186. [In Russian]
11. Renit v shchelochnykh bazaltakh: vklucheniya raspлаva v fenokristakh olivina [Rhönite in alkali basalts: silicate melt inclusions in olivine phenocrysts] / V.V. Sharygin, T.J. Timina, D.V. Kuzmin et al. // *Russian Geology and Geophysics*. – 2011. – No. 52. – pp. 1334-1352. [in Russian]
12. Bachmann O. Gas percolation in upper-crustal silicic crystal mushes as a mechanism for upward heat advection and rejuvenation of near-solidus magma bodies / O. Bachmann, G.W. Bergantz // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2006. – No. 149(1-2). – pp. 85-102.
13. Beard J.S. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites / J.S. Beard, G.E. Lofgren // *Journal of Petrology*. – 1991. – Vol. 32(2). – pp. 365-401.
14. Comparison of microanalytical methods for estimating H₂O contents of silicic volcanic glasses / J.D. Devine, H.P. Brack, G.D. Layne et al. // *American Mineralogist*. – 1995. – No. 80. – pp. 319-328.

15. Gertisser R. From basalt to dacite: origin and evolution of the calc-alkaline series of Salina, Aeolian Arc, Italy / R. Gertisser, J. Keller // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2000. – No. 139(5). – pp. 607-626.
16. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends / L.T. Elkins-Tanton, W.S. Parman, N. Chatterjee et al. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2003. – No. 145(5). – pp. 515-533.
17. Treiman A.H. Rhönite in Luna 24 pyroxenes: First find from the Moon, and implications for volatiles in planetary magmas / A.H. Treiman // *American Mineralogist*. – 2008. – № 93 (2-3). – pp. 488–491
18. A composition-independent quantitative determination of the water content in silicate glasses and silicate melt inclusions by confocal Raman spectroscopy / Z. Zajacz, W. Halter, W.J. Malfait et al. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2005. – No. 150. – pp. 631-642.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.064>

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОРЕАБИЛИТАЦИИ МАЛЫХ ОЗЕР НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА БАННОВСКОЕ

Научная статья

Мингазова Н.М.¹, Шигапов И.С.² *, Набеева Э.Г.³

¹ ORCID: 0000-0002-8360-7005;

² ORCID: 0000-0003-0429-4440;

³ ORCID: 0000-0002-3246-9431;

^{1, 2, 3} Казанский федеральный университет, Казань, Россия

* Корреспондирующий автор (shigapov.irshat[at]yandex.ru)

Аннотация

Лаишевский район Республики Татарстан, примыкающий к г. Казани, в настоящее время активно застраивается. Последствиями антропогенного воздействия являются сокращение площади водосборов, снижение поверхностного стока и подземного питания, приводящие к сокращению площади и глубин озер, к снижению уровня воды, заилению, заболачиванию, эвтрофированию и загрязнению. На основе анализа космоснимков в Лаишевском районе выявлено более 170 озер площадью от 0,006 до 92,8 га. Основная группа озер относится к очень малым, с площадью до 1 га (101 озеро), в силу чего они очень уязвимы к антропогенному воздействию. Проблема деградации озер показана на примере озера Банновское в пос. Усады. Для озера Банновское характерно понижение уровня, сокращение площади, заиление, снижение качества воды, загрязнение вод нефтепродуктами, АПАВ и тяжелыми металлами, потеря рекреационной и хозяйственной ценности. Для озера рекомендованы профилактические и восстановительные мероприятия.

Ключевые слова: водосбор; геоэкология; зообентос; эвтрофирование, экореставрация.

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON WATER BODIES AND THE POSSIBILITY OF ECOREHABILITATION OF SMALL LAKES ON THE EXAMPLE OF LAKE BANNOVSKOYE

Research article

Mingazova N.M.¹, Shigapov I.S.² *, Nabeeva E.G.³

¹ ORCID: 0000-0002-8360-7005;

² ORCID: 0000-0003-0429-4440;

³ ORCID: 0000-0002-3246-9431;

^{1, 2, 3} Kazan Federal University, Kazan, Russia

* Corresponding author (shigapov.irshat[at]yandex.ru)

Abstract

Laishevsky district of the Republic of Tatarstan, adjacent to the city of Kazan, is currently being actively built up. The consequences of anthropogenic impact are a reduction in the area of catchments, a decrease in surface runoff and groundwater supply, leading to a reduction in the area and depth of lakes, a decrease in water levels, siltation, waterlogging, eutrophication and pollution. Based on the analysis of satellite images in the Laishevsky district, more than 170 lakes with an area of 0.006 to 92.8 hectares were identified. The main group of lakes is very small, with an area of up to 1 ha (101 lakes), which makes them very vulnerable to anthropogenic impact. The problem of lake degradation is shown by the example of Lake Bannovskoye in the village . Usada. Bannovskoye Lake is characterized by a decrease in the level, a reduction in the area, siltation, a decrease in water quality, water pollution with petroleum products, APAV and heavy metals, loss of recreational and economic value. Preventive and restorative measures are recommended for the lake.

Keywords: catchment area; geoecology; zoobenthos; eutrophication, ecorehabilitation.

Введение

Республика Татарстан относится к многоозерным регионам. Однако, согласно инвентаризационным данным, за 50 лет на территории Республики Татарстан количество озер, по различным причинам, сократилось на 25%. В 1957-1959 гг. в Татарстане насчитывалось 10833 озер, в 1969 г. – 9762, а в 1990-е гг. – 8111 [4, с.38]. Последнее десятилетие большое количество озер находятся на стадии полного исчезновения как по естественным причинам, так и из-за усиления антропогенного воздействия.

За последние годы вследствие интенсификации урбанизации пригородных поселков, значительно увеличилось количество озер, оказавшихся в черте урботерриторий [10]. К естественным процессам сукцессии водоемов добавляется антропогенное воздействие на водоемы. Ярко выражены эти процессы в Лаишевском районе, примыкающем к г. Казани.

Методы и принципы исследования

Для анализа антропогенной нагрузки на озёра Лаишевского района проводилась оцифровка и 3D визуализация космоснимков и карт. Анализ параметров озерных котловин и водосборных бассейнов проводился в ГИС-системах QGIS и ArcGIS. Для проведения гидрохимического анализа пробы отбирались с поверхностного и придонного слоев, анализировались в аттестованной лаборатории. Для оценки качества воды применялась комплексная оценка качества - индекс загрязнения воды (ИЗВ), эколого-санитарная классификация качества поверхностных вод (ЭСК), основанная на расчёте среднего рангового показателя (РП) по 7-8 ингредиентам водородный показатель, величина прозрачности воды, содержание кислорода, аммония, нитратов, нитритов, фосфатов и ХПК [7, с.200]; определялось содержание марганца и железа. Зообентос отбирался в литоральной зоне озера, на трех станциях с помощью трубчатого дночерпателя и скребка, площадью захвата 20*20 см². Изучение зообентоса велось в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методиками [8, с.200]. Рассчитывались количественные показатели (численность и биомасса), для оценки сообществ были использованы показатели видового разнообразия: индексы видового разнообразия (Шеннона (H), Симпсона (S)).

Количество озер по данным инвентаризации

По данным анализа космоснимков на территории Лаишевского района РТ выявлено 174 озера. Проведена группировка озер Лаишевского района по площади (табл. 1). Самым крупным озером Лаишевского района по площади является озеро Ковалёвское (Ковалинское), расположенное северо-восточнее села Песчаные Ковали, с площадью водного зеркала на момент исследования 92,8 га, в то же время по данным водного реестра и Реестра ООПТ, оно имеет площадь от 124,5 до 136 га [1, 2]. Наименьшим среди обнаруженных объектов было озерко площадью около 60 м², (см. табл.1).

Таблица 1 – Группировка озёр Лаишевского района по площади

Группа	Площадь, га	Количество озер		Общая площадь	
		Всего	%	Всего, га	%
1	менее 0,1	14	8,0	0,7	0,1
2	0,1-1	101	58,0	18,2	4
3	1-10	52	30,0	171,7	37,4
4	более 10	7	4,0	268,6	58,5
всего		174	100	459,2	100

Большая часть озер Лаишевского района, относятся ко второй группе по площади - от 0,1 до 1 га, всего 101 озеро, на их долю приходится 58% от общего количества, 4% от общей площади озер. Также распространены озера третьей группы с площадью от 1 га до 10 га – 52 озера (30% от количества и 37,4 % площади) и имеется небольшое количество озер менее 0,1 га (14 озер) и более 10 га (7 озер, но они занимают 58,5% суммарной площади озер). В Лаишевском районе преобладают небольшие озера, но в силу своей многочисленности они имеют важное экологическое и хозяйственное значение [5], [6]. Согласно литературным данным, данные озёра подвергаются активной антропогенной нагрузке, последствия которых выражаются прежде всего через сокращение акватории и обмеление [3, С. 8].

1. Антропогенное воздействие на водные объекты

Активная застройка территории является основным видом антропогенной нагрузки на водоёмы изучаемого района. Согласно схеме территориального планирования района, на территории располагается 25 муниципальных образований, 1 городское поселение, 24 сельских поселений и 69 сельских населённых пунктов. Почти все населённые пункты располагаются вблизи водных объектов, перекрывая пути прохождения поверхностного стока, сокращая территории водосборов озер, что приводит к истощению озер, разрушению их естественных ландшафтов, а также загрязнению вод.

Актуальной проблемой сельских населённых пунктов Лаишевского района является также нецентрализованное водоснабжение, бурение местным населением скважин, глубиной от 38 до 154 м, приводящих к истощению грунтовых вод, питающих поверхностные водные объекты.

Строительство автомобильных дорог, протяжённость которых в Лаишевском районе составляет 373,1 км приводит к сокращению территорий водосборов, нарушению путей прохождения поверхностного стока, к загрязнению водоемов, грунтовых вод вследствие фильтрации загрязненных стоков с автомобильных дорог в подземные горизонты. Также источником загрязнения водного стока является износ и разрушение дорожных покрытий.

2. Экологические проблемы малых озер на примере озера Банновское

Поскольку большая часть озер Лаишевского района относится к малым озерам с площадью до 1 га (114 из 174 озер), а озеро Банновское относится к этой категории (площадь озера в 2020 г. составляла 0,50 га), рассмотрим экологическую ситуацию на примере оз. Банновское.

Озеро Банновское находится в восточной части села Усады и представляет собой котловину в понижении рельефа, периодически затопливаемую поверхностными водами, имеющую родниковое питание. Водный режим данного водоема частично схож с режимом водохранилищ с сезонным регулированием стока. Наполнение котловины происходит в период весеннего половодья и постепенная «сработка» происходит в течение года вследствие испарения. По происхождению данное озеро, вероятнее всего, представляет собой карстово-суффозионное понижение в ложбине стока [9, 113 с.]. Водоём имеет вытянутую форму. Длина озера 308 м, максимальная ширина 167 м. Средняя глубина

составляет 1 м в летний период, поднимается в период снеготаяния на 1,3 - 1,5 м, максимальная обнаруженная глубина в летний период — 1,1 м, весной – 2,5 м. Питание подземное и поверхностное, смешанное. Площадь котловины озера, которая исторически заполнялась водой - около 1,8 га, площадь открытой воды в 2020 г. - 0,5 га, площадь водосбора озера - 378 га, показатель удельного водосбора озера - 210. Наиболее вероятной причиной деградации озера является снижение количества поступающих поверхностных вод во время снеготаяния.

При изучении показателей качества воды выявлены: низкая прозрачность, коричневатый цвет воды, низкое содержание кислорода (с дефицитом в зимний период). Воды озера характеризуются повышенным содержанием биогенных и загрязняющих веществ. По ЭСК качество воды у поверхности соответствовало разряду «достаточно чистой» со средним РП 4,4, у дна - разряду «слабо загрязнённой» со средним РП 5. Выявлено превышение АПАВ – до 2,2 ПДК, нефтепродуктов до 17 и 96 ПДК, содержание марганца - до 130 и 64 ПДК у поверхности и у дна соответственно; железа – 15 ПДК у дна и на поверхности.

Анализ проб зообентоса в озере выявил небольшую численность и биомассу организмов (численность изменялась от 8 до 216 экз./м², биомасса от 0,013 до 30,61 г/м²). По величине биомассы водоем относится к эвтрофным. Индекс Шеннона по станциям различался 0,9 до 2,1, индекс Симпсона от 0,3 до 0,7. По индексам видового разнообразия Шеннона и Симпсона воды можно отнести к загрязненным, сообщества - к сбалансированным на большем количестве станций. Озеро эвтрофировано, развиваются процессы зарастания, заболачивания и заиления.

Снижение экологической и рекреационной ценности озера происходит вследствие: застройки окружающей территории и перераспределении потоков талых вод; поступлении загрязненного поверхностного и диффузного стока с территории водосбора; обустройства артезианских скважин.

3. Мероприятия по улучшению экологической ситуации

Для улучшения состояния озера Банновское и снижения степени зарастания в озере рекомендуется проведение профилактических (осуществляемых на водосборе), и восстановительных (проводящихся в акватории) мероприятий.

Профилактические мероприятия включают:

- 1) ликвидация систем домашнего водоотведения в озере;
- 2) запрет на выпас домашней птицы в акватории;
- 3) оборудование домов, расположенных в водоохранной зоне озера, системами изолированной канализации;
- 4) восстановление потоков воды по овражно-балочной системе с расчисткой тоннелей под дорогами и обустройством песколовок.

Восстановительные мероприятия включают:

- 1) частичное углубление озера в центральной и северных частях;
- 2) расчистка существовавших ранее родников;
- 3) создание каналов для сбора талых вод и направления в озеро;
- 4) создание биоплато на нижних частях каналов, перед входом в озеро, для очистки вод от загрязняющих веществ.

Выявленные причины деградации озера Банновское являются характерными для озер Лаишевского района. Для оптимизации качества воды рекомендуются мероприятия, направленные на щадящее вмешательство в озерные экосистемы (частичное изъятие донных отложений; частичное удаление водно-болотной растительности; аэрация воды; создание каналов или подача воды из артезианских скважин; и др.).

Заключение

Гидрографическая сеть изучаемой территории включает 174 водоёма различной формы и площадью от 0,006 га до 93 га. Урбанизация Лаишевского района приводит к увеличению освоения площадей водосборов многочисленных озёр, располагающихся на данной территории. К основным видам воздействия, влияющим на экологическое состояние озер, относятся: интенсивная застройка водосборной площади озер, строительство автомобильных дорог, сельское хозяйство. Для озера Банновское характерно понижение уровня, сокращение площади, заиление, снижение качества воды, загрязнение вод нефтепродуктами, АПАВ и тяжелыми металлами, потеря рекреационной и хозяйственной ценности. Рекомендованы профилактические и восстановительные мероприятия для озер.

Финансирование

Работа финансировалась согласно договору №1/21 от 30.04.21. между КФУ и Колодцевым В.Е.

Funding

The work was financed according to the agreement No. 1/21 dated 30.04.21. between KFU and V.E. Kolodtsev.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Государственный водный реестр. [Электронный ресурс]. URL: <http://textual.ru/gvr/index.php?card=184922> (дата обращения: 21.02.2022).
2. Государственный реестр особо охраняемых природных территорий в Республике Татарстан. – Казань: Идел-Пресс, 2007. – 407 с.
3. Иванов Д.В. Анализ причин обмеления озер в селе Три Озера (Республика Татарстан) / Д.В. Иванов, И.И. Зиганшин // Российский журнал прикладной экологии. – 2016. – №2. – С. 8-12.

4. Мошкова Л.В. Озерность Республики Татарстан по анализу картографического материала / Л.В. Мошкова // Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан / Матер. III респ. научн. конф. Казань. – 1997. – С. 38.
5. Особо охраняемые природные территории (ООПТ) Лаишевского района [Электронный ресурс] // Электронный периодический научный журнал SCI-ARTICLE – URL: <http://sciarticle.ru/stat.php?i=1540029721> (дата обращения: 25.04.2020).
6. Природа Татарстана // Школьная электронная энциклопедия «ТАТАР ИЛЕ» [Электронный ресурс]. URL: <http://tatarile.tatar.ru/encyclopedia/priroda-tatarstana>. (дата обращения: 16.05.2022).
7. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты / В.Д. Романенко, О.А. Оксийук, В.Н. Жукинский и др. – Киев, 1990. – 256 с.
8. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В.А. Абакумова. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 240 с.
9. Тайсин А.С. Озера Приказанского района их современные природные и антропогенные изменения / А.С. Тайсин. – Казань: Изд-во ТГГПУ, 2006. – 167 с.
10. СТРАТЕГИЯ социально-экономического развития Лаишевского муниципального района Республики Татарстан на 2019-2021 годы и плановый период до 2030 года. [Электронный ресурс]. URL: https://laishevo.tatarstan.ru/file/pub/pub_646397.pdf (дата обращения: 16.05.2022).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gosudarstvennyj vodnyj reestr [State water reestr]. [Electronic resource]. URL: <http://textual.ru/gvr/index.php?card=184922> (accessed: 21.02.2022). [in Russian]
2. Gosudarstvennyj reestr osobo ohranyaemyh prirodnyh territorij v Respublike Tatarstan. [State register of specially protected natural areas in the Republic of Tatarstan]. – Kazan: Idel-Press, 2007. – 407 p. [in Russian]
3. Ivanov D.V. Analiz prichin obmeleniya ozer v sele Tri Ozera (Respublika Tatarstan) [Analysis of the reasons for the shallowing of lakes in the village of Tri Ozera (Republic of Tatarstan)] / D.V. Ivanov, I.I. Ziganshin // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii. – 2016. – №2. – pp. 8-12. [in Russian]
4. Moshkova L.V. Ozernost' Respubliki Tatarstan po analizu kartograficheskogo materiala [Lake ability of the Republic of Tatarstan according to the analysis of cartographic material] / L.V. Moshkova // Aktual'nye ekologicheskie problemy Respubliki Tatarstan / Mater. III rесп. научн. конф. – Kazan', 1997. – pp. 38. [in Russian]
5. Osobo ohranyaemye prirodnye territorii (ООПТ) Laishevskogo rajona [Specially Protected Natural Territories (PAs) of the Laishevsky District] [Electronic resource] // Elektronnyj periodicheskij nauchnyj zhurnal SCI-ARTICLE – URL: <http://sciarticle.ru/stat.php?i=1540029721> (accessed: 25.04.2020). [in Russian]
6. Priroda Tatarstana [Nature of Tatarstan] // Shkol'naya elektronnyaya enciklopediya «ТАТАР ИЛЕ». [Electronic resource]. URL: <http://tatarile.tatar.ru/encyclopedia/priroda-tatarstana>. (accessed: 15.05.2022). [in Russian]
7. Ekologicheskaya ocenka vozdejstviya gidrotekhnicheskogo stroitel'stva na vodnye ob"ekty [Environmental assessment of the impact of hydrotechnical construction on water bodies.] / V.D. Romanenko, O.A. Oksiyuk, V.N. Zhukinskij et al. – Kiev, 1990. – 256 p. [in Russian]
8. Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverhnostnyh vod i donnyh otlozhenij [Guidelines on methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments] / Ed. by V.A. Abakumova. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 240 p. [in Russian]
9. Tajsin A.S. Ozera Prikazanskogo rajona ih sovremennye prirodnye i antropogennye izmeneniya. [Lakes of the Prikazansky district and modern natural and anthropogenic changes.] // Kazan': Publishing house TGGPU, 2006. – 167 p. [in Russian]
10. STRATEGIYA social'no-ekonomicheskogo razvitiya Laishevskogo municipal'nogo rajona Respubliki Tatarstan na 2019-2021 gody i planovyj period do 2030 goda. [STRATEGY for socio-economic development of the Laishevsky municipal district of the Republic of Tatarstan for 2019-2021 and the planned period until 2030.]. [Electronic resource]. URL: https://laishevo.tatarstan.ru/file/pub/pub_646397.pdf (accessed: 21.02.2022). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.065>

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕНЕСЕННОЙ НОВОЙ КОРОНОВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ НА РАЗВИТИЕ, ТЕЧЕНИЕ И ИСХОД БЕРЕМЕННОСТИ

Научная статья

Кунешко Н.Ф.¹, Гаврикова Д.И.², Голомазова В.А.^{3,*}, Ким В.В.⁴

¹ ORCID: 0000-0002-2754-5129;

² ORCID: 0000-0003-2639-4020;

³ ORCID: 0000-0002-9363-6440;

⁴ ORCID: 0000-0002-1646-8690;

¹ Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Москва, Россия;

^{2,3} Московский городской научно-исследовательский институт скорой помощи имени Н. В. Склифосовского, Москва, Россия;

⁴ Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (katypiska[at]gmail.com)

Аннотация

В современной медицине все больше внимания уделяется проблемам, диагностируемым во время беременности, которые значительно повышают риск роста осложнений и неблагоприятных исходов беременности и родов, а также всей последующей жизни как новорожденного, так и матери [9, С 13-14]. На сегодняшний день задержка внутриутробного роста плода является одной из таких актуальных проблем в акушерстве и перинатологии, а также педиатрии [2].

Согласно данным исследователей, в Российской Федерации ежегодный уровень рождаемости в среднем составляет порядка 1,2-1,5 миллионов детей. При этом примерно 60-150 тысяч детей рождается с задержкой внутриутробного роста, что составляет примерно 10-15% [18, С. 61-82].

Весьма важным компонентом в развитии задержки роста плода являются генетические факторы, определяющим течение патологии, ее характер и вероятность присоединения осложнений [19, С. 19-27].

Выявленные новые генетические маркеры, особенно пренатальные, позволят в будущем значительно повысить уровень диагностики данной патологии.

Ключевые слова: акушерство, задержка внутриутробного роста плода, генетические детерминанты, тромбофилия, генетические полиморфизмы.

COVID-19 IMPACT ON DEVELOPMENT, COURSE AND OUTCOME OF PREGNANCY

Research article

Kuneshko N.F.¹, Gavrikova D.I.², Golomazova V.A.^{3,*}, Kim V.V.⁴

¹ ORCID: 0000-0002-2754-5129;

² ORCID: 0000-0002-9363-6440;

³ ORCID: 0000-0003-2639-4020;

⁴ ORCID: 0000-0002-1646-8690;

¹ I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia;

^{2,3} Moscow City Research Institute of Ambulance named after N. V. Sklifosovsky, Moscow, Russia;

⁴ Moscow State Medical and Dental University named after A.I. Evdokimov, Moscow, Russia

* Corresponding author (katypiska[at]gmail.com)

Abstract

Observation of patients recovered from COVID-19 showed that the disease course is accompanied by various symptoms of disseminated intravascular coagulation. Besides, the manifestation of prolonged (more than 12 weeks) post-COVID syndrome was established which, along with other pathological processes, involves long course of thrombotic microangiopathy combined with hypercoagulability syndrome. Over the course of physiological pregnancy, there is a growing risk of complications, related to both obstetrical hemorrhage and thrombogenesis which are affected by changes in fibrinolytic activity and hypercoagulable state, endothelial dysfunction, blood rheological properties variation. Data on COVID recovery must be taken into account in clinical practice when prescribing hemostatic system in-depth test on the pre-conception stage, on early stages of pregnancy and dynamic pregnancy observation for timely correction of any detected disruptions. Such changes combined with post-COVID thrombotic microangiopathy can dramatically increase risk of such pregnancy complications as preeclampsia, placental insufficiency, fetal hypoxia which, in turn, could lead to intrauterine growth retardation, thus, all of that makes the research relevant.

Keywords: new coronaviral infection, disseminated intravascular coagulation, preeclampsia, placental insufficiency, intrauterine growth retardation.

Введение

Наблюдение за пациентами, перенесшими COVID-19 выявило, что течение заболевания сопровождается появлением различных симптомов тромбогеморрагического синдрома [1].

Кроме того, установлено существование пролонгированного (более 12 недель) постковидного синдрома, который наряду с другими патологическими процессами включает длительно сохраняющуюся тромботическую микроангиопатию в сочетании с синдромом гиперкоагуляции. В их основе лежит дисфункция эндотелиальных клеток, спровоцированная как непосредственно вирусом, так и развившимся цитокиновым штормом, а в последствие – и аутоиммунным повреждением. Эндотелиальная дисфункция приводит к состоянию гиперкоагуляции за счет избыточного образования тромбина и подавления фибринолиза. Наличие сопутствующей патологии в сочетании с нарушением регуляции в системе первичного и вторичного звена гемостаза усугубляет склонность к протромботическим состояниям. Известно, что во время физиологической беременности происходят выраженные изменения функционального состояния системы свертывания крови, что обусловлено необходимостью поддержания метаболизма в плаценте, маточно-плацентарного кровотока и обеспечения послеродового гемостаза. На протяжении течения физиологической беременности увеличивается риск развития осложнений, связанных как с кровотечением, так и с тромбообразованием, на который влияют изменения фибринолитической активности [2] и состояние гиперкоагуляции, эндотелиальная дисфункция, изменение реологических свойств крови. Наложение данных изменений на тромботическую микроангиопатию [3] в результате перенесенной новой коронавирусной инфекции может значительно увеличивать риск развития таких осложнений беременности, как преэклампсия, плацентарная недостаточность, гипоксия плода и, как следствие, вести к задержке внутриутробного роста развития плода, что и обуславливает актуальность настоящего исследования.

Материалы и методы

С целью определения влияния перенесенной новой коронавирусной инфекции на течение и исход беременности было обследовано 55 пациенток в возрасте 22-32 лет, у которых наступила желанная беременность через 3-6 месяцев после перенесенной новой коронавирусной инфекции (группа CI, n=55). Беременные первой группы (CI) были разделены на три подгруппы в зависимости от степени тяжести перенесенного заболевания: легкая (n=15), средняя (n=22) и тяжелая (n=18). При легком течении заболевания клинические симптомы ограничивались субфебрильной температурой тела, слабостью, общим недомоганием, кашлем, болью в горле. При средней степени тяжести температура тела поднималась выше 38°C, частота дыхания более 22 в минуту, появлялась одышка при физической нагрузке, характерные изменения при компьютерной томографии или рентгенографии органов грудной клетки, падение сатурации ниже 95%, повышение уровня С-реактивного белка в сыворотке крови более 10 мг/л. При тяжелом течении отмечалась нестабильная гемодинамика с падением артериального давления, снижение уровня сознания, типичные для вирусного поражения выраженные изменения в легких на томограммах или рентгенограммах, частота дыхания более 30 в минуту, падение сатурации кислорода ниже 93%, соотношение PaO₂ и FiO₂ менее 300 мм рт.ст., повышение лактата артериальной крови более 2 ммоль/л, а qSOFA более 2 баллов. Пациентки данной подгруппы получали комплексное лечение в условиях стационара.

В контрольную группу (группа II, n=28) вошли практически здоровые женщины без отягощенного акушерского анамнеза с одноплодной, первой по счету, самопроизвольно наступившей беременностью, не болевшие новой коронавирусной инфекцией.

При сборе анамнеза и первичном осмотре было установлено, что сопутствующая соматическая патология отмечалась у 94,4% беременных. Среди нозологических форм преобладала хроническая железодефицитная анемия (55,2%), на втором месте – патология щитовидной железы (26,6%), на третьем – органа зрения (21,7%), на четвертом – заболевания желудочно-кишечного тракта (13,9%). В группе CI заболевания органов дыхания (такие как хронический бронхит, бронхиальная астма) отмечались в 6,1 раз чаще (p=0,026), чем у здоровых беременных женщин. Также замечено, что в подгруппе пациенток, перенесших заболевание новой коронавирусной инфекцией в тяжелой степени, частота соматической патологии была выше, чем у пациенток, перенесших заболевание в легкой форме. Эти данные подтверждают и результаты корреляционного анализа, свидетельствующие о том, что у пациенток с соматической патологией заболевание COVID-19 чаще протекает в более тяжелой форме (G=0,27, p=0,042).

Сопутствующие гинекологические заболевания выявлены у трети беременных, статистически значимых отличий между группами не установлено (таблица 2). Среди нозологических форм во всех группах преобладала эктопия шейки матки (16,8%), на втором месте – киста яичника (6,3%), на третьем – хронический аднексит (4,9%). Таким образом, группы были сопоставимы по соматическому и гинекологическому статусу.

Анализ паритета показал, что подавляющее большинство пациенток групп CI были первобеременные и первородящие, повторнобеременными были треть опрошенных женщин, повторнородящими – 26,1% пациенток (таблица 3). У 14,5% пациенток группы CI выявлен отягощенный акушерский анамнез.

Таблица 1 – Структура соматической патологии у обследованных беременных женщин

Нозологическая форма	Группа				
	CI (n=55)				II (n=28)
	Легкая (n=15)	Средняя (n=22)	Тяжелая (n=18)	Всего	
Хроническая ЖДА	8	14	13	35	13
Заболевания органов дыхания	2	5	5	12	1
Артериальная гипертензия	0	2	2	4	1
Заболевания сердца	0	1	1	2	1
Варикозная болезнь нижних конечностей	1	2	3	6	3
Заболевания ЖКТ	1	4	3	8	4
Заболевания ЖВП	1	1	3	5	1
Заболевания органа зрения	3	5	4	12	13
Спаечная болезнь	0	1	1	2	0
Урологические заболевания	2	3	3	8	2
Заболевания ЛОР-органов	2	4	4	10	3
Заболевания кожи	0	1	0	1	0
Заболевания щитовидной железы	4	7	6	17	6
ДСТ, ВСД	1	2	2	5	2

Таблица 2 – Структура гинекологических заболеваний у обследованных беременных

Нозологическая форма	Группа	
	CI (n=55)	СII (n=28)
Эктопия ШМ	9	5
Киста яичника	3	2
Хронический аднексит	3	1
Миома матки	0	0
СПКЯ	1	0
Вагинит	1	0
Апоплексия яичника	1	1

Таблица 3 – Паритет и акушерский анамнез обследованных беременных

Показатель	Группа	
	CI (n=55)	СII (n=28)
Количество беременностей:		
1	35	28
2	19	0
3	1	0

Окончание таблицы 3 – Паритет и акушерский анамнез обследованных беременных

Показатель	Группа	
	CI (n=55)	СИ (n=28)
Наличие мед. аборт	4	0
Самопроизвольный выкидыш в анамнезе	2	0
Внематочная беременность в анамнезе	1	0
Замершая беременность в анамнезе	1	0
По количеству родов:		
Первородящая	40	28
Повторнородящая	15	0

Анализ клинического течения беременности показал, что главным осложнением был ранний токсикоз, беспокоящий 27,3% пациенток от общего числа обследованных (таблица 4). Угроза самопроизвольного выкидыша в I триместре отмечалась у 4,2% пациенток.

Во II триместре угроза самопроизвольного выкидыша зарегистрирована у 11,2% беременных.

В начале II триместра обращали внимание на следующие признаки преэклампсии на доклинической стадии: положительный тест с переворачиванием (изменение диастолического давления более чем на 20 мм. рт. ст. при трехкратном измерении артериального давления с интервалом в 5 минут в положении беременной в начале на боку, затем на спине и вновь на боку); отсутствие снижения СДО (систола-диастолическое отношение) в спиральных артериях миометрия и маточных артериях в сроке 14-16 недель по данным ультразвукового исследования с доплерометрией, свидетельствующее о нарушении маточно-плацентарного кровотока; [3] снижение числа тромбоцитов (менее $160 \times 10^9/\text{л}$), прогрессирующее по мере увеличения срока беременности; лимфопения (18% и менее); снижение АЧТВ (активированное частичное тромбопластиновое время) менее 20 сек, повышение агрегации тромбоцитов до 76%, гиперфибриногенемия до 4,5 г/л, свидетельствующие о гиперкоагуляции [4] в клеточном и плазменном звеньях гемостаза; снижение уровня антикоагулянтов (эндогенного гепарина до 0,07 ед. мл, антитромбина III до 63%).

Клинические симптомы преэклампсии выявлены у 17,5% беременных: отеки нижних конечностей, появление белка в общем анализе мочи, повышение артериального давления, часто сопровождающегося жалобами на головную боль, головокружение, ухудшение самочувствия, слабость. Установлено, что у пациенток, перенесших COVID-19 в тяжелом состоянии проявления преэклампсии отмечались в 2,1 раз чаще ($p=0,056$) по сравнению с переболевшими в легкой форме.

В III триместре угроза преждевременных родов отмечалась в 21,7%, признаки преэклампсии в 39,2% случаев. У 9,8% беременных выявлена преэклампсия средней степени тяжести, среди клинических признаков которой наиболее часто отмечалась головная боль различной локализации, кроме того, беременные предъявляли жалобы на ухудшение зрения, сонливость, перепады настроения, тошноту, иногда рвоту, чувство жара, затруднение дыхания. Отмечались гиперемия лица, тахипноэ, речевые затруднения, гипертермия, снижение слуха.

Таблица 4 – Клиническое течение беременности у женщин

Подгруппа		CI (n=55)				СИ (n=28)
		легкая (n=15)	средняя (n=22)	тяжелая (n=18)	Всего	
Триместр I	Ранний токсикоз	4	6	6	16	7
	Угроза самопроизвольного выкидыша	0	1	2	3	1
Триместр II	Угроза самопроизвольного выкидыша	2	3	2	7	3
	Преэклампсия	2	5	5	12	4
	Плацентарная недостаточность	2	4	5	11	3

Окончание таблицы 4 – Клиническое течение беременности у женщин

Подгруппа		СІ (n=55)				СІІ (n=28)
Параметры		легкая (n=15)	средняя (n=22)	тяжелая (n=18)	Всего	
Триместр ІІІ	Угроза преждевременных родов	3	5	5	13	6
	Преэклампсия средней степени тяжести	1	2	3	6	3
	Плацентарная недостаточность	1	3	4	8	2
	Гипоксия плода	1	2	4	7	2
	Нарушение гемодинамики плода при кардиотокографии по типу ІА	1	1	2	4	1

При анализе течения родов и послеродового периода у обследованных женщин установлено, что все роды были в сроке 37 недель и более (таблица 5). Преждевременное излитие околоплодных вод отмечалось у 2/3 беременных. Амниотомия при раскрытии шейки матки менее 8 см была проведена в 10,5% случаев. Аномалии родовой деятельности в виде слабости или дискоординации отмечались у 8,4% рожениц, что потребовало медикаментозной коррекции [11].

Таблица 5 – Особенности течения родов у обследованных женщин

Показатель	Группа				
	СІ (n=55)				ІІІ (n=28)
	Легкая (n=15)	Средняя (n=22)	Тяжелая (n=18)	Всего	
Срок гестации:					
• 37 недель	0	1	3	4	3
• 38-39 недель	7	10	8	25	10
• 40-41 неделя	7	11	7	25	12
• 42 недели	1	0	0	1	1
Преждевременное излитие вод:					
• раннее	10	14	12	36	17
• дородовое	3	5	4	12	5
	7	9	8	24	12
Аномалии родовой деятельности	1	2	3	6	2
Медикаментозное родоусиление	4	7	6	17	8
Родоразрешение путем кесарева сечения	1	1	4	6	0
Роды вагинальные самостоятельные	14	21	14	49	28
Разрывы мягких тканей родовых путей:					
• разрыв шейки матки 1 степени,	0	1	0	1	0
• разрыв стенок влагалища,	1	2	1	4	2
• разрыв малых половых губ,	0	1	1	2	1
• разрыв промежности 1 степени	3	7	5	15	7
Эпизиотомия	5	6	5	16	4
Обычная продолжительность родов	12	17	12	41	26
Быстрые роды	2	3	2	7	2
Стремительные роды	0	1	0	1	0

Травмы мягких родовых путей осложнили течение вагинальных родов в 56 случаях (41,5% от общего числа вагинальных родов). Среди них преобладали разрывы промежности I степени – 67,9% от общего числа травм, на втором месте – разрывы стенок влагалища – 19,6%, на третьем – разрыв малых половых губ – 8,9%. Быстрые роды отмечались в 17 случаях (12,3% от всех вагинальных родов), стремительные – в 2 (1,5%). Не выявлено статистически значимых различий между группами и влияния перенесенной новой коронавирусной инфекции и вакцинации на течение вагинальных родов.

Уровень кровопотери в родах составил от 100 до 500 мл. Гипотоническое кровотечение развилось в 2 случаях (1,4%). Задержка частей последа в полости матки отмечалась в 4 случаях (2,8%), в трех из них потребовалось ручное отделение и выделение последа, кроме того, необходимость в ручном обследовании полости матки возникла в 8 случаях (5,6%).

Таблица 6 – Особенности течения раннего послеродового периода у женщин

Показатель	Группа				
	CI (n=55)				III (n=28)
	Легкая (n=15)	Средняя (n=22)	Тяжелая (n=18)	Всего	
Наличие гипотонического кровотечения	0	1/4,5	0	1/1,8	0
Объем кровопотери, мл	171,4	179,7	196,2	182,6	168,3
Задержка частей последа в полости матки	0	1	1	2	0
Ручное отделение и выделение последа	0	1	1	2	0
Ручное обследование полости матки	1	2	2	5	1
Проведение трансфузии свежемороженой плазмы	0	0	2	2	0
Проведение трансфузии эритроцитарной массы	0	0	2	2	0
Назначение антибактериальных средств	3	6	8	17	3

В целом, несмотря на отсутствие статистически значимых различий показано, что у пациенток, переболевших COVID-19 в тяжелой степени, наблюдается тенденция к увеличению риска развития осложнений беременности, родов и раннего послеродового периода.

Результаты сравнительного анализа данных лабораторных методов обследования

Всем беременным при поступлении проводили комплекс общеклинических обследований. Дисперсионный анализ Краскелла-Уоллиса и парное сравнение не выявили статистически значимых отличий между группами по показателям развернутого анализа крови (таблица 7). Так, уровень гемоглобина в группе CI был на 3,5% ниже ($p=0,91$) по сравнению с контрольной группой, количество эритроцитов – на 5,9% ($p=0,78$), лейкоцитов – на 9,8% ($p=0,39$), сегментоядерных нейтрофилов – на 4,1% ($p=0,87$), лимфоцитов – на 17,4% ($p=0,073$) соответственно.

Таблица 7 – Результаты общего анализа крови у обследованных беременных женщин

Показатель	Группа CI (n=55)	Группа III (n=28)	H, p
Гемоглобин, г/л	110	114	1,8; 0,37
Гематокрит, %	32	33	3,4; 0,16
СОЭ, мм/ч	39	35	1,1; 0,59
Лейкоциты, $\cdot 10^9/\text{л}$	8,3	9,2	0,04; 0,96
Эритроциты, $\cdot 10^{12}/\text{л}$	3,2	3,4	1,3; 0,52
Палочкоядерные нейтрофилы, %	1	1	0,91; 0,65

Окончание таблицы 7 – Результаты общего анализа крови у обследованных беременных женщин

Показатель	Группа CI (n=55)	Группа III (n=28)	H, p
Сегментоядерные нейтрофилы, %	71	74	3,1; 0,22
Лимфоциты, %	19	23	1,94; 0,36
Моноциты, %	4	4	2,3; 0,32
Эозинофилы, %	1	1	3,2; 0,17

Дисперсионный анализ Краскелла-Уоллиса и парное сравнение не выявили статистически значимых отличий между группами по показателям биохимического анализа крови (таблица 8).

Таблица 8 – Результаты биохимического анализа крови у обследованных беременных женщин

Показатель	Группа CI (n=55)	Группа III (n=28)	H, p
Общий белок, г/л	64,2	65,8	1,68; 0,47
Общий билирубин, мкмоль/л	9,7	8,7	0,32; 0,78
Креатинин, мкмоль/л	69,6	70,5	0,92; 0,59
Мочевина, мкмоль/л	3,3	3,9	0,66; 0,68
АЛАТ, ед	24,6	23,0	0,021; 0,81
АсАТ, ед	34,2	31,0	1,38; 0,57
Глюкоза, мкмоль/л	4,1	3,9	4,9; 0,18

В связи с патологическим влиянием вирусной инфекции на микроциркуляторное русло и систему гемостаза особое внимание уделяли детальному анализу показателям коагулограммы беременных женщин (таблица 9).

Количество тромбоцитов в первом триместре беременности колебалось от 200 до 250*10⁹/л и статистически значимо не отличалось в группах. Необходимо отметить, что сумма активных форм тромбоцитов и показатель агрегации тромбоцитов на всем протяжении наблюдения были наибольшими в группе женщин, перенесших заболевание новой коронавирусной инфекцией в тяжелой степени. Вот втором триместре сумма активных форм кислорода у женщин, переболевших коронавирусной инфекцией в тяжелой степени, превышала аналогичный показатель у женщин, переболевших в легкой степени, на 28,6% (p=0,042), а в средней степени тяжести – на 8,9% (p=0,68), в третьем триместре – на 24,1 (p=0,048) и 13,3% (p=0,44) соответственно.

Активированное частичное тромбопластиновое время (АЧТВ), как показатель скорости свертываемости крови, в первом триместре беременности составляло от 25 до 35 секунд и статистически значимо не отличалось в группах. Во втором триместре наибольшее АЧТВ отмечалось в контрольной

группе, в группе CI оно было короче на 9,7% (p=0,57); в третьем триместре тенденция сохранялась: на 14,8% (p=0,42) соответственно.

Таблица 9 – Изменение показателей системы гемостаза у беременных женщин после перенесенной коронавирусной инфекции

Параметры	Группа	CI (n=55)				III (n=28)
		легкая (n=15)	средняя (n=22)	тяжелая (n=18)	Всего	
Триместр I	Тромбоциты крови, *10 ⁹ /л	213	218	228	220	215
	Сумма активных форм тромбоцитов, %	12,2	12,3	13,2	12,6	12,0
	Агрегация тромбоцитов с ристомидином, %	92,0	96,5	101,2	96,6	91,4
	АЧТВ, сек.	31,3	30,6	28,4	30,1	33,0
	Фибриноген, г/л	3,7	3,9	4,2	3,85	3,6
	Фибринолитическая активность крови, %	6,4	6,2	6,0	6,2	6,5
	D-димер, нг/мл	185	193	202	192	186

Окончание таблицы 9 – Изменение показателей системы гемостаза у беременных женщин после перенесенной коронавирусной инфекции

Параметры	Группа	СІ (n=55)				ІІІ (n=28)
		легкая (n=15)	средняя (n=22)	тяжелая (n=18)	Всего	
Триместр ІІ	Тромбоциты крови, *10 ⁹ /л	305	311	332	315	302
	Сумма активных форм тромбоцитов, %	13,3	15,7	17,1	15,5	13,2
	Агрегация тромбоцитов с ристомидином, %	99,0	105,6	109,3	104,5	99,4
	АЧТВ, сек.	35,0	33,8	30,2	33,4	36,5
	Фибриноген, г/л	4,0	4,1	4,3	4,1	3,95
	Фибринолитическая активность крови, %	6,3	6,0	5,8	6,1	6,4
	Д-димер, нг/мл	386	394	432	403	370
Триместр ІІІ	Тромбоциты крови, *10 ⁹ /л	265	281	312	285	260
	Сумма активных форм тромбоцитов, %	15,8	17,3	19,6	17,6	14,8
	АЧТВ, сек.	40,6	38,4	34,2	37,5	41,4
	Фибриноген, г/л	4,3	4,4	4,6	4,4	4,2
	Д-димер	1516	1783	2055	1780	1387

Фибринолитическая активность [5] крови в группе СІ была ниже на 4,6% (p=0,82) в первом триместре и на 6,2% (p=0,66) во втором триместре.

Одним из наиболее информативных показателей тромбообразования является Д-димер, представляющий собой белковую фракцию, появляющуюся в результате распада фибрина в процессе растворения кровяных сгустков. На протяжении нормально протекающей беременности уровень Д-димера в плазме крови постепенно увеличивается в несколько раз, что является механизмом защиты организма женщины от кровопотери в родах, и достигает своего максимума. Снижение уровня Д-димера свидетельствует о недостаточно свертываемости крови и высоком риске кровотечения.

Установлено, что в первом триместре уровень Д-димера находился в пределах 170-215 нг/мл, в группе СІ он был выше на 3,2% (p=0,88) по сравнению с контрольной группой. Во втором триместре уровень Д-димера увеличился в контрольной группе в 2 раза (p=0,0001), а в группе СІ в 2,1 раз (p=0,0001) и превышал аналогичный показатель в контрольной группе на 7,5% (p=0,68). В третьем триместре уровень Д-димера увеличился в контрольной группе еще в 3,6 раза (p=0,00001), а в группе СІ в 4,4 раза (p=0,00001) и превышал аналогичный показатель в контрольной группе на 31,3% (p=0,005).

Для дополнительного исследования системы гемостаза всем пациенткам помимо основных общеклинических анализов было проведено исследование тромбоэластограммы (ТЕГ). Дисперсионный анализ не выявил статистически значимых различий по показателям между группами (таблица 10).

Таблица 10 – Показатели тромбоэластограммы у обследованных беременных женщин

Показатель	Группа СІ (n=55)	Группа ІІІ (n=28)	Н, p
Активное время свертывания (R), мин	5,0	5,3	1,58
Время образования сгустка (K), мм	1,55	1,85	6,1
Активность фибриногена (Angle)	70,2	64,8	4,6
Агрегация тромбоцитов (МА), мм	60,1	50,3	6,7

Выводы исследований

Таким образом, картина гиперкоагуляционного синдрома, характеризующегося снижением активного времени свертывания (R) и времени образования сгустка и (K), увеличением активности фибриногена (Angle) и агрегации тромбоцитов (МА), отмечалась у 9 беременных в группе СІ (16,4%) и ни в одном случае в контрольной группе. Признаки гипокоагуляции, включающие увеличение активного времени свертывания (R) и времени образования сгустка (K), снижение активности фибриногена (Angle) и агрегации тромбоцитов (МА), выявлялись у 1 пациентки (1,8%) группы СІ. Кроме того, снижение агрегации тромбоцитов на фоне нормальных значений остальных показателей расценивались как

проявления первичного фибринолиза и наблюдались у 4 пациенток (14,3%) контрольной группы и 5 беременных (10,9%) группы СІ.

Данные нарушения более выражены при тяжелом течении заболевания, однако прямой зависимости между ними не выявлено. Латентное течение тромботической микроангиопатии в сочетании с синдромом гиперкоагуляции может проявиться во время беременности при перестройке организма к новым условиям функционирования. Изменения в системе гемостаза, характеризующиеся увеличением тромботической активности крови на фоне снижения способности противосвертывающей системы крови препятствовать образованию тромбов, могут являться одним из важнейших факторов развития преэклампсии, плацентарной недостаточности и гипоксии плода у пациенток, планирующих беременность после перенесенной коронавирусной инфекции.

Результаты сравнительного анализа состояния новорожденных детей

Установлено, что среди новорожденных детей было 54,5% мальчиков и 45,5% девочек. Статистически значимых различий по антропометрическим показателям детей между группами не выявлено. В этой же подгруппе отмечалось 4 случая недоношенности из 6, зарегистрированных в исследовании, 2 случая гипотрофии плода с синдромом внутриутробной задержки из 4, и 2 случая морфо-функциональной незрелости из 3 (таблица 11).

Таблица 11 – Состояние новорожденных у обследованных родильниц

Показатель	Группа				
	СІ (n=55)				III (n=28)
	Легкая (n=15)	Средняя (n=22)	Тяжелая (n=18)	Всего	
Вес, гр	3525 (3180; 3785)	3375 (2980; 3675)	3195 (2865; 3535)	3385 (3015; 3645)	3503 (3210; 3750)
Рост, см	52	51	50	52	52
Крупный плод	0	1	0	1	1
Недоношенность	0	1	4	5	0
Выход мекония в околоплодные воды					
1А	1	2	4	7	2
2А	1	1	1	3	2
2Б	0	1	1	2	0
2Б	0	0	2	1	0
Пол:					
- мальчик,	8	12	9	29	16
- девочка.	7	10	9	26	12
КТГ в родах, баллы					
6 и менее	0	1	2	3	1
7	1	2	2	5	2
8	10	13	10	33	15
9 и более	4	6	4	14	10
Оценка по Апгар на 1 мин, баллы:					
6 и менее	0	1	4	5	1
7	6	8	7	21	7
8	9	13	7	29	20
Оценка по Апгар на 5 мин, баллы:					
6	0	0	1	1	0
7	0	1	4	5	0
8	10	14	10	34	18
9	5	7	3	15	10
Практически здоров	3	5	3	11	6
Ишемия ЦНС:					
• синдром возбуждения	12	16	13	41	21
• синдром угнетения	0	1	2	3	1
Гипербилирубинемия	0	2	3	5	2

Окончание таблицы 11 – Состояние новорожденных у обследованных родильниц

Показатель	Группа				
	СІ (n=55)				ІІІ (n=28)
	Легкая (n=15)	Средняя (n=22)		Тяжелая (n=18)	
СЗРП, гипотрофия	0	1	2	3	0
Морфо-функциональная незрелость	0	0	2	2	0
Перелом ключицы	0	1	1	2	0
Кривошея	0	1	1	2	1
Нарушение установки стоп:	1	1	0	2	0
Кефалогематома	0	1	1	2	0

Выход мекония в околоплодные воды отмечался в 13 (9,1%) случаях: в том числе в 7 случаях 1А степень, в 4 – 2А и в 1 – 2Б. По результатам КТГ в родах в 6 (4,2%) случаях результат оценивался в 6 баллов, в 13 (9,1%) – 7 баллов, в 80 (55,9%) – 8 баллов, 44 (30,8%) – 9 баллов и более. Оценку в 6 баллов по шкале Апгар на 1 минуте получили 8 новорожденных (5,6%), 7 баллов – 45 (31,5%), 8 баллов – 90 (62,9%). На 5 минуте оценку по шкале Апгар в 6 баллов получил 1 новорожденный (0,7%), 7 баллов – 6 (4,2%), 8 баллов – 92 (64,3%), 9 баллов – 44 (30,8%). Наиболее низкие показатели отмечались у новорожденных в подгруппе женщин, переболевших новой коронавирусной инфекцией в тяжелой степени, хотя в целом статистически значимых отличий обнаружено не было.

Практически здоровыми были признаны 29 новорожденных (20,3% от общего числа). У остальных имелись признаки ишемии центральной нервной системы, в том числе у 6 (4,2%) – синдром угнетения. Гипербилирубинемия отмечалась у 12 детей (8,4%), перелом ключицы – у 3 (2,1%), кривошея – у 5 (3,5%), нарушение установки стоп – у 3 (2,1%), кефалогематома – у 3 (2,1%).

Плодово-плацентарный коэффициент статистически значимо не отличался в группах.

Структурно-функциональные нарушения микроциркуляторного русла плаценты, являясь изначально следствием изменений в системе гемостаза, в последующем сами являются причиной нарушения роста и развития плода и обуславливают иммунологические механизмы повреждения плацентарных структур. [6] При исследовании последа установлено, что в половине случаев строения плаценты соответствовало сроку гестации, в 39 случаях (27,3%) отмечалось диссоциированное созревание плаценты, в 21 (14,7%) – замедленное, в 3 (2,1%) – преждевременное, в 3 (2,1%) – незрелость плаценты. Среди морфологических изменений преобладали кальцинаты в плаценте – 51 (35,7%), на втором месте – отложения фибриноида в строме ворсин и межворсинчатом пространстве – 48 (33,6%), на третьем – умеренный ангиоматоз – 39 (27,3%), на четвертом – признаки слабой облитерирующей ангиопатии – 32 (22,4%). В единичных случаях, преимущественно в группе СІ, отмечались афункциональные зоны, кровоизлияния, серозно-базальный децидуит, хориоамнионит. В большинстве случаев КПП расценивался как умеренный, в ¼ - как слабый. Обращает на себя внимание тот факт, что наибольшие изменения в плаценте были характерны для женщин, перенесших заболевание новой коронавирусной инфекцией в тяжелой степени. Синдром гиперкоагуляции, который чаще встречается у данной категории пациенток, может приводить к увеличению отложения фибрина в плаценте и преждевременному ее старению, повышению резистентности сосудов и нарушению маточно-плацентарного кровотока.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенного нами исследования было комплексно изучено течение беременности и родов у женщин, переболевших новой коронавирусной инфекцией разной степени тяжести, а также состояние их новорожденных детей. Было показано существование длительного постковидного синдрома. Данные о перенесенном заболевании новой коронавирусной инфекцией необходимо учитывать в клинической практике при назначении углубленного анализа системы гемостаза на этапе прегравидарной подготовки, ранних сроках беременности и динамического наблюдения во время беременности для своевременной коррекции выявленных нарушений.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Anticoagulant treatment is associated with decreased mortality in severe Coronavirus disease 2019 patients with coagulopathy. / Tang N, Bai H, Chen X, et al. // J Thromb Haemost. –2020. – 18(5). – pp. 1094-1099.
2. Acute fibrinolysis shutdown occurs early in septic shock and is associated with increased morbidity and mortality: results of a observational pilot study / Schmitt FC, Manolov V, Morgenstern J, et al. // Ann Intensive Care. – 2019. – № 9(1). – 19 p.

3. COVID-19 и сердечно-сосудистая система. Часть II. Постковидный синдром / Иванников А.А., Эсауленко А.Н., Васильченко М.К. и др. // Журнал им. Н.В. Склифосовского Неотложная медицинская помощь. – 2021. – № 10(2). – С. 248-258.

4. Бышевский А. Ш. Гемостаз при физиологической беременности, беременности с артериальной гипертензией и преэклампсией / А. Ш. Бышевский, В. А. Полякова, А. Ю. Рудзевич // Тромбоз, гемостаз и реология. – 2010. – № 4 (44). – С. 13-30

5. Eichinger S. D-dimer testing in pregnancy / S. Eichinger // Pathophysiology of haemostasis and thrombosis. – 2003/2004. – No. 33. – pp. 327-329.

6. Szecsi P. B. Haemostatic reference intervals in pregnancy / P. B. Szecsi, M. Jorgensen, A. Klajnbard // Thrombosis and haemostasis. – 2010. – Vol. 103. – №4. – pp. 718-727.

7. Ульянина Е.В. Комплексный подход в диагностике синдрома задержки развития плода / Ульянина Е.В., Акопян Г.В., Ахмадеев Н.Р. // Практическая медицина. – 2018. – № 6. – С. 151-154.

8. Fetal growth restriction and methylation of growth-related genes in the placenta / X. Xiao, Y.Zhao, R. Jin et al. // Epigenomics. – 2016. – Vol. 8. – №1. – pp. 33-42.

9. Экспрессия плацента-специфичных микроРНК при задержке роста плода / И.О. Буштырева, Н.Б. Кузнецова, Е.А. Забанова и др. // Акушерство и Гинекология. – 2021. – №2. – С. 128

10. Яковлева О.А. Особенности течения беременности и родов у ВИЧ-инфицированных женщин с преждевременными родами / О.А. Яковлева, Е.Н. Кравченко, Л.В. Куклина // Мать и дитя в Кузбассе. – 2018. – № 1 (72). – С. 67-71.

11. Ярыгина Т.А. Задержка (замедление) роста плода: современные принципы диагностики, классификации и динамического наблюдения / Т.А. Ярыгина, Р.С. Батаева // Ультразвуковая и функциональная диагностика. – 2019. – № 2. – С. 33-44.

12. Fetal growth restriction is a host specific response to infection with an impaired spiral artery remodeling-inducing strain of *Porphyromonas gingivalis* / T. Tavana, P.L. Phillips, X.Wu, et al. // Sci Rep. – 2020. – Vol. 10. – pp. 14606.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Anticoagulant treatment is associated with decreased mortality in severe Coronavirus disease 2019 patients with coagulopathy / Tang N, Bai H, Chen X, et al. // J Thromb Haemost. –2020. – 18(5). – pp. 1094-1099.

2. Acute fibrinolysis shutdown occurs early in septic shock and is associated with increased morbidity and mortality: results of a observational pilot study / Schmitt FC, Manolov V, Morgenstern J, et al. // Ann Intensive Care. – 2019. – № 9(1). – 19 p.

3. COVID-19 i serdechno-sosudistaya sistema. CHast' II. Postkovidnyj sindrom [COVID-19 and cardio-vascular system. Part II. Post-COVID syndrome]. / A.N. Esaulenko, M.K. Vasil'chenko, CH.G. Alidzhanova et al. // ZHurnal im. N.V. Sklifosovskogo Neotlozhnaya medicinskaya pomoshch' [Sklifosovsky Journal: Emergency care]. – 2021. – No. 10(2). – pp. 248-258. [in Russian]

4. Byshevskij A. SH. Gemostaz pri fiziologicheskoj beremennosti, beremennosti s arterial'noj gipertenziej i preeklampsiej [Hemostasis during physical pregnancy, pregnancy with arterial hypertension and preeclampsia] / V.A. Polyakova, A. YU. Rudzевич // Tromboz, gemostaz i reologiya [Thrombosis, hemostasis and rheology]. – № 4 (44). – pp. 13-30. [in Russian]

5. Eichinger S. D-dimer testing in pregnancy / S. Eichinger // Pathophysiology of haemostasis and thrombosis. – 2003/2004. – No. 33. – pp. 327-329.

6. Szecsi P. B. Haemostatic reference intervals in pregnancy / P. B. Szecsi, M. Jorgensen, A. Klajnbard // Thrombosis and haemostasis. – 2010. – Vol. 103. – №4. – pp. 718-727.

7. Ul'yanina E.V. Kompleksnyj podhod v diagnostike sindroma zaderzhki razvitiya ploda [Complex approach to fetal growth retardation syndrome diagnosis] / E.V. Ul'yanina, G.V. Akopyan, N.R. Ahmadeev // Prakticheskaya medicina [Practical medicine]. – 2018. – № 6. – pp. 151-154. [in Russian]

8. Fetal growth restriction and methylation of growth-related genes in the placenta / X. Xiao, Y.Zhao, R. Jin et al. // Epigenomics. – 2016. – Vol. 8. – №1. – pp. 33-42.

9. Ekspressiya placenta-spezifichnyh mikroRNK pri zaderzhke rosta ploda [Expression of placenta-specific microRNAs in fetal growth retardation syndrome] / I.O. Bushtyрева, N.B. Kuznecova, E.A. Zabanova et al. // Akusherstvo i Ginekologiya [Obstetrics and gynecology]. – 2021. – №2. – pp. 128 [in Russian]

10. YAkovleva O.A. Osobennosti techeniya beremennosti i rodov u VICH-inficirovannyh zhenshchin s prezhdevremennymi rodami [Specifics of pregnancy and childbirth of HIV-positive patients with pre-term birth] / O.A. YAkovleva, E.N. Kravchenko, L.V. Kuklina // Mat' i ditya v Kuzbasse [Mother and child in Kuzbass]. – 2018. – № 1 (72). – P. 67-71. [in Russian]

11. YAr'ygina T.A. Zaderzhka (zamedlenie) rosta ploda: sovremennye principy diagnostiki, klassifikacii i dinamicheskogo nablyudeniya [Stunting (slowing) of fetal growth: modern principles of diagnostics, classification and dynamic observation] / T.A. YAr'ygina, R.S. Bataeva // Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika [Ultrasound and functional diagnostics]. – 2019. – № 2. – pp. 33-44. [in Russian]

12. Fetal growth restriction is a host specific response to infection with an impaired spiral artery remodeling-inducing strain of *Porphyromonas gingivalis* / T. Tavana, P.L. Phillips, X.Wu, et al. // Sci Rep. – 2020. – Vol. 10. – pp. 14606.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.066>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В СОСТАВЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОСТА

Научная статья

Мельник О.А.^{1,*}, Никифорова Ю.Ю.²

^{1,2} Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия

* Корреспондирующий автор (melnik_olga240781[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются возможности использования различных отходов промышленности и сельского хозяйства в составе органоминерального компоста для повышения продуктивности агроландшафтов. Результаты производственного опыта, заложенного на территории ОАО «Заветы Ильича» Ленинградского района Краснодарского края, показали положительное действие предлагаемого компоста на агрофизические, агрохимические и биологические свойства чернозема обыкновенного в течение 5 лет. Кроме того, органоминеральный компост способствовал повышению урожайности сельскохозяйственных культур, представленных в севообороте (озимая пшеница, кукуруза на зерно, сахарная свекла), и качества их продукции.

Ключевые слова: отходы, фосфогипс, полуперепревший навоз КРС, растительные остатки, органоминеральный компост, свойства почвы, сельскохозяйственные культуры.

USE OF INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL WASTE IN ORGANIC MINERAL COMPOST

Research article

Mel'nik O.A.^{1,*}, Nikiforenko Yu.Yu.²

¹Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

* Corresponding author (melnik_olga240781[at]mail.ru)

Abstract

The article analyzes the possibilities of using various industrial and agricultural wastes in composition of organic mineral compost to increase productivity of agricultural landscapes. The results of the production experience carried out on the territory of «Zavety Il'icha» OJSC of the Leningrad district of the Krasnodar Territory, showed the positive effect of the proposed compost on the agrophysical, agrochemical and biological properties of ordinary chernozem over the course of 5 years. In addition, organic mineral compost contributed to increasing crop yields and the quality of crops produced in crop rotation (winter wheat, grain maize, white beet).

Keywords: wastes, phosphogypsum, half-processed cattle dung, plant matter, organic mineral compost, soil properties, agricultural crops.

Введение

В современном мире идет интенсивное нарушение активности функций почвенного покрова, что связано с сельскохозяйственным использованием территории, а также ростом земельных площадей, занятых различными отходами производства и потребления [6, С. 179–180], [8, С. 3–6], [14]. Окружающая среда в пределах зон размещения полигонов для захоронения отходов испытывает значительную техногенную нагрузку, зачастую превышающую природные возможности самовосстановления среды. Грамотное комбинирование полезных характеристик отходов в зависимости от экологического состояния почвенного покрова позволяет создавать разнообразные компосты, внесение которых в почву существенно дополняет и улучшает ее физические, химические и биологические свойства [1, С. 45–52], [2], [6, С. 179–181], [10, С. 210–211], [12], [13, С. 88–90]. В настоящей статье предлагается оценить возможность использования различных отходов в качестве сырьевой основы органоминеральных компостов для повышения плодородия почвы и качества растениеводческой продукции. Для этого необходимо было: 1) изучить свойства отходов промышленного и сельскохозяйственного производства и возможности их комбинирования для создания компостов [5, С. 34–37], [9, С. 6–10], [15, С. 71–75]; 2) оценить влияние применения органоминерального компоста на физические, химические и биологические свойства почвы [2, С. 5–78], [3], [4], [11, С. 49–91]; 3) выявить воздействие компоста на рост, развитие и продуктивность сельскохозяйственных культур, качество их продукции [1, С. 58–63], [2, С. 134–168], [7, С. 119–124]; 4) оценить эффективность использования органоминерального компоста для оптимизации экологических параметров почвы и охраны окружающей среды в целом.

Материалы и методы исследований

Для приготовления и размещения органоминерального компоста была использована уплотненная глиняная площадка с заглубленным днищем на 0,4 м, расположенная вблизи фермы ОАО «Заветы Ильича» Ленинградского района Краснодарского края. Компост включал в себя следующие компоненты: полуперепревший навоз КРС (50 т), фосфогипс (7 т), пшеничную и ячменную солому (3 т), древесные опилки (2 т), шелуху семян подсолнечника (1 т), а также отходы свеклы, выжимки овощных культур, растительные остатки кукурузы, смет с фермы (1–2 т). Период созревания компоста составил 3–4 месяца. Перемешивание органоминерального компоста осуществлялось ежемесячно.

В сентябре 2016 года был заложен производственный опыт по изучению влияния модернизации технологических приемов возделывания сельскохозяйственных культур. В опыте под посев озимой пшеницы вносился предлагаемый компост на основе отходов промышленных и сельскохозяйственных производств в дозе 65–70 т/га. Площадь опытного

участка с внесением компоста составила 25 га, контрольного (с внесением только минеральных удобрений) – 27 га. За пятилетний период севооборот был представлен следующими сельскохозяйственными культурами: озимая пшеница – кукуруза на зерно – озимая пшеница – сахарная свекла – озимая пшеница.

Изучение влияния органоминерального компоста на продуктивность агроландшафта осуществляли по пяти основным этапам:

1. Оценка экологического состояния почвенного покрова на территории, выбранной для проведения опыта, включала оценку агрохимических свойств почвенного покрова (содержание органического вещества, общего азота, фосфора и калия); оценку физико-химических свойств почвенного покрова (реакция почвенного раствора, сумма обменных оснований, гидролитическая кислотность и емкость катионного обмена почвы); оценку агрофизических свойств почвенного покрова (полевая влажность, плотность, пористость, влагоемкость, гранулометрический и агрегатный состав почвы); анализ активности почвенной фауны.

2. Планирование мероприятий – включало расчет необходимого количества полуперепревшего навоза КРС (при норме внесения 40–50 т/га) и фосфогипса (при норме внесения 3–5 т/га); планирование машин и технического оборудования; составление схемы почвенно-экологических исследований для отслеживания влияния отходов в составе органоминерального компоста на свойства почвы.

3. Подготовка материалов и оборудования. На данном этапе осуществлялись мероприятия по подготовке оборудования и машин к эксплуатации; транспортировка полуперепревшего навоза КРС и растительных остатков из мест их складирования (ближайшее МТФ); покупка и транспортировка фосфогипса.

4. Реализация мероприятий. Производилось приготовление органоминерального компоста; разбрасывание и заделка его по площади участка, выбранного для реализации опыта; посев семян выбранной сельскохозяйственной культуры; уход за посевами в течение периода вегетации; уборка урожая сельскохозяйственной культуры.

5. Экологическая оценка почвенного покрова – осуществлялась ежегодно (в течение 5 лет) на участке, где вносился компост; проводилась по основным агрономическим показателям почвы: агрохимические, физико-химические, агрофизические свойства почвы. А также изучалось влияние на формирование почвенных микробиологических, фаунистических сообществ, на рост и развитие растений сельскохозяйственных культур, на формирование их урожая и качество получаемой продукции. На основании полученных результатов ежегодно составлялся отчет по проделанной работе.

Результаты исследований

Научные исследования проводились в течение 5 лет в хозяйстве ОАО «Заветы Ильича» Ленинградского района Краснодарского края. Многолетние исследования показали положительное влияние органоминерального компоста на основе отходов промышленности и сельского хозяйства на почвенное плодородие сельскохозяйственных земель.

Анализ агрофизических свойств почвы показал, что применение компоста улучшает микро- и макроструктуру чернозема обыкновенного, способствует формированию водопропрочного его сложения, что увеличивает противозернистую способность почвы и ее биологическую продуктивность (см. рисунок 1).

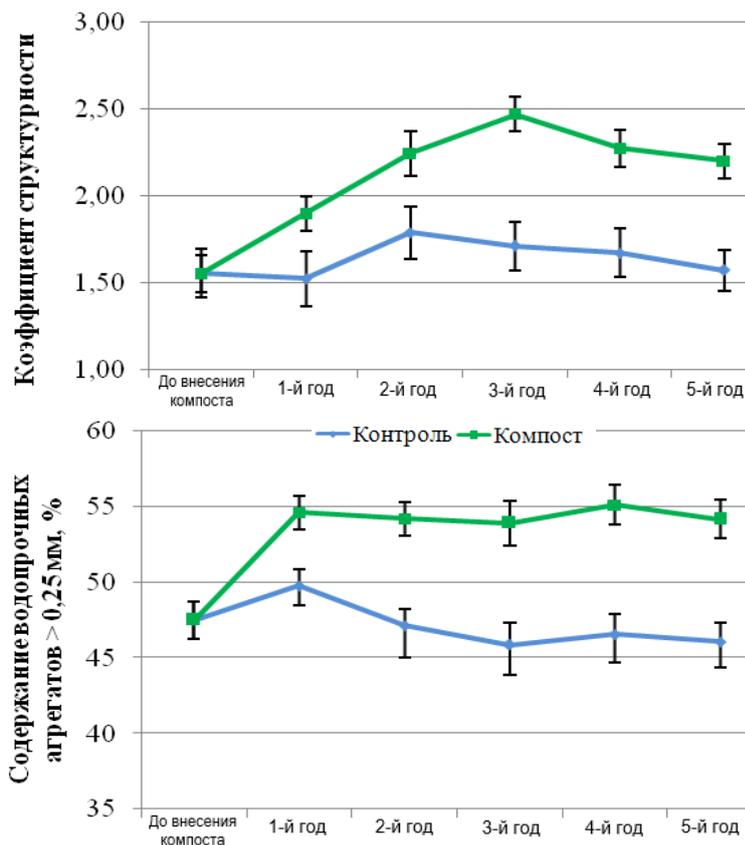


Рис. 1 – Структурно-агрегатный состав чернозема обыкновенного

Разуплотнение корнеобитаемого слоя почвы под воздействием органоминерального компоста способствует благоприятному развитию подземных структур (увеличению числа подземных узлов и придаточных корней, накоплению массы корнеплодов и др.) сельскохозяйственных растений (см. рисунок 2).

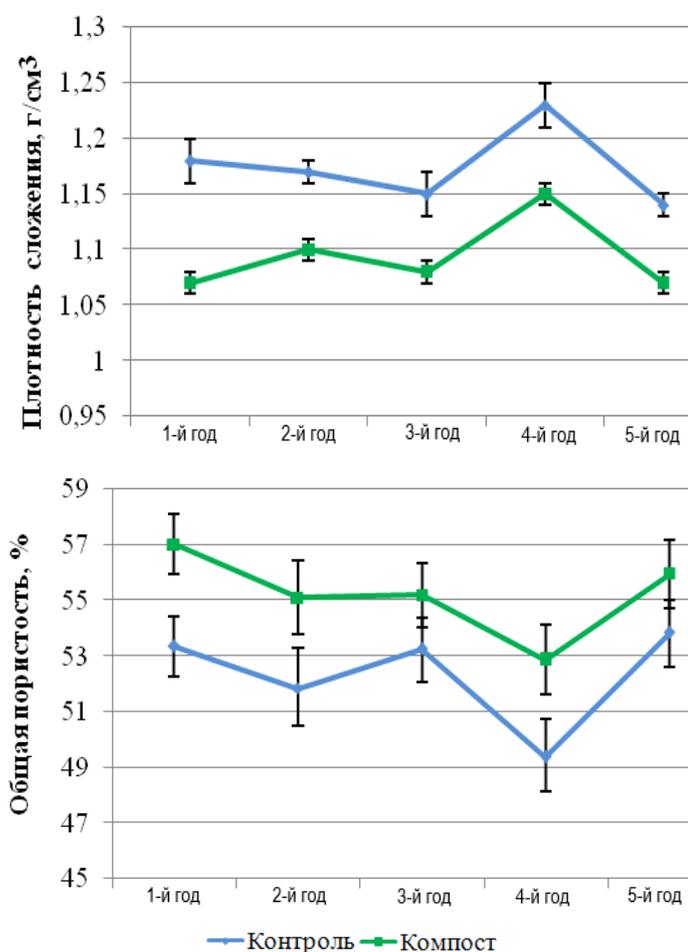


Рис. 2 – Общие физические свойства чернозема обыкновенного

Улучшение водных характеристик чернозема обыкновенного (увеличение содержания полевой влаги на 10–13 %, наименьшей и полной влагоемкости на 12 %, запасов продуктивной влаги в пахотном слое на 13 %) при внесении органоминерального компоста сопровождается накоплением и сохранением воды в почве, что положительно влияет на условия роста и развития растений.

Внесение в почву органоминерального компоста оказывает заметное положительное влияние на ее агрохимические свойства (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Агрохимические свойства чернозема обыкновенного (в среднем по годам)

Вариант	pH _{H2O}	Органическое вещество, %	N общ, %	P ₂ O ₅ , мг/кг	SO ₄ ²⁻ , %	CaO, %
Контроль	8,26 ± 0,18	3,53 ± 0,06	0,26 ± 0,01	32,64 ± 1,34	0,08 ± 0,01	0,14 ± 0,01
Компост	7,43 ± 0,17	4,10 ± 0,08	0,36 ± 0,01	45,51 ± 1,62	0,13 ± 0,01	0,29 ± 0,01

Увеличение численности микробного сообщества с внесением компоста выражается в нарастании разнообразия актиномицетов и микроскопических грибов, выполняющих важнейшую функцию редуцентов; усиление мацерации растительных остатков и накопление влаги в почве благоприятствует развитию популяций дождевых червей (*Lumbricidae*) и энхитреид (*Enchytraeidae*), являющихся незаменимыми участниками почвообразования. При внесении в почву органоминерального компоста также снижается численность мышевидных грызунов, что частично исключает применение ядохимикатов на полях севооборота при выращивании озимой пшеницы.

Улучшение агрономических свойств почвы при внесении компоста положительно сказывается на развитии сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы, кукурузы, сахарной свеклы), увеличение их урожая и качественных характеристиках (содержание белка в зерне озимой пшеницы, сахаристости корнеплодов сахарной свеклы) (см. рисунок 3).

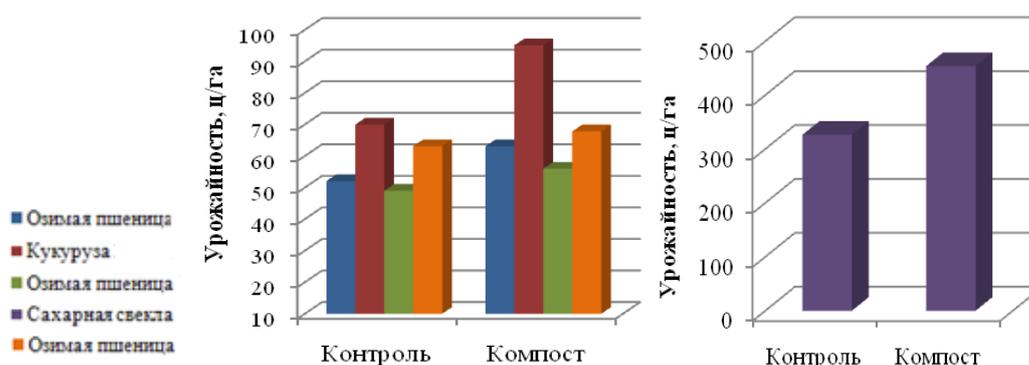


Рис. 3 – Урожайность сельскохозяйственных культур

Заключение

Таким образом, грамотное сочетание отходов сельского хозяйства и промышленности позволяет получить высокоэффективное органоминеральное удобрение, выступающее в качестве комплексного мелиоранта почвы. Получаемый компост способствует улучшению агрономических и экологических свойств почвы, повышению урожайности сельскохозяйственных культур и качества их продукции.

Кроме того, за счет частичной утилизации отходов сельскохозяйственного и промышленного производств в результате их вторичного использования для получения органоминеральных компостов повышается социальная эффективность предлагаемой технологии, которая проявляется в оздоровлении окружающей среды.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Влияние сложного компоста на верхний слой чернозема обыкновенного и развитие сельскохозяйственных культур / Д. А. Антоненко, И. С. Белюченко, О. А. Мельник и др. // Экол. Вестник Сев. Кавказа. – 2014. – Т. 10. – № 4. – С. 45-65.
2. Сложный компост и его влияние на свойства почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур : монография / Д. А. Антоненко и др. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – 181 с.
3. Белюченко И. С. Влияние внесения органоминерального компоста на плотность сложения и порозность чернозема обыкновенного / И. С. Белюченко, Д. А. Славгородская // Тр. КубГАУ. – 2011. – № 5 (32). – С. 69-71.
4. Белюченко И. С. Влияние отходов промышленного и сельскохозяйственного производства на физико-химические свойства почв / И. С. Белюченко, Е. И. Муравьев // Экол. Вестник Сев. Кавказа. – 2009. – Т. 5. – № 1. – С. 84-86.
5. Блохин Ю. Н. Фосфогипс и его физико-механические свойства. Использование фосфогипса в народном хозяйстве / Ю. Н. Блохин, М. В. Бондаренко, А. Б. Катунина // Тр. НИУИФ. – 1983. – № 234. – С. 32-38.
6. Гукалов В. Н. Перспективы использования отходов сельско-хозяйственных и промышленных производств для повышения плодородия почвы / В. Н. Гукалов // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства : сб. материалов II Всерос. науч. конф. – Краснодар, 2010. – С. 179-182.
7. Применение фосфогипса под сахарную свеклу. Состояние и пути развития производства сахарной свеклы в республике Беларусь / В. П. Курганский, И. Н. Семашко, Н. Н. Врублевская и др. – Минск, 2003. – С. 116-125.
8. Мельник О. А. Содержание органического вещества и некоторые аспекты его трансформации в почвах агроландшафта (на примере ОАО «Заветы Ильича» Ленинградского района Краснодарского края) / О. А. Мельник // Автореф. дис. канд. биол. наук. – Краснодар, 2007. – 24 с.
9. Муравьев Е. И. Свойства фосфогипса и возможность его использования в сельском хозяйстве / Е. И. Муравьев, И. С. Белюченко // Экол. Вестник Сев. Кавказа. – 2008. – Т. 4. – № 2. – С. 5-17.
10. Некольченко Л. Н. Агроэкологическая оценка продукции растениеводства при использовании промышленно-бытовых и сельскохозяйственных отходов / Л. Н. Некольченко, С. Г. Горохова, Н. В. Кривошеев // Повестка дня на XXI век : Программа действий – экологическая безопасность и устойчивое развитие : сб. материалов Междунар. научн. конф. – Ставрополь, 2002. – С. 210-213.
11. Никифорова Ю. Ю. Сложный компост и развитие почвенной биоты в агроландшафте : монография / Ю. Ю. Никифорова – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 122 с.
12. Экологические аспекты применения органических компостов из отходов на черноземных почвах / Е. П. Проценко, Н. И. Косолапова, С. Г. Сапронова и др. // Отходы, причины их образования и перспективы использования : сб. материалов Междунар. науч. экол. конф. – Краснодар : КубГАУ, 2019. – С. 599-601.
13. Сидоренко О. Д. Проблемы эффективного использования отходов сельского хозяйства / О. Д. Сидоренко // Агрохимия. – 2009. – № 2 – С. 87-92.
14. Belyuchenko I. S. Complex compost and its impact on agrochemical properties of typical chernozem in Krasnodar territory / I. S. Belyuchenko // Bothalia Journal. Pretoria, South Africa. – 2014. – Vol. 44. – № 12. – P. 14-19.
15. Belyuchenko I. S. Complex compost and soil protection from heavy metals in the agrolandscape system / I. S. Belyuchenko // Bothalia journal. – 2014. – Vol. 44. – № 12. – P. 69-79.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vliyanie slozhnogo komposta na verhnij sloj chernozema obyknovennogo i razvitie sel'skohozyajstvennykh kul'tur [The influence of complex compost on the upper layer of ordinary chernozem and the development of agricultural crops] / D. A. Antonenko, I. S. Belyuchenko, O. A. Mel'nik et al. // Ekol. Vestnik Sev. Kavkaza. – 2014. – Vol.10. – № 4. – pp. 45-65. [in Russian]
2. Antonenko D. A. Slozhnyj kompost i ego vliyanie na svoystva pochvy i produktivnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur : monografiya [Complex compost and its effect on soil properties and crop productivity : monograph] / D. A. Antonenko et al. – Krasnodar : KubGAU, 2015. – 181 p. [in Russian]
3. Belyuchenko I. S. Vliyanie vneseniya organomineral'nogo komposta na plotnost' slozheniya i poroznost' chernozema obyknovennogo [The effect of the introduction of organomineral compost on the density of addition and porosity of ordinary chernozem] / I. S. Belyuchenko, D. A. Slavgorodskaya // Tr. KubGAU. – 2011. – № 5 (32). – pp. 69-71. [in Russian]
4. Belyuchenko I. S. Vliyanie othodov promyshlennogo i sel'skoho-zyajstvennogo proizvodstva na fiziko-himicheskie svoystva pochv [The influence of industrial and agricultural production waste on the physico-chemical properties of soils] / I. S. Belyuchenko, E. I. Murav'ev // Ekol. Vestnik Sev. Kavkaza. – 2009. – Vol. 5. – № 1. – pp. 84-86. [in Russian]
5. Blohin YU. N. Fosfogips i ego fiziko-mekhanicheskie svoystva. Is-pol'zovanie fosfogipsa v narodnom hozyajstve [Phosphogypsum and its physico-mechanical properties. The use of phosphogypsum in the national economy] / YU. N. Blohin, M. V. Bondarenko, A. B. Katunina // Tr. NIUIF. – 1983. – No. 234. – pp. 32-38. [in Russian]
6. Gukalov V. N. Perspektivy ispol'zovaniya othodov sel'skohozyajstvennykh i promyshlennykh proizvodstv dlya povysheniya plodorodiya pochvy [Prospects of using agricultural and industrial production waste to increase soil fertility] / V. N. Gukalov // Problemy rekul'tivacii othodov byta, promyshlennogo i sel'skohozyajstvennogo proizvodstva : sb. materialov II Vseros. nauch. konf. – Krasnodar, 2010. – pp. 179-182. [in Russian]
7. Kurganskij V. P. Primenenie fosfogipsa pod saharnuyu sveklu. Sostoyanie i puti razvitiya proizvodstva saharnoj svekly v respublike Belarus' [Application of phosphogypsum for sugar beet. The state and ways of development of sugar beet production in the Republic of Belarus] / V. P. Kurganskij, I. N. Semashko, N. N. Vrublevskaya et al. // Minsk, 2003. – pp. 116-125. [in Russian]
8. Mel'nik O. A. Soderzhanie organicheskogo veshchestva i nekotorye aspekty ego transformacii v pochvah agrolandshafta (na primere OAO «Zavety Il'icha» Leningradskogo rajona Krasnodarskogo kraja) [The content of organic matter and some aspects of its transformation in the soils of the agricultural landscape (on the example of JSC "Testaments of Ilyich" Leningradsky district of Krasnodar Krai)] / O. A. Mel'nik // Avtoref. dis. kand. biol. nauk. – Krasnodar, 2007. – 24 p. [in Russian]
9. Murav'ev E. I. Svoystva fosfogipsa i vozmozhnost' ego ispol'zovaniya v sel'skom hozyajstve [Properties of phosphogypsum and the possibility of its use in agriculture] / E. I. Murav'ev, I. S. Belyuchenko // Ekol. Vestnik Sev. Kavkaza. – 2008. – Vol.4. – № 2. – pp. 5-17. [in Russian]
10. Nekol'chenko L. N. Agroekologicheskaya ocenka proizvodstva pri ispol'zovanii promyshlenno-bytovykh i sel'skohozyajstvennykh othodov [Agroecological assessment of crop production using industrial and household and agricultural waste] / L. N. Nekol'chenko, S. G. Gorohova, N. V. Krivosheev // Povestka dnya na XXI vek : Programma dejstvij – ekologicheskaya bezopas-nost' i ustojchivoe razvitie : sb. materialov Mezhdunar. nauchn. konf. – Stavropol', 2002. – pp. 210-213. [in Russian]
11. Nikiforenko YU. YU. Slozhnyj kompost i razvitie pochvennoj bioty v agrolandshafte : monografiya [Complex compost and the development of soil biota in the agricultural landscape : monograph] / YU. YU. Nikiforenko – Krasnodar : KubGAU, 2019. – 122 p. [in Russian]
12. Ekologicheskie aspekty primeneniya organicheskikh kompostov iz othodov na chernozemnykh pochvah [Ecological aspects of the use of organic compost from waste on chernozem soils] / E. P. Prochenko, N. I. Kosolapova, S. G. Saponova et al. // Othody, prichiny ih obrazovaniya i perspektivy ispol'zovaniya : sb. materialov Mezhdunar. nauch. ekol. konf. – Krasnodar : KubGAU, 2019. – pp. 599-601. [in Russian]
13. Sidorenko O. D. Problemy effektivnogo ispol'zovaniya othodov sel'skogo hozyajstva [Problems of efficient use of agricultural waste] / O. D. Sidorenko // Agrohimiya. – 2009. – №. 2 – pp. 87-92. [in Russian]
14. Belyuchenko I. S. Complex compost and its impact on agrochemical properties of typical chernozem in Krasnodar territory // Bothalia Journal. Pretoria, South Africa. – 2014. – Vol. 44. – № 12. – pp. 14-19.
15. Belyuchenko I. S. Complex compost and soil protection from heavy metals in the agrolandscape system // Bothalia journal. 2014. – Vol. 44. – № 12. – pp. 69-79.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.067>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛУЛЕТАЛЬНОЙ ДОЗЫ ДЛЯ НАЗЕМНОГО МОЛЛЮСКА *FRUTICICOLA FRUTICUM*

Научная статья

Черкасова Е.Е.^{1,*}, Лаврентьева Г.В.², Сынзыныс Б.И.³

¹ ORCID: 0000-0003-0333-2177;

² ORCID: 0000-0003-2962-8427;

^{1, 2, 3} Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск, Россия;

² Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

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

Аннотация

На основании экспериментальных данных лабораторного эксперимента получены расчетные значения показателя полулетальной дозы облучения наземного моллюска через 60 суток после острого γ -облучения. Для проведения лабораторного эксперимента были подобраны условия содержания животных, приближенные к естественной среде обитания. При этом смертность моллюсков в контрольной группе оставалась на нулевом уровне в течение всего эксперимента. Для расчета показателя ЛД_{50/60} применен расчетный метод пробит-анализа с применением метода наименьших квадратов, показано адекватное применение данного метода в радиобиологических исследованиях. На основании расчетного показателя установлено, что третья возрастная группа наземных моллюсков является наиболее радиорезистентной.

Ключевые слова: наземный моллюск, γ -облучение, ЛД_{50/60}, смертность, метод пробит-анализа.

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF HALF LETHAL DOSE DETERMINANT FOR TERRESTRIAL MOLLUSK *FRUTICICOLA FRUTICUM*

Research article

CHerkasova E.E.^{1,*}, Lavrent'eva G.V.², Synzynys B.I.³

¹ ORCID: 0000-0003-0333-2177;

² ORCID: 0000-0003-2962-8427;

^{1, 2, 3} Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia;

² Kaluga branch of Moscow state technical university of N.E Bauman, Kaluga, Russia

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

Abstract

Based on experimental evidence of laboratory experiment, target value of half lethal radiation dose for terrestrial mollusk 60 days after acute γ -exposure was established. The experiment was carried out in close to natural animal habitat. Mollusks mortality rate in the control group remained at zero the whole time of the experiment. To produce the LD_{50/60} indicator, probit analysis calculation method with least squares method was used, showing its adequate application in radiobiological research. In accordance with estimate indicator, it was established that the third age group of terrestrial mollusks is the most radioresistant.

Keywords: terrestrial mollusk, γ -exposure, LD_{50/60}, mortality rate, probit analysis method.

Введение

Одним из показателей, определяющих степень поражения организма, является смертность. При этом возможно определение степени необратимого поражения организма. В свою очередь оценку летального действия ионизирующего излучения на живые организмы возможно оценить по гибели организмов от дозы облучения [1]. Кроме того, Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) рекомендует показатель смертности как один из приоритетных при изучении влияния радиационного фактора на представителей биоты [2].

Для определения показателя полулетальной дозы облучения общепринято использовать рентгеновское или γ -излучение [3]. Если за определенное время наступает гибель 50% подопытных животных, в данном случае говорят о полулетальной дозе (ЛД₅₀) [4]. Для ряда животных показатель ЛД₅₀ имеют достаточно точные значения. Например, для рыб ЛД₅₀ находится в диапазоне от 5 до 20 Гр, для амфибий – от 15 до 30 Гр. Однако значение показателя ЛД₅₀ для наземных моллюсков варьирует в широком диапазоне, отличается на порядок и составляет от 20 до 200 Гр [5], а для эмбрионов моллюсков – на два порядка и изменяется в диапазоне от 10 до 1000 Гр [6].

Данная работа направлена на экспериментальное определение значения ЛД_{50/60} (полулетальной дозы через 60 суток после облучения) для наземного моллюска *F. fruticum* трех возрастных групп после острого γ -облучения. Выбор биологического объекта (наземного моллюска) обосновывается следующим. Во-первых, моллюски давно признаны биоиндикатором при загрязнении окружающей среды [7], в том числе и радиоактивным [8], [9]. Во-вторых, учитывая международные требования в области радиационной защиты биоты, водные моллюски и почвенные беспозвоночные с недавнего времени рассматриваются как референтные виды, что отражено в публикации Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР) [10]. Также необходимо отметить, что при изучении воздействия ионизирующего излучения на моллюсков основное внимание уделяется представителям водной малакофауны [11], [12], тогда как научной информации о воздействии радиационного фактора на наземных моллюсков накоплено мало. При этом нет четкого понятия даже о показателе полулетальной дозы облучения для этих представителей биоты, что восполняется данным научным исследованием.

Материалы и принципы исследования

Объектом исследований является наземный моллюск *F. fruticum* (улитка кустарниковая). Пробоотбор моллюсков осуществлялся на территории с фоновым содержанием техногенных радионуклидов [13], [14]. Всего было отобрано более 1000 особей без видимых внешних повреждений раковины. Для исследований были выбраны моллюски трех возрастных групп. Возраст моллюсков определялся по количеству оборотов раковины [15]. После пробоотбора моллюски содержались в пластиковых контейнерах с настилем из кокосового субстрата. Перед облучением моллюски находились в лаборатории для адаптации к новым условиям обитания. Облучение моллюсков осуществлялось на γ -установке ГУР – 120 в диапазоне доз от 10 до 300 Гр с шагом 10 Гр, мощность поглощённой дозы 30 Гр/ч.

Для определения $LD_{50/60}$ был выбран расчетный способ пробит-анализа с применением метода наименьших квадратов [1]. Метод пробит-анализа применяется для изучения количественных зависимостей “доза – эффект” в фармакологии и токсикологии, а последние годы находит применение и в радиобиологических исследованиях [16], [17]. Так же данный метод применяется для изучения вероятных закономерностей распределения биологических видов [18].

Для расчета $LD_{50/60}$ изначально строится линия регрессии по методу наименьших квадратов с использованием данных эксперимента. При этом используется прямолинейная зависимость, представленная не в общей форме ($y = a + bx$), а в следующей: $y' = a + blgD$, где y' – это пробит (пробит определяется по таблице, в которой каждому проценту смертности соответствует определенное число (пробит)), а lgD – десятичный логарифм от дозы, полученной испытуемыми животными.

Из таблицы, представленной в [1], следует, что:

- пробит $y'=5$ соответствует гибели 50% особей, т.е. дозе $D=LD_{50}$;
- пробит $y'=4$ соответствует гибели 16 % особей, т.е. дозе $D=LD_{16}$;
- пробит $y'=6$ соответствует гибели 84 % особей, т.е. дозе $D=LD_{84}$.

Подставив эти значения в уравнение $y' = a + blgD$, получаем (1 – 3):

$$LD_{50} = 10^{\frac{(5-a)}{b}} \quad (1)$$

$$LD_{16} = 10^{\frac{(4-a)}{b}} \quad (2)$$

$$LD_{84} = 10^{\frac{(6-a)}{b}} \quad (3)$$

Для нахождения LD_{50} , LD_{16} , LD_{84} находятся значения параметров a и b по формулам (4 – 5).

$$b = \frac{\sum k_i y'_i \lg D_i - \frac{\sum k_i \lg D_i \sum k_i y_i}{\sum k_i}}{\sum k_i (\lg D_i)^2 - \frac{(\sum k_i \lg D_i)^2}{\sum k_i}} \quad (4)$$

$$a = \frac{\sum k_i y'_i - b \sum k_i \lg D_i}{\sum k_i} \quad (5)$$

где y'_i – пробит; lgD_i – десятичный логарифм от дозы, полученной испытуемыми животными; k_i – весовой коэффициент пробитов (табличное значение).

Для первой возрастной группы:

$$b = \frac{143,85 - \frac{(28,19 \times 68,09)}{13,56}}{60,11 - \frac{28,19^2}{13,56}} = 1,53 \quad (6)$$

$$a = \frac{68,09 - 1,53 \times 28,19}{13,56} = 1,84 \quad (7)$$

Для второй возрастной группы:

$$b = \frac{164,16 - \frac{(32,06 \times 77,46)}{15,41}}{68,72 - \frac{32,06^2}{15,41}} = 1,49 \quad (8)$$

$$a = \frac{77,46 - 1,49 \times 32,06}{15,41} = 1,92 \quad (9)$$

Для третьей возрастной группы:

$$b = \frac{135,56 - \frac{(26,99 \times 62,91)}{12,81}}{58,33 - \frac{26,99^2}{12,81}} = 2,08 \quad (10)$$

$$a = \frac{62,91 - 2,08 \times 26,99}{12,81} = 1,92 \quad (11)$$

Используя формулы (1 – 3), определяем LD_{50} , LD_{16} , LD_{84} .

Стандартная ошибка определяется по формуле (12), предложенной Миллером и Тейнтером:

$$m_{LD50} = \frac{LD_{84} - LD_{16}}{\sqrt{2N'}} \quad (12)$$

где, LD_{84} и LD_{16} – дозы, вызывающее гибель 84% и 16 % животных; N' – общее исходное количество животных в тех группах, для которых значение пробитов находится в пределах от 3,5 до 6,5.

Затем для LD_{50} вычисляют значения верхней и нижней границы 95%-доверительного интервала по формулам:

$$LD_{50} = LD_{50} - t_{0,05} \times m_{LD50} \quad (13)$$

$$LD_{50} = LD_{50} + t_{0,05} \times m_{LD50} \quad (14)$$

где $t_{0,05}$ – табличное значение t-распределения Стьюдента для уровня значимости $p=0,05$; m_{LD50} – стандартная ошибка полулетальной дозы.

Основные результаты

На основании полученных экспериментальных данных относительно показателя смертности трех возрастных групп наземного моллюска после острого γ -облучения был применен расчетный способ пробит-анализа с применением метода наименьших квадратов для определения показателя $LD_{50/60}$. При этом показатель $LD_{50/60}$ составляет $118,7 \pm 62,2$ Гр, $115,6 \pm 33,9$ Гр и $141,4 \pm 26,3$ Гр для первой, второй и третьей возрастной группы наземного моллюска, соответственно (см. рисунок 1). Следует отметить, что смертность моллюсков в контрольной группе оставалась на нулевом уровне в течение всего эксперимента, что указывает на радиационно-индуцированный эффект в облученных группах животных.

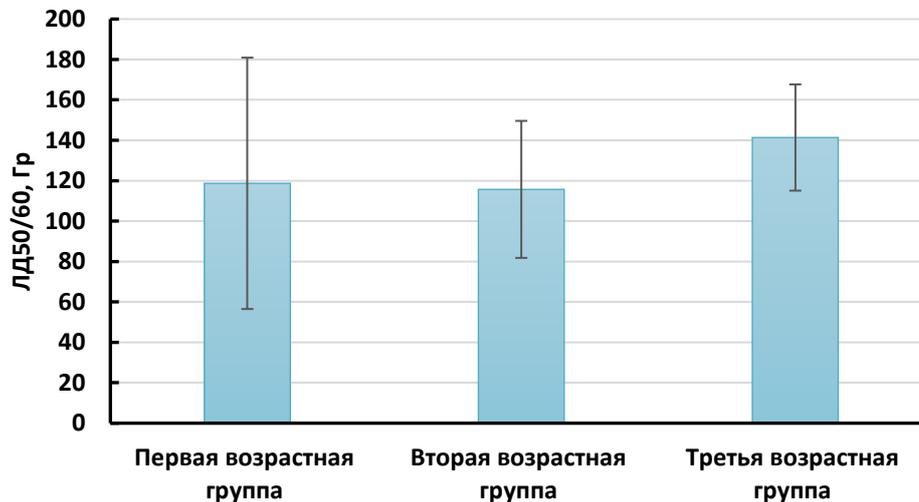


Рис. 1 – $LD_{50/60}$ для трех возрастных групп наземного моллюска

Таким образом, устойчивость наземных моллюсков к воздействию γ -облучения увеличивается с увеличением возраста животного. При этом смертность в третьей возрастной группе животных ниже, чем во второй и первой возрастных группах на фоне практически идентичной смертности в первых двух возрастных группах. Подобные закономерности влияния ионизирующего излучения на разные возрастные стадии развития водных моллюсков отмечается, например, в исследованиях Гудкова Д.И. с соавторами [5], [19]. Исследователями установлено, что 30 Гр является полулетальной дозой для эмбрионов прудовиков на стадии трахофоры, а поглощенная доза 60 Гр вызвала полную гибель эмбрионов в течение 20 сут., при этом полулетальная доза облучения для взрослых особей моллюсков составила 120 Гр.

Следует отметить, что представители водной малакофауны относятся к радиорезистентным организмам, т.к. показатель ЛД₅₀ по разным источникам варьирует от 20 до 200 Гр [5] и даже до 500 Гр [20]. При этом в исследовании [3] зарегистрированы случаи радиорезистентности в популяциях *L. Stagnalis*, после облучения дозой 500 Гр особи моллюсков выжили и дали яйцеклеточные массы, из которых впоследствии появились вполне жизнеспособные новорожденные [3].

Полученные в данной работе экспериментальные данные подтверждают высокую радиорезистентность и представителей наземной малакофауны с учетом показателя смертности. При этом устойчивость к воздействию радиационного фактора изменяется в зависимости от возраста особей. Подобные закономерности наблюдались ранее при изучении влияния ионизирующего излучения на почвенную беспозвоночную биоту в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа, что отмечается в работе Алексахина Р.М. [21]. В исследовании указано, что ювенильные фазы в онтогенезе беспозвоночных достаточно радиочувствительны несмотря на высокую радиорезистентность почвенной биоты.

Заключение

Впервые получены значения ЛД_{50/60} для наземных моллюсков трех возрастных групп в рамках лабораторного эксперимента. При этом установлено, что третья возрастная группа является наиболее радиорезистентной возрастной группой наземного моллюска *F. fruticum*. Также в рамках данного исследования представлено адекватное применение расчетного способа пробит-анализа с применением метода наименьших квадратов для радиобиологических исследований.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Платонов А.Г. Применение метода пробит-анализа в радиобиологии. Расчет полудетальной дозы ЛД₅₀: Учебно-методическое пособие / А. Г. Платонов, М. Я. Ахалая. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 36 с.
2. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants // Ann. ICRP. – 2009. – V. 38. – № 4-6. – pp. 1-242.
3. Михеев А. Н. Малые «дозы» радиобиологии. Моя маленькая радиобиологическая вера / А. Н. Михеев – К.: Фитосоцицентр, 2016. – 371 с.
4. Оськина Н. А. Влияние гамма-излучения и тяжелых металлов на покоящиеся яйца пресноводного рачка *Moina macroscora* : дис. ... канд. биол. наук 03.02.10 : защищена 13.04.2021 / Оськина Наталия Александровна. Красноярск, 2020. – 121 с.
5. Гудков И. Н. Радиобиология с основами радиоэкологии : учебное пособие / И. Н. Гудков, А. Г. Кудяшева, А. А. Москалёв. – Сыктывкар : Изд-во СыктГУ, 2015. – 512 с.
6. Мурзин Н. В. Оценка воздействия радиоактивных веществ на экосистемы как целое / Н. В. Мурзин, В. Н. Лыцов // Проблемы анализа риска. – 2004. – Т. 1. – № 2. – С. 146-153.
7. Петухова Г. А. Моллюски как чувствительные тест-индикаторы состояния перифитона при действии антропогенного пресса загрязнителей / Г. А. Петухова // Вестник Тюменского государственного университета. – 2005. – № 5. – С. 97-100.
8. Цветнова О. Б. К вопросу о методах биодиагностики в условиях радиоактивного загрязнения / О. Б. Цветнова, А. И. Щеглов, В. В. Столбова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2014. – Т. 54. – № 4. – С. 423-431. DOI: 10.7868/S0869803114030163.
9. Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов / Г. В. Лаврентьева, О. А. Мирзабаев, Б. И. Сынзыныс и др. // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2018. – Т. 27. – № 4. – С. 65-75. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-65-75.
10. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation // Report to the General Assembly with Scientific Annexes. – Volume II, Scientific Annex E. – Effect of ionizing radiation on non-human biota. – New York United Nations, 2011. – 95 p.
11. Гусева В. П. Исследование фито- и зоопланктонных организмов как биоиндикаторов радиоактивного загрязнения воды в районе размещения предприятий ЯТЦ / В. П. Гусева, М. Я. Чеботина, А. В. Трапезников // Вопросы радиационной безопасности. – 2006. – № 4(44). – С. 70-75.
12. Голубев А. П. Динамика процессов радиоадаптации в популяциях моллюсков из водоемов белорусского сектора зоны загрязнения ЧАЭС / А. П. Голубев // Экологический вестник. – 2012. – № 2. – С. 44-57.
13. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием - 137, стронцием - 90 и плутонием - 239+240 / Под редакцией С. М. Вакуловского, подготовил В. Н. Яхрюшин. Обнинск, ФГБУ "НПО "Тайфун", 2021. – 223 с.
14. Орлов П. М. Периоды полувыведения и миграционная способность ¹³⁷Cs из почв, загрязненных черномыльскими выпадениями на территории Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей / П. М. Орлов, Н. И. Аканова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2021. – № 5(383). – С. 101-105. DOI: 10.24412/2587-6740-2021-5-101-105.
15. Гребенников М. Е. Содержание тяжелых металлов в наземных моллюсках в районе Среднеуральского медеплавильного завода / М. Е. Гребенников, И. М. Хохуткин // Материалы научно-практической конференции «Экологические основы стабильного развития Прикамья», г.Пермь. – 2000. – 92 с.

16. Белов А. А. Регрессионное моделирование динамики радиального прироста сосны обыкновенной в загрязненных радионуклидами насаждениях брянской области / А. А. Белов // Лесоведение. – 2017. – № 1. – С. 17-23.
17. Studies of Ecotoxicity of Herbicides to Influence the Soil Fauna / S. Khyzhnyak, O. Sterlikova, S. Poloschuk, et al. // *Agrobiodiversity for Improving Nutrition, Health and Life Quality*. – 2017. – № 1. – pp. 221-225.
18. Звягинцева А. В. Модели существования и распространения видов животных для количественной оценки биологического разнообразия / А. В. Звягинцева // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2013. – № 1-2(4-5). – С. 81-94.
19. Эффекты хронического и острого радиационного воздействия у пресноводного моллюска *Lymnaea stagnalis* L. [Электронный ресурс] / Д. И. Гудков, Е. В. Дзюбенко, Т. В. Пинкина и др. // Международная научно-практическая конференция «Радиоэкология XXI века», сборник материалов – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т. – 2011. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/conf/radioecology-XXI>. (дата доступа: 12.05.2022)
20. Радиобиология : курс лекций. В 4 ч. Ч. 3. Радиобиология животных и человека / Н. В. Лазаревич, И. И. Сергеева, С. С. Лазаревич. – Горки : БГСХА, 2012. – 103 с.
21. Алексахин Р. М. Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации / Р. М. Алексахин // Почвоведение. – 2009. – № 12. – С. 1487-1498.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Platonov A. G. Primenenie metoda probit-analiza v radiobiologii. Raschet poluletal'noj dozy LD₅₀: Uchebno-metodicheskoe posobie [Application of the probit analysis method in radiobiology. Calculation of the half-year dose of LD₅₀: Educational and methodical manual] / A. G. Platonov, M. Ja. Ahalaja. – М.: NIJaU MIFI, 2010. – 36 p. [in Russian]
2. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants // *Ann. ICRP*. – 2009. – V. 38. – № 4-6. – pp. 1-242.
3. Miheev A. N. Malye «dozy» radiobiologii. Moja malen'kaja radiobiologicheskaja vera [Small "doses" of radiobiology. My little radiobiological faith] / A. N. Miheev – К.: Fitosociocentr, 2016. – 371 p. [in Russian]
4. Os'kina N. A. Vlijanie gamma-izlucheniya i tjazhelyh metallov na pokojashhiesja jajca presnovodnogo rachka *Moina macrocopa* [Effect of gamma radiation and heavy metals on resting eggs of freshwater crustacean *Moina macrocopa*]: dis. ... of PhD in Biology 03.02.10 : defense of the thesis 13.04.2021 / Os'kina Natalija Aleksandrovna. Krasnojarsk, 2020. – 121 p. [in Russian]
5. Gudkov I. N. Radiobiologija s osnovami radiojekologii : uchebnoe posobie [Radiobiology with the basics of radioecology : a textbook] / I.N. Gudkov, A.G. Kudjasheva, A.A. Moskaljov. – Syktyvkar : Publishing house SyktGU, 2015. – 512 p. [in Russian]
6. Murzin N. V. Ocenka vozdejstvija radioaktivnyh veshhestv na jekosistemy kak celoe [Assessment of the Radioactive Impact on Ecosystems as a Whole] / N. V. Murzin, V. N. Lyscov // *Problemy analiza riska [Issues of Risk Analysis]*. – 2004. – Vol. 1. – No. 2. – pp. 146-153. [in Russian]
7. Petuhova G. A. Molljuskij kak chuvstvitel'nye test-indikatory sostojanija perifitona pri dejstvii antropogennogo pressa zagrjaznителей [Mollusks as sensitive test indicators of the state of the periphyton under the action of anthropogenic pollutants] / G. A. Petuhova // *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Tyumen State University Herald]*. – 2005. – № 5. – pp. 97-100. [in Russian]
8. Cvetnova O. B. K voprosu o metodah biodiagnostiki v uslovijah radioaktivnogo zagrjaznenija [On the Problem of Biodiagnosis under Conditions of Radioactive Contamination] / O. B. Cvetnova, A. I. Shheglov, V. V. Stolbova // *Radiacionnaja biologija. Radiojekologija [Radiation biology. Radioecology]*. – 2014. – Vol. 54. – № 4. – pp. 423-431. DOI: 10.7868/S0869803114030163. [in Russian]
9. Radiacionnyj jekologicheskij risk dlja nazemnoj jekosistemy v zone vlijanija hranilishha radioaktivnyh othodov [Radiation ecological risk for the terrestrial ecosystem in the zone close to the radioactive waste storage facility] / G. V. Lavrentyeva, O. A. Mirzebasov, B. I. Synzynys et al. // *Radiacija i risk (Bjulleten' Nacional'nogo radiacionno-jepidemiologicheskogo registra) [Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Register)]*. – 2018. – Vol. 27. – № 4. – pp. 65-75. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-65-75. [in Russian]
10. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation // Report to the General Assembly with Scientific Annexes. – Volume II, Scientific Annex E. – Effect of ionizing radiation on non-human biota. – New York United Nations, 2011. – 95 p.
11. Guseva V. P. Issledovanie fito- i zooplanktonnyh organizmov kak bioindikatorov radioaktivnogo zagrjaznenija vody v rajone razmeshhenija predpriyatij JaTC [Study of phyto- and zooplankton organisms as bioindicators of water radioactive contamination in the region of nuclear fuel cycle enterprises location] / V. P. Guseva, M. Ja. Chebotina, A. V. Trapeznikov // *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti [Radiation safety issues]*. – 2006. – № 4(44). – pp. 70-75. [in Russian]
12. Golubev A. P. Dinamika processov radioadaptacii v populacijah molljuskov iz vodoemov belorusskogo sektora zony zagrjaznenija ChAJeS [The dynamics of radioadaptation processes in mollusk populations in water bodies within the belarusian sector of chernobyl nuclear contamination zone] / A. P. Golubev // *Jekologicheskij vestnik [Ecological Bulletin]*. – 2012. – № 2. – pp. 44-57. [in Russian]
13. Dannye po radioaktivnomu zagrjazneniju territorii nasel'jonnyh punktov Rossijskoj Federacii ceziem - 137, stronciem - 90 i plutoniem - 239+240 [Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation with cesium - 137, strontium - 90 and plutonium - 239+240] / edited by S.M. Vakulovskogo, prepared V.N. Jahrushin. Obninsk, FGBU "NPO "Tajfun", 2021. – 223 p. [in Russian]
14. Orlov P. M. Periody poluvyvedeniya i migracionnaja sposobnost' 137Cs iz pochv, zagrjaznennyh chernobyl'skimi vypadenijami na territorii Brjanskoj, Kaluzhskoj, Tul'skoj i Orlovskoj oblastej [Half-life and migration capacity of 137Cs from soils contaminated with chernobyl fallout in the bryansk, kaluga, tula and oryol regions] / P. M. Orlov, N. I. Akanova //

Mezhdunarodnyj sel'skohozjajstvennyj zhurnal [International agricultural journal]. – 2021. – № 5(383). – pp. 101-105. DOI: 10.24412/2587-6740-2021-5-101-105. [in Russian]

15. Grebennikov M. E. Soderzhanie tjazhelyh metallov v nazemnyh molljuskah v rajone Sredneural'skogo medeplavil'nogo zavoda [The content of heavy metals in terrestrial molluscs in the area of Sredneural'sky copper smelter] / M. E. Grebennikov, I. M. Hohutkin // Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii «Jekologicheskie osnovy stabil'nogo razvitija Prikam'ja», g.Perm' [Materials of the scientific and practical conference "Ecological foundations of stable development of the Kama region", Perm]. – 2000. – 92 p. [in Russian]

16. Belov A. A. Regressionnoe modelirovanie dinamiki radial'nogo prirosta sosny obyknovennoj v zagrjaznennyh radionuklidami nasazhdenijah brjanskoj oblasti [Regression modeling of the radial increment dynamics in scots pine in forests contaminated with radionuclides in bryansk oblast] / A. A. Belov // Lesovedenie [Forest science]. – 2017. – № 1. – pp. 17-23. [in Russian]

17. Studies of Ecotoxicity of Herbicides to Influence the Soil Fauna / S. Khyzhnyak, O. Sterlikova, S. Poloschyk et al. // Agrobiodiversity for Improving Nutrition, Health and Life Quality. – 2017. – №. 1. – P.221-225.

18. Zvjaginceva A. V. Modeli sushhestvovaniya i rasprostraneniya vidov zhitvnyh dlja kolichestvennoj ocenki biologicheskogo raznoobrazija [Models of the existence and distribution of animal species for the biological diversity quantifying] / A. V. Zvjaginceva // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve [System analysis and information technologies in the sciences of nature and society]. – 2013. – № 1-2(4-5). – pp. 81-94. [in Russian]

19. Gudkov D. I. Jeffekty hronicheskogo i ostrogo radiacionnogo vozdeystvija u presnovodnogo molljuska Lymnaea stagnalis L. [Effects of chronic and acute radiation exposure in freshwater mollusk Lymnaea stagnalis L.] [Electronic resource] / D.I. Gudkov, E.V. Dzjubenko, T.V. Pinkina et al. // Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Radiojekologija XXI veka», sbornik materialov – Krasnojarsk: Sibirskij federal'nyj un-t [International scientific and practical conference "Radioecology of the XXI century", collection of materials - Krasnoyarsk: Siberian Federal University]. – 2011. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/conf/radioecology-XXI>. (accessed: 12.05.2022). [in Russian]

20. Radiobiologija : kurs lekcij. V 4 ch. Ch. 3. Radiobiologija zhitvnyh i cheloveka [Radiobiology: a course of lectures. In 4 h the P. 3. Radiobiology of animals and humans] / N. V. Lazarevich, I. I. Sergeeva, S. S. Lazarevich. – Gorki: BGSFA, 2012. – 103 p. [in Russian]

21. Aleksahin R. M. Radioaktivnoe zagrjaznenie pochv kak tip ih degradacii [Radioactive contamination as a type of soil degradation] / R. M. Aleksahin // Pochvovedenie [Soil science]. – 2009. – № 12. – pp. 1487-1498. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.068>

МОРФОЛОГИЯ ПЕЧЕНИ У СВИНЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛИВИТАМИННОГО ПРЕПАРАТА

Научная статья

Шубина Т.П.^{1,*}, Чопорова Н.В.²

¹ ORCID: 0000-0002-8556-7713;

^{1,2} Донской государственный аграрный университет, Персиановский, Россия

* Корреспондирующий автор (schubina.ta[at]yandex.ru)

Аннотация

Одним из главных органов, участвующих в обмене веществ, является печень. Применение витаминов и поливитаминных комплексов в свиноводстве обосновано тем, что их использование повышает устойчивость организма к негативным воздействиям внешней и внутренней среды. Данных о морфогенезе печени свиней в сравнительном аспекте в связи с породой и влиянием кормовых и биологически активных добавок недостаточно. В статье приведены результаты исследований структуры печени свиней разных пород с применением комплексного поливитаминного препарата «Волстар». Установлено его положительное влияние на морфометрические показатели печени свиней КБ и ДМ-1. В большей степени это влияние проявлялось в опытной группе свиней ДМ-1 типа.

Ключевые слова: свиньи, печень, морфометрические показатели, поливитаминный препарат.

LIVER MORPHOLOGY OF PIGS WITH MULTIVITAMIN SUPPLEMENT

Research article

SHubina T.P.^{1,*}, CHoporova N.V.²

¹ ORCID: 0000-0002-8556-7713;

^{1,2} Don State Agrarian University, Persianovskij, Russia

* Correspondent author (schubina.ta[at]yandex.ru)

Abstract

One of the main organs involved in metabolism is liver. The use of vitamins and polyvitamin complexes in pig breeding increases the resistance of the body to negative effects of the external and internal environment. The data on pigs liver morphogenesis in connection with the breed and the influence of fodder and biologically active additives is insufficient. The article presents the results of liver structure research of pigs of different breeds with the use of complex multivitamin supplement «Volstar». Its positive effect on morphometric liver rates of LW and DM-1 pigs has been established. This effect was more evident in the experimental group of DM-1 pigs.

Keywords: pigs, liver, morphometric rates, multivitamin supplement.

Введение

Для увеличения производства мяса свинины необходимо развивать свиноводческую отрасль. При этом нужно учитывать научно обоснованные рекомендации по кормлению и содержанию животных, осуществлять контроль за обеспеченностью организма свиней витаминами. Применение витаминов и поливитаминных комплексов в животноводстве, в частности в свиноводстве, обосновано тем, что их использование повышает устойчивость организма к негативным воздействиям внешней и внутренней среды, мобилизует его ресурсы для обеспечения жизнедеятельности и поддержания здоровья [1], [2], [3], [4].

Необходимо также обращать внимание на морфофункциональные и породные особенности органов и систем организма. Одним из главных органов, участвующих в обмене веществ, является печень [5], [6]. Изучением особенностей строения этого органа у домашних животных занимались многие исследователи [7], [8], [9], [10]. Однако, данных о морфогенезе печени свиней в сравнительном аспекте в связи с породой и влиянием кормовых и биологически активных добавок недостаточно.

Методы исследования

Был проведен эксперимент с применением в рационах подопытных свиней поливитаминного препарата «Волстар», включающего основные витамины (А, Д, Е, С) в физиологически обоснованном соотношении. Животные получали рационы, состоящие из зерновых кормов (ячмень, пшеница, овес, травяная и мясокостная мука). Препарат применяли свиньям с профилактической целью ежемесячно в течение трех дней в дозе 1 мл/кг массы тела с водой. Материалом для исследования служили шестимесячные свиньи крупной белой породы (КБ) и донского мясного типа (ДМ-1) из частных фермерских хозяйств Ростовской области. Определяли абсолютную массу печени, относительную массу печени к массе тела и массе желудочно-кишечного тракта (жкт), площадь печеночных долек, толщину капсулы и междольковой соединительной ткани. Использовали микроморфометрические методики. Для изготовления гистологических препаратов отобраный материал фиксировали в нейтральном формалине, заливали в парафин, делали срезы и проводили их окраску гематоксилин - эозином. Проводили статистическую обработку данных.

Основные результаты. Изучали морфометрические показатели печени свиней КБ и ДМ-1, сравнивали эти показатели между породами и анализировали действие поливитаминного препарата «Волстар» на печень свиней каждой из двух пород.

Результаты исследований приведены в таблице.

Таблица 1 – Морфометрические показатели печени свиней ($\bar{x} \pm m$), $n=5$

Показатели	КБ		ДМ-1	
	контроль	опыт	контроль	опыт
Масса печени (г)	1790 \pm 0,80	1821 \pm 0,09	1850 \pm 0,07	1863 \pm 0,50
Относительная масса печени к массе тела, %	2,0 \pm 0,04	1,8 \pm 0,04	1,9 \pm 0,03	1,8 \pm 0,42
Относительная масса печени к массе жкт, %	52,9 \pm 0,90	51,8 \pm 0,73	53,4 \pm 0,26	52,2 \pm 0,80
Площадь печёночных долек, мкм ²	651,7 \pm 0,04	670,0 \pm 0,45	659,1 \pm 0,39	663,1 \pm 0,43
Толщина капсулы, мкм	3,2 \pm 0,02	3,0 \pm 0,03	3,5 \pm 0,07	3,3 \pm 0,09
Толщина междольковой соединительной ткани, мкм	40,2 \pm 0,50	35,6 \pm 0,06	47,0 \pm 0,92	45,6 \pm 0,90

При изучении морфометрических показателей печени свиней контрольных групп КБ и ДМ-1 было установлено следующее. Масса печени свиней в группе у ДМ-1 была больше в 1,0 раза, чем в группы КБ. Относительная масса печени к массе тела была выше у свиней КБ, чем у ДМ-1 на 0,1%. Относительная масса печени к массе жкт, была, наоборот, больше у ДМ-1 на 0,5%. Площадь печеночных долек у свиней ДМ-1 была больше, чем у свиней КБ в 1,0 раз. Толщина капсулы печени у свиней ДМ-1 была больше, чем у КБ в 1,1 раза. Толщина междольковой соединительной ткани у контрольных свиней ДМ-1 была больше, чем у контрольных свиней КБ в 1,2 раза.

Все изучаемые морфометрические показатели печени у животных контрольных групп, кроме относительной массы органа к массе тела, были больше у ДМ-1, чем у КБ.

Было изучено действие препарата «Волстар» на печень свиней КБ и ДМ-1. У свиней КБ морфометрические показатели печени в опытной и контрольной группах выглядели следующим образом. Абсолютная масса печени в опытной группе у животных, получавших препарат, была больше, чем в контрольной группе в 1,0 раз. Относительная масса печени к массе тела в опытной группе была меньше на 0,2%, чем в контроле. Относительная масса печени к массе жкт, была, наоборот, больше у животных контрольной группы – на 1,1%. Площадь печеночных долек в опытной группе свиней КБ была больше в 1,0 раз, чем в контроле. Толщина капсулы и толщина междольковой соединительной ткани в печени у свиней КБ, не получавших препарат, были больше в 1,1 раза.

У свиней ДМ-1 абсолютная масса печени была больше в опыте, чем в контроле в 1,0 раза. Относительная масса печени к массе тела у животных, получавших препарат, была меньше на 0,1%, чем в контрольной группе. Относительная масса печени к массе жкт у опытных животных была меньше на 1,2%, чем у контрольных. Площадь печеночных долек у опытных свиней была больше в 1,0 раза, чем у контрольных. Толщина капсулы и толщина междольковой соединительной ткани в печени опытных животных была меньше, чем у контрольных животных в 1,1 и 1,0 соответственно.

У животных КБ и ДМ-1, получавших препарат, абсолютная масса печени, относительная масса печени к массе тела, площадь печеночных долек были больше, чем у животных контрольных групп. А такие показатели, как относительная масса печени к массе жкт, толщина капсулы и толщина междольковой соединительной ткани была больше у животных КБ и ДМ-1, не получавших препарат.

При сравнении действия препарата «Волстар» на печень свиней КБ и ДМ-1 были получены следующие результаты. Масса печени в опытной группе ДМ-1 была больше в сравнении с КБ в 1,0 раза. Относительная масса печени к массе тела была одинаковой у свиней обеих пород и составила 1,8%. Относительная масса печени к массе жкт была больше у ДМ-1 на 0,4%. Площадь печеночных долек, наоборот, была больше у КБ – в 1,0 раза. Толщина капсулы и толщина междольковой соединительной ткани была больше у ДМ-1 в 1,1 и 1,3 раза соответственно.

Большинство изучаемых морфометрических показателей печени у свиней ДМ-1 опытной группы были выше, чем у свиней КБ опытной группы. Такой показатель, как относительная масса печени к массе тела, был одинаковым у свиней обеих пород, получавших препарат. Площадь печеночных долек была больше у свиней опытной группы КБ в сравнении с опытной группой ДМ-1.

Заключение

У животных контрольных групп КБ и ДМ-1 все изучаемые показатели печени, кроме относительной массы органа к массе тела, были больше у свиней ДМ-1. Действие препарата «Волстар» у исследуемых животных на морфометрические показатели печени было неодинаково. Абсолютная масса печени, относительная масса печени к массе тела, площадь печеночных долек были больше в опытных группах, получавших препарат. А такие показатели, как относительная масса печени к массе жкт, толщина капсулы и толщина междольковой соединительной ткани были больше у животных контрольных групп. Среди опытных групп свиней КБ и ДМ-1 большинство морфометрических показателей печени, за исключением площади печеночных долек, были выше у свиней ДМ-1. Выявлено положительное влияние поливитаминного препарата «Волстар» на печень свиней КБ и ДМ-1. В большей степени это влияние проявлялось в опытной группе свиней ДМ-1 типа.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Бажов Г.М. Практическое свиноводство / Г.М. Бажов, Л.А. Бакирева. – Краснодар, 2002. – 155 с.
2. Бетин А.Н. Биологически активные добавки в кормлении подсосных свиноматок и поросят / А.Н. Бетин, О.Б. Филиппова // Свиноводство. – 2022. – №1. – с.15-17.
3. Комаров А. Использование лекарственных форм витаминов / А. Комаров, Д. Жемеречкин, С. Семенов // Комбикорма. 2000. – № 3. – С. 53 -54.
4. Тяпкина Е.В. Влияние биологически активных соединений на метаболические функции печени/ Е.В. Тяпкина, О.А. Фомин // Молодой ученый. – 2015. – №7 (87). – с. 1048-1051.
5. Андреева С.Д. Анатомо-физиологическая характеристика и методы исследования печени у животных: Учебно-методическое пособие / С.Д. Андреева, А.Н. Шестакова, А.Ф. Сапожников. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – 112 с.
6. Гуральская С. В. Гистоморфология и морфометрические параметры печени домашних животных / С. В. Гуральская, Л. П. Горальский // Ученые Записки УО ВГАВМ. – 2014. – №.2, ч.1. – С. 144-148.
7. Анисимова, К. А. Сравнительная топография печени свиней мясных пород на ранних этапах постнатального онтогенеза / К.А. Анисимова // Иппология и ветеринария 2018. – № 4 (30). – С. 33-38.
8. Исакова, М. Б. Морфологические особенности строения печени новорожденных норчат различных окрасочных генотипов / М. Б. Исакова, О. В. Распутина // Молодой ученый. – 2016. – № 6.5 (110.5). – С. 70-73.
9. Прусакова, А. В. Гистологическая организация печени козы англонубийской породы / А. В. Прусакова, Н. В. Зеленецкий // Иппология и ветеринария. – 2020. – № 3 (37). – С. 158-161.
10. Сидорова К.А. Морфологическое состояние печени кроликов калифорнийской породы. / К.А. Сидорова, Н.А. Череменина, Е.Н. Кузьмина // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 9 – С. 37-40.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bzhov G.M. Prakticheskoye svinovodstvo [Practical pig breeding]. / G.M. Bzhov, L.A. Bakireva. – Krasnodar, 2002. – 155 p. [in Russian]
2. Betin A.N. Biologicheski aktivnyye dobavki v kormlenii podsosnykh svinomatok i porosyat [Biologically active additives in feeding suckling sows and piglets] / A.N. Betin, O.B. Filippova // Pig breeding. – 2022. – No.1. – pp.15-17. [in Russian]
3. Komarov A. Ispolzovaniye lekarstvennykh form vitaminov [The use of medicinal forms of vitamins] / A. Komarov, D. Zhemerechkin, S. Semenov // Compound feed. – 2000. – No. 3. – pp. 53-54. [in Russian]
4. Tyapkina E.V. Vliyaniye biologicheski aktivnykh soyedineniy na metabolicheskiye funktsii pecheni [Influence of biologically active compounds on the metabolic functions of the liver] / E.V. Tyapkina, O.A. Fomin // Young scientist. – 2015. – №7 (87). – pp. 1048-1051. [in Russian]
5. Andreeva S.D. Anatomo-fiziologicheskaya kharakteristika i metody issledovaniya pecheni u zhyvotnykh: Uchebno-metodicheskoye posobiye [Anatomical and physiological characteristics and methods of liver research in animals: An educational and methodical manual] / S.D. Andreeva, A.N. Shestakova, A.F. Sapozhnikov. – Kirov: Vyatka State Agricultural Academy, 2012. – 112 p. [in Russian]
6. Guralskaya S. V. Gistomorfologiya i morfometricheskiye parametry pecheni domashnykh zhyvotnykh [Histomorphology and morphometric parameters of the liver of domestic animals] / S. V. Guralskaya, L. P. Goralsky // Uchenyye Zapiski UO VGAVM [Scientific Notes of the UO VGAVM]. – 2014. – No. 2, part 1. – pp. 144-148. [in Russian]
7. Anisimova, K. A. Sravnitel'naya topografiya pecheni sviney myasnykh porod na rannikh etapakh postnatalnogo ontogeneza [Comparative topography of the liver of meat breed pigs at the early stages of postnatal ontogenesis] / K.A. Anisimova // Ippologiya i veterinariya [Hippology and Veterinary Medicine]. – 2018. – No. 4 (30). – pp. 33-38. [in Russian]
8. Isakova, M. B. Morfofunktsionalnyye osobennosti stroeniya pecheni novorozhdennykh norchat razlichnykh okrasochnykh genotipov [Morphofunctional features of the liver structure of newborn mink of various color genotypes] / M. B. Isakova, O. V. Rasputina // Molodoy uchenyy [Young scientist]. – 2016. – № 6.5 (110.5). – Pp. 70-73. [in Russian]
9. Prusakova A.V. Gistologicheskaya organizatsiya pechenikozy anglonubiyskoy porody [Histological organization of the liver of an Anglonubian goat breed] / A.V. Prusakova, N. V. Zelenevsky // Ippologiya i veterinariya [Hippology and veterinary medicine]. – 2020. – № 3 (37). – Pp. 158-161. [in Russian]
10. Sidorova K.A. Morfofunktsionalnoye sostoyaniye pecheni krolikov kaliforniyskoy porody [Morphofunctional state of the liver of rabbits of the California breed. The successes of modern natural science] / K.A. Sidorova, N.A. Cheremenina, E.N. Kuzmina // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [The successes of modern natural science]. – 2012. – No. 9 – pp. 37-40. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.069>

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХВОЙНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ НА РОСТОВЕСОВЫЕ И ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛОТОЯДНЫХ

Научная статья

Калязина Н.Ю.¹, Кирдяев В.М.², Родина Э.В.^{3,*}, Родин В.Н.⁴, Явкин Д.Е.⁵

³ ORCID: 0000-0002-5055-2431;

^{1, 3, 4, 5} Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва, Саранск, Россия;

² Нижегородский региональный институт управления и экономики агропромышленного комплекса, Нижний Новгород, Россия

* Корреспондирующий автор (kizim2008[at]yandex.ru)

Аннотация

При производстве лекарственных препаратов и кормовых добавок биомасса леса является ценнейшим сырьем для получения многих биологически активных веществ. Целью данной работы являлось изучение влияния продуктов глубокой переработки биомассы леса в виде хвойной энергетической добавки (ХЭД) на ростовесовые и гематологические показатели домашних непродуктивных животных (собак). В ходе эксперимента установлено, что применение оригинальной хвойной энергетической добавки собакам ежедневно внутрь в течение 30-ти дней положительно влияет на их здоровье, приводит к значительно выраженной стимуляции набора массы тела. Оптимальной дозой ХЭД является 0,5 мл/кг массы тела, а так же установлено, что при применении ХЭД внутрь, препарат приводил к стимуляции уровня гемоглобина и эритроцитов в крови, т.е. проявлял эритропоэтические свойства.

Ключевые слова: собаки, хвойная энергетическая добавка, ростовесовые показатели, гемоглобин, эритроциты.

STUDY OF INFLUENCE OF CONIFER ENERGY SUPPLEMENT ON BODY MASS AND HAEMATOLOGICAL INDICES OF CARNIVORES

Research article

Kalyazina N.YU.¹, Kiryaev V.M.², Rodina E.V.^{3,*}, Rodin V.N.⁴, YAvkin D.E.⁵

³ ORCID: 0000-0002-5055-2431;

^{1, 3, 4, 5} N. P. Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia;

² Nizhny Novgorod Regional Institute of Management and Economics of the Agro-Industrial Complex, Nizhny Novgorod, Russia

* Correspondent author (kizim2008[at]yandex.ru)

Abstract

In the production of medicines and supplementary feeds, forest biomass is the most valuable raw material for many biologically active substances. The aim of the work is to study the influence of forest biomass high refined products in the form of conifer energy supplements (CES) on body mass and hematological rates of domestic unproductive animals (dogs). During the experiment, it was found that feeding an original coniferous energy supplement to dogs every day for 30 days has a positive effect on their health, resulting in a significant stimulation of weight gain. The optimal dose of CES is 0.5 ml/kg of body weight, and, as it was established, when given internally, the drug stimulated hemoglobin and erythrocyte levels in the blood, i.e. exhibited erythropoietic properties.

Keywords: dogs, conifer energy supplement, body mass rates, hemoglobin, erythrocyte.

Введение

Обеспечить здоровье и долголетие своему питомцу – одна из ключевых задач ответственного владельца. Основные показатели здоровья животных это его активность, внешний вид и ростовесовые показатели.

Одной из главных проблем у мелких пород домашних животных является изначально неправильный подобранный рацион владельцами, что может приводить к негативным последствиям с возрастом, а также же к возникновению определенных заболеваний, связанных с генетической предрасположенностью [1], [2], [3].

Литературные данные убедительно свидетельствуют о том, что целенаправленных работ по сравнительному, экспериментальному и клиническому изучению состоянию непродуктивных животных, при различной незаразной патологии, при применении ими продуктов глубокой переработки биомассы леса в виде ХЭД внутрь, особенно основанных на современных научных сведениях явно недостаточных, что определило наш научный и практический интерес.

Целью работы являлось изучение влияния продуктов глубокой переработки биомассы леса в виде хвойной энергетической добавки (ХЭД) на ростовесовые и гематологические показатели домашних непродуктивных животных (собак).

Для достижения поставленной цели решались следующие конкретные задачи: изучить особенности влияния ХЭД на ростовесовые показатели собак; изучить особенности влияния ХЭД на гематологические показатели собак.

Глубокая переработка леса. Биорефайнинг

Методы биотехнологии позволяют полностью переработать отходы агропромышленного комплекса, древесное сырье (низкокачественная древесина, кора, древесная зелень, в первую очередь преимущественно выращиваемых хвойных

пород) как возобновляемое растительное сырье представляет собой неисчерпаемый источник и может быть дешевым исходным сырьем для получения многих ценных природных биологически активных веществ [4].

Биомасса леса является ценнейшим сырьем для получения многих биологически активных веществ, в том числе и используемых при производстве лекарственных препаратов и кормовых добавок [5], [6], [7].

При получении ХЭД реализована технология переработки древесной зелени, основанная на извлечении биологически-активных веществ новым селективным экстрагентом (производитель ООО НТЦ «ХИМИНВЕСТ» г. Нижний Новгород).

Хвойная энергетическая добавка (на основе хвойной лапке) - однородная вязкая жидкость с характерным хвойным запахом, оливково-зеленого или темно-зеленого цвета, содержание воды не более 50%, pH 8,0 - 9,0, плотность не менее 1,126 и массовой долей каротина на 100 г экстракта не менее 3 мг%. При проведении исследований химического состава ХЭД установлено содержание витаминов группы В: В₁, В₂, В₃, В₅, В₆, В₉, а также каротиноидов и многих других биологически активных соединений. Энергетическая ценность хвойной энергетической добавки составляет 250 ккал/100 г добавки. Хвоя содержит кобальт, медь, марганец, цинк, железо, которые играют важную роль в образовании клеток крови, хлорофилл и ксантофилл, которые, играют важную роль в обмене веществ, а также большое количество фитонцидов, содержатся сахара, глюкоза, фруктоза, пектиновые, дубильные вещества [4], [6], [8], [10].

ХЭД в виде готового препарата поставлял ООО НТЦ «ХИМИНВЕСТ».

Методы и принципы исследования

Исследования проводились в период с 2018-2021 гг. Эксперименты проводились на клинически здоровых (без внешне выраженных патологических симптомов) животных (щенки метиса в возрасте 2,5-4 месяцев массой 5-7 кг), содержащихся в вольерах по 5 голов, из которых по принципу аналогов было сформировано 4 группы животных (одна группа - контрольная, 1, 2, 3 – опытные по 5 голов в каждой). Условия кормления и содержания собак всех групп были одинаковыми.

Перед экспериментом были проведены следующие исследования: детальный анамнез, изучение условий содержания и кормления животных, индивидуальное взвешивание, гематологическое исследование. В данном эксперименте определяли влияние ХЭД на ростовесовые и гематологические показатели собак. При проведении эксперимента животные 1-й, 2-й и 3-й опытных групп получали с кормом за один прием хвойную энергетическую добавку в течение 30 дней в дозе 0,25 мл/кг, 0,5 мл/кг и 1 мл/кг соответственно. После завершения эксперимента животным контрольной и опытных групп были выполнены: индивидуальное взвешивание и отбор крови для гематологических исследований. Длительность эксперимента составляла 4 месяца (30 дней давали собакам ХЭД и в течение 90 суток оценивали действие препарата на организм животных).

Основные результаты

Полученные в ходе эксперимента данные представлены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1 – Влияние ХЭД в различных дозировках на ростовесовые показатели собак (прирост массы тела, г)

Показатель	Сроки исследования, сут.		
	30	60	90
Контроль	300,0±3,33	320,0±4,55	400,0±1,98
1 опытная группа	350,0±5,05*	400,0±1,53*	520,0±2,35*
2 опытная группа	400,0±1,52*	450,0±0,78*	600,0±2,12*
3 опытная группа	350,0±5,05*	370,0±2,70*	510,0±4,75*

*Примечание: здесь и в последующих таблицах знаком * обозначены случаи достоверных отличий исследованных показателей подопытных животных, по сравнению с контрольными*

Анализируя результаты таблицы 1, мы можем заключить, что применение ХЭД способствует повышению ростовесовых показателей у опытных животных, в сравнении с контрольными. Наибольший прирост массы тела наблюдается у животных второй опытной группы на 3 месяц исследований (90 сут.) при дозировке ХЭД 0,5 мл/кг.

Таблица 2 – Влияние ХЭД в различных дозировках на уровень гемоглобина (г/л) в крови у собак

Показатель	Сроки исследования, сут.			
	До опыта	30	60	90
Контроль	140,6±2,59	135,0±1,48*	140,8±2,63	125,0±1,13*
1 опытная группа	130,4±1,76	150,0±3,33*	150,0±1,05*	140,0±2,02
2 опытная группа	130,0±1,09	155,0±2,54*	165,0±0,61*	165,0±0,74*
3 опытная группа	135,1±1,38	145,2±1,31*	150,2±1,44*	150,0±2,16*

Таблица 3 – Влияние ХЭД в различных дозировках на уровень эритроцитов ($\times 10^{12}/л$) в крови у собак

Показатель	Сроки исследования, сут.			
	До опыта	30	60	90
Контроль	4,7±3,36	5,0±3,83	5,7±2,59*	5,9±1,20*
1 опытная группа	4,8±2,70	5,2±3,45	6,1±2,50*	6,9±1,21*
2 опытная группа	4,8±1,13	5,5±2,57*	6,3±2,86*	7,2±2,33*
3 опытная группа	4,9±3,68	5,3±1,58	6,0±3,11*	7,1±1,72*

Результаты таблиц 2 и 3 позволяют сделать вывод, что гематологические показатели у исследуемых животных улучшаются от применения ХЭД. Наибольший уровень гемоглобина и эритроцитов в крови наблюдается у собак второй опытной группы на 3 месяц (90 сут.) исследований: 165 г/л и $7,2 \times 10^{12}/л$ соответственно.

Таким образом, проведенные исследования убедительно показывают, что применение ХЭД собакам внутрь положительно влияет на ростовесовые показатели и гематологический статус. Установлена выраженная способность ХЭД стимулировать выработку гемоглобина и эритроцитов в крови у животных. Выявленный эффект позволяет предположить, что применение ХЭД внутрь животным оказывает эритропоэтическое действие.

Заключение и практические предложения

Применение оригинальной хвойной энергетической добавки собакам ежедневно внутрь в течение 30-ти дней положительно влияет на их здоровье и приводит к значительно выраженной стимуляции набора массы тела. Оптимальной дозой ХЭД является 0,5 мл/кг массы тела. Установлено, что при применении ХЭД внутрь, препарат приводил к стимуляции уровня гемоглобина и эритроцитов в крови, т.е. проявлял эритропоэтические свойства.

Полученные результаты позволяют применять ХЭД собакам при различных незаразных патологиях и рекомендовать для использования полученные данные при проведении поисковых работ по применению природных биологически активных стимуляторов для практических специалистов; результаты исследований представляют интерес для исследователей, занимающихся разработкой и внедрением во врачебную практику биологически активных веществ.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Кормление домашней собаки (эволюционные, этологические и физиологические аспекты): учебник / Н.Е. Шалабот и др. – Пермь: РИА «Стиль-МГ», 2010. – С. 246-247.
2. Калязина Н.Ю. Сравнительные аспекты различных методов стимуляции кроветворения животных / Н.Ю. Калязина, А.В. Добиков, А.С. Зенкин // XXXIV Огаревские чтения. Материалы чтения науч. конф. в 2 ч. Ч.2. Естественные и технические науки. – Саранск: Изд-во Мордов унта, 2006. – С. 161-162.
3. Абрамов М.Г. Клиническая гематология. / М.Г. Абрамов Под ред. Шт. Берчану. – Бухарест. – 1985. – С. 23-24.
4. Продукты глубокой переработки биомассы леса как источник биологически активных веществ для сельского хозяйства / В.П. Короткий, В.А. Рыжов, И.В. Короткий и др. / Повышение продуктивности, рациональное использование и охрана лесного фонда. Тр. СПбНИИЛХ. СПб: СПбНИИЛХ. – 2011. – № 2 (25). – С. 105-114.
5. Разработка и промышленное применение отечественных фитобиотиков / Е.С. Рыжова, С.С. Марисов, В.А. Рыжов и др. // Современные научные исследования. Выпуск 3. – Концепт. – 2015. – Т. 13. – С. 3236-3240.
6. Применение продуктов Био-рефайнинга в ветеринарной медицине / А.И. Свитин, А.С. Зенкин, Н.Ю. Калязина и др. // XLVII Огаревские чтения. Материалы чтения науч. конф. в 3 ч. Ч.2. Естественные и технические науки. – Саранск: Изд-во Мордов унта, 2019. – С. 116-119.
7. Калязина Н.Ю. Влияние цереброспинальной жидкости и ультрафиолетового излучения на морфофункциональное состояние костного мозга: дис. ... канд. вет. наук: 16.00.02: / Калязина Наталья Юрьевна. – Саранск, 2002. – С. 122-139.
8. Изучение влияния оригинальной хвойной энергетической кормовой добавки на клинические показатели и мясную продуктивность телят, их гематологический статус / А.С. Зенкин, А.И. Свитин, Н.Ю. Калязина и др. // Иппология и ветеринария. – 2019. – № 2. – С. 28-33.
9. Полозюк О.Н. Гематология : учебное пособие / О.Н. Полозюк, Т.М. Ушакова // Донской ГАУ. – Персиановский : Донской ГАУ, 2019. – С. 51-56.
10. Изучение влияния энергетического хвойно-льняного стимулятора на гематологические показатели телят / А. С. Зенкин, Ф. П. Пильгаев, Ю. А. Боряева и др. // Иппология и ветеринария. – 2019. – № 2 – С. 34-42.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Shalabot N.E. Kormleniye domashney sobaki (evolyutsionnyye, etologicheskiye i fiziologicheskiye aspekty): uchebnik [Feeding the domestic dog (evolutionary, ethological and physiological aspects): textbook] / N.E. Shalabot et al. – Perm: RIA "Style-MG", 2010. – pp. 246-247. [in Russian]
2. Kalyazina N.Y. Sravnitelnyye aspekty razlichnykh metodov stimulyatsii krovetvoreniya zhivotnykh [Comparative aspects of different methods of stimulation of animal hematopoiesis] / N.Y. Kalyazina, A.V. Dobikov, A.S. Zenkin // XXXIV Ogarevskiy chteniya. Materialy chteniya nauch. konf. v 2 ch. Ch.2. Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki. [XXXIV Ogarev Readings. Materials of scientific conf. in 2 parts. Natural and Technical Sciences]. – Saransk: Mordov-University Publisher, 2006. – pp. 161-162. [in Russian]
3. Abramov M.G. Clinical hematology / M.G. Abramov ed. Sht. Berchanu. – Bucharest. – 1985. – pp. 23-24. [in Russian]
4. Produkty glubokoy pererabotki biomassy lesa kak istochnik biologicheskii aktivnykh veshchestv dlya selskogo khozyaystva [Products of deep processing of forest biomass as a source of biologically active substances for agriculture] / V.P. Korotky, V.A. Ryzhov, I.V. Korotky et al. / Povysheniye produktivnosti, ratsionalnoye ispolzovaniye i okhrana lesnogo fonda [Increasing productivity, rational use and protection of forests]. Proc. SPbNIILKh. SPb: SPbNIILKh, 2011. – No. 2 (25). – pp. 105-114. [in Russian]
5. Razrabotka i promyshlennoye primeneniye otechestvennykh fitobiotikov [Development and industrial application of domestic phytobiotics] / ES Ryzhova, SS Marisov, VA Ryzhov et al. // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya. Vypusk 3 [Modern Scientific Research. Issue 3]. – Concept. - 2015. – No. 13. – P. 3236-3240. [in Russian]
6. Primeniye produktov Bio-refayninga v veterinarnoy meditsine [Application of Bio-Refining products in veterinary medicine] / A.I. Svitin, A.S. Zenkin, N.U. Kalyazina et al. // XLVII Ogarevskiy chteniya. Materialy chteniya nauch. konf. v 3 ch. Ch.2. Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki [XLVII Ogarevskiy readings. Materials of scientific conf. in 3 parts. Natural and Technical Sciences]. – Saransk: Mordov-University Publishing House, 2019. – pp. 116-119. [in Russian]
7. Kalyazina N.Y. Vliyaniye tserebrospinalnoy zhidkosti i ultrafioletovogo izlucheniya na morfofunktsionalnoye sostoyaniye kostnogo mozga [Influence of cerebrospinal fluid and ultraviolet radiation on the morphofunctional state of the bone marrow]: Ph. ... Cand. of Sci: 16.00.02: / Natalia Yurievna Kalyazina. – Saransk. 2002. – pp. 122-139. [in Russian]
8. Izucheniye vliyaniya originalnoy khvoynoy energeticheskoy kormovoy dobavki na klinicheskiye pokazateli i myasnuyu produktivnost telyat. ikh gematologicheskii status [The study of the effect of the original pine energy feed additive on clinical parameters and meat productivity of calves, their hematological status] / A. S. Zenkin, A.I. Svitin, N.U. Kalyazina et al. // Ippologiya i veterinariya [Hippology and Veterinary Medicine, 2019]. – № 2. – pp. 28-33. [in Russian]
9. Poloziuk O.N. Gematologiya : uchebnoye posobiye [Hematology : textbook] / O.N. Poloziuk, T.M. Ushakova ; Donskoi GAU. – Persianovsky : Donskoy GAU, 2019. – pp. 51-56. [in Russian]
10. Izucheniye vliyaniya energeticheskogo khvoyno-lnyanogo stimulyatora na gematologicheskiye pokazateli telyat [The study of the effect of energy pine and flax stimulant on hematological indicators of calves] / A. S. Zenkin, F. P. Pilgaev, Y. A. Boryaeva et al. // Ippologiya i veterinariya [Hippology and Veterinary Medicine, 2019]. – № 2 – pp. 34-42. [in Russian]

PREPARATION OF AMORPHOUS OXIDES Al_2O_3 AND Fe_2O_3 BY A MODIFIED SOL-GEL METHOD

Research article

Derevyanko M.S.^{1,*}, Cheverikin V.V.², Bajenova I.A.³, Kuzovchikov S.V.⁴, Kondratiev A.V.⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Thermochemistry of Materials Scientific Research Centre, Moscow, Russia

* Corresponding author (maksim.derevyanko.96[at]mail.ru)

Abstract

A new approach to obtain amorphous oxides was investigated both theoretically and experimentally using X-ray diffraction (XRD), electron probe microanalysis (EPMA) techniques. In this work, the conventional sol-gel method was modified by the addition of malic acid as an oxidizing agent and successfully applied to obtain two oxides Al_2O_3 & Fe_2O_3 with the amorphous structure. Thermal stability and the enthalpy of fusion of the obtained amorphous oxides were examined by the differential scanning calorimetry (DSC). It was found that amorphous Al_2O_3 was stable up to 790 – 810 °C, while amorphous Fe_2O_3 recrystallized at about 160 – 180 °C, depending on the heating rate. The heat capacity using the DSC method has been measured. The results were observed depending on the heating temperature.

Keywords: Sol-gel process, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Amorphous structure.

ПОЛУЧЕНИЕ АМОРФНЫХ ОКСИДОВ Al_2O_3 И Fe_2O_3 МОДИФИЦИРОВАННЫМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

Научная статья

Деревянко М.С.^{1,*}, Чеверикин В.В.², Баженова И.А.³, Кузовчиков С.В.⁴, Кондратьев А.В.⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский технологический университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (maksim.derevyanko.96[at]mail.ru)

Аннотация

Новый подход к получению аморфных оксидов исследован как теоретически, так и экспериментально с использованием методов рентгеновской дифракции (РФА), электронно-зондового микроанализа (МРСА). В этой работе традиционный золь-гель метод был модифицирован добавлением яблочной кислоты в качестве окислителя и успешно применен для получения двух оксидов Al_2O_3 и Fe_2O_3 с аморфной структурой. Термическую стабильность и энтальпию плавления полученных аморфных оксидов исследовали методом дифференциальной сканирующей calorиметрии (ДСК). Установлено, что аморфный Al_2O_3 стабилен до 790–810 °C, а аморфный Fe_2O_3 рекристаллизуется примерно при 160–180 °C в зависимости от скорости нагрева. Измерена теплоемкость методом ДСК. Результаты наблюдались в зависимости от температуры нагрева.

Ключевые слова: Золь-гель процесс, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Аморфная структура.

1. Introduction

Sol-gel method is used in many fields and areas of modern chemistry to produce materials from solutions, an essential element of which is the formation of a gel at one of the stages of the process 1. Often, in order to obtain compounds by this method, it is necessary to use relatively expensive reagents (e.g. metal alkoxides 2). Fortunately, there are universal methods of obtaining various compounds using cheaper and more readily available reagents that produce the expected results, but in an easier and less costly way.

Aluminum oxide is known to be amphoteric 3 and has many allotropic modifications 4. High-temperature α - Al_2O_3 or corundum 5 is the only thermodynamically stable form of Al_2O_3 occurring in nature 6. The compound, sometimes referred to as β - Al_2O_3 , in fact is not pure aluminum oxide, but a solution that contains several aluminates of alkali and alkaline earth metals 7.

In addition, there are low-temperature modifications of aluminum oxide 8. The widely known γ -modification of Al_2O_3 7, also called active aluminum oxide, has a lower melting point. And the amorphous form, the production of which is more attractive for us for further use in our experiments.

Iron oxide (III), just like aluminum oxide, is an amphoteric oxide 9, which in turn has many basic properties. In terms of the range of its thermal properties, Fe_2O_3 attracts specifically by the fact that it has a low melting point of the order of 1600 °C 10, that can be useful in terms of investigating its various relaxation properties.

In the present paper a modified sol-gel method was used to obtain amorphous forms of Al_2O_3 and Fe_2O_3 11, which was confirmed by XRD and EBSD techniques. Purity of the obtained samples was examined by EPMA method. The study of the thermodynamic properties of the obtained compounds was the main focus of this work.

Thermal stability of amorphous oxides was determined using the DSC method. A conventional method of thermal decomposition of the corresponding nitrates was also used for comparison.

2. Experimental

2.1. Overview

The compounds described in the previous section, namely the amorphous forms of aluminum and iron oxides, can and have been obtained from the salts corresponding to these elements - nitrates 12, 13. However, in this study, non-standard approach and aspects of the sol-gel method were used to obtain the corresponding oxides 1.

At first, attempts to obtain oxides by an improved sol-gel method and their further analysis were made. Then, the conventional thermal decomposition of aluminum 12 and iron 13 nitrates in an electric furnace was used to compare the products of these two reactions and clearly show their differences.

2.2. Modified sol-gel method

Sol-gel technique represents a large group of methods for synthesizing materials from solutions, an essential element of which is the formation of a sol at one stage and a gel at another stage of the process. In the present work, an improvement of the traditional sol-gel method was proposed, which consisted in the addition of malic acid as an oxidizer to obtain oxides 11 with an amorphous structure.

Malic acid is a hydroxycarboxylic acid, which has good oxidizing properties, promoting thereby separation and removal of nitrogen dioxide from the reaction with the nitrate salts used as reagents in this method. Also, the use of malic acid lies in its manifestation of the properties of a natural preservative, which can prevent the appearance of harmful substances in the reaction products, as well as slow down their chemical oxidation with atmospheric oxygen.

The corresponding oxides were obtained by the improved sol-gel method and also by traditional thermal decomposition of aluminum and iron nitrates for comparison of these two methods. The approach proved to obtain an amorphous structure of oxides, in addition, having particle sizes at the nanoscale.

Further modifications of this approach are associated with low operating temperatures of the synthesis and unpretentious conditions for its implementation.

2.3. Sample preparation

2.3.1. Al₂O₃

Modified sol-gel method:

Raw material with purity Al(NO₃)₃·9H₂O (98 wt.%) was dissolved in distilled water in a ratio of 1:5 (10 g of nitrate to 50 ml of water) with vigorous stirring and room temperature. After complete dissolution, malic acid (food additive E296) was added in an amount of 3 g. The resulting solution was put in a thermostat preheated to 80 °C for 3 hours. Then, solution of a translucent turquoise color was thermostated at 60 °C for 24 hours. The product was a yellowish foamy mass, covered with a crust. The resulting compound was dried again at 80 °C, but for 19 hours to obtain crystals of a foamy state of turquoise color.

The crystals were placed in a beryllium crucible and heated up in a muffle furnace to 700 °C with the heating rate about 20-25 K/min, then the sample was sintered at 700 °C for 15 minutes.

The small fraction was sampled, let the rest of the sample heat up to 850 °C and keep it at this temperature for another 30 min. The muffle furnace was turned off and cooled to room temperature with the sample inside. Then the sample was removed, and the resulting grayish powder was examined using the EPMA and XRD methods.

Thermal decomposition of the corresponding nitrate:

A small amount of aluminum nitrate was poured into a porcelain glass. The glass with the sample was placed on a preheated electric oven located under the vent hood. The onset of the reaction can be seen by abundant emission of a brown gas (NO₂). The melting process was continued until the compound was completely melted and nitrogen dioxide ceases to evolve.

After that, the glass was removed from the oven and cooled in air under the hood. The abundant crystallization of the resulting compound was noticed. The fine-crystalline white powder with a grayish tint was obtained. The structure and composition of amorphous Al₂O₃ were later confirmed by XRD and EPMA.

2.3.2. Fe₂O₃

Modified sol-gel method:

After the successful completion of the synthesis with aluminum oxide, to test the method on another amphoteric oxide was decided. Fe₂O₃ was the most promising for this 9.

Based on the ratio of equivalents of aluminum nitrate and malic acid, the weight of the sample for iron nitrate (III) was calculated. Raw material with purity Fe(NO₃)₃·9H₂O (98 wt.%) was dissolved in distilled water in a ratio of 1:5 (11 g of nitrate to 55 ml of water) with vigorous stirring and room temperature. After complete dissolution, malic acid (food additive E296) was added in an amount of 3.5 g. The resulting brown solution was put in a thermostat preheated to 80 °C for 3 hours. Then, solution was kept at 60 °C for 24 hours. A wet, powdery brown mass was obtained. After 24 hours, the resulting compound was dried again at 80 °C, but for 20 hours. The brown crystals were got.

The brown crystals were sintered in a muffle furnace, having previously given a sample for XRD and EPMA. The sample was placed into a beryllium crucible and heated up in the furnace to 150 °C, according to the data obtained from 14. By sintering compound at a given temperature for 20 minutes, a fraction for XRD and EPMA analyses was separated to determine the chemical and phase compositions of the sample. The powdered crystals of a dark burgundy color were obtained.

In the same way the fractions of the sample thermostated at temperatures of 600 °C (30 minutes) and 850 °C (30 minutes) were proceeded.

Thermal decomposition of the corresponding nitrate:

A small amount of $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ was poured into a porcelain glass. The glass with the sample was placed on a preheated electric oven located under the vent hood. The onset of the reaction can be seen by abundant emission of a brown gas (NO_2). The melting process was continued until the compound was completely melted and nitrogen dioxide ceases to evolve.

After that, the glass was removed from the oven and cooled in air under the hood. The abundant crystallization of the resulting compound was noticed. A fine-crystalline brown powder was obtained. The structure and composition of amorphous Fe_2O_3 were later confirmed by XRD and EPMA.

2.4. Microstructure analysis

An electron probe microanalysis (EPMA) was carried out using a TESCAN VEGA LMH microscope with a LaB_6 cathode and an energy dispersive (EDS) X-ray microanalysis system (Oxford Instruments Advanced Aztec Energy) and a four-crystal wave spectrometer, with the acceleration voltage of 20 kV. The detector was calibrated using the standard samples of Al (99.99%) and Fe (99.999%) from Oxford Instruments. The chemical composition was determined by comparing the characteristic radiation observed and incorporated into the analyzer. Quantitative analysis was carried out on the basis of differences in the radiation intensity of the strongest line of the K- or L- series of characteristic radiation of the element. The measurement error in determining the concentration of elements using EPMA was 0.1 at.% [15].

2.5. XRD analysis of samples

X-ray diffraction (XRD) analysis was applied to determine the phase compositions of the alloys using $\text{Cu K}\alpha$ radiation operated at a voltage of 40 kV, a current of 40 mA and filtered with a Ni-crystal monochromator. XRD measurements were performed using a multipurpose X-ray diffractometer (Bruker-AXS D8 Discover). Al_2O_3 was used as an internal standard to achieve better accuracy in the 2θ values. A parallel beam with a divergence of 0.03° was formed using the mirror of Gobel. The reflected intensity of the beam was measured using a LYNXEYE position sensitive detector (angular resolution of 0.015°). The phases were identified by comparing their diffraction patterns with those known from the literature or calculated using the WinXPOW and PowderCell software packages [16]. The lattice parameters were calculated with the PowderCell software based on the least-squares method.

2.6. Calorimetric measurements

2.6.1. Differential thermal calorimetry

Differential thermal calorimetry (DTC) was carried out using a DSC LabSys Evo (Setaram / KEP Technologies). The pure metal standards: Al (99.995%), Au (99.99%) and Ag (99.998%) were used for calibration. Samples were placed in an Al_2O_3 crucible and experiments were carried out under 20 ml/min flow of high-purity argon (99.998%). The heating and cooling rates were 1, 5, 10, 15 and 20 K/min, respectively.

2.6.2. Heat capacity

The heat capacity data of amorphous Al_2O_3 sample was measured with a DSC LabSys Evo Setaram using the detector 3D Cp Sensor. The output of the calorimeter readings and the calculation of the heat capacity were carried out using the Calisto software. The sample was weighed on an analytical balance to the nearest decimal fraction of a gram. The heat capacity measurements were carried out in the temperature range 473 - 1023 K. The experiment was carried out in a platinum crucible in an argon flow (99.999%) of about 20 ml/min. The measurements consisted of three successive experiments: with an empty crucible (blank), with a standard reference sample with a known heat capacity in the investigated temperature range (reference), and with the sample under study. Compressed aluminum oxide (Setaram, France) was used as a standard sample. The following equation was used to calculate the heat capacity:

$$C_p(T_i) = \frac{HF_{sample}(T_i) - HF_{blank}(T_i)}{HF_{ref}(T_i) - HF_{blank}(T_i)} \cdot \frac{Mass_{ref}}{Mass_{sample}} \cdot C_{pref}(T_i)$$

where HF is the signal received on the calorimeter, mV;

$Mass$ – mass, g;

C_p – heat capacity, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

$blank$ – for an empty crucible;

ref – for a standard sample;

$sample$ – for the test sample.

3. Results and discussion

3.1. Structure analysis

All synthesized samples were obtained in two ways at different temperature ranges. A suitable method for the preparation of amorphous compounds, properties of oxides and their application are discussed in this section.

3.1.1. Al_2O_3

Modified sol-gel method:

The data of the composition and morphological structure of the oxides were confirmed using the method of X-ray diffraction analysis (XRD) and electron microscopy. From the XRD results the powders calcined at 450, 550, and 650 °C were X-ray amorphous Al_2O_3 [18] (Fig. 1a, b, c), which was also evidenced by the EBSD analysis data. Details of the process are described in the EBSD section.

The powder, heat-treated at 850 °C was represented mostly γ -Al₂O₃ 7 (Fig. 1d), as evidenced by XRD data.

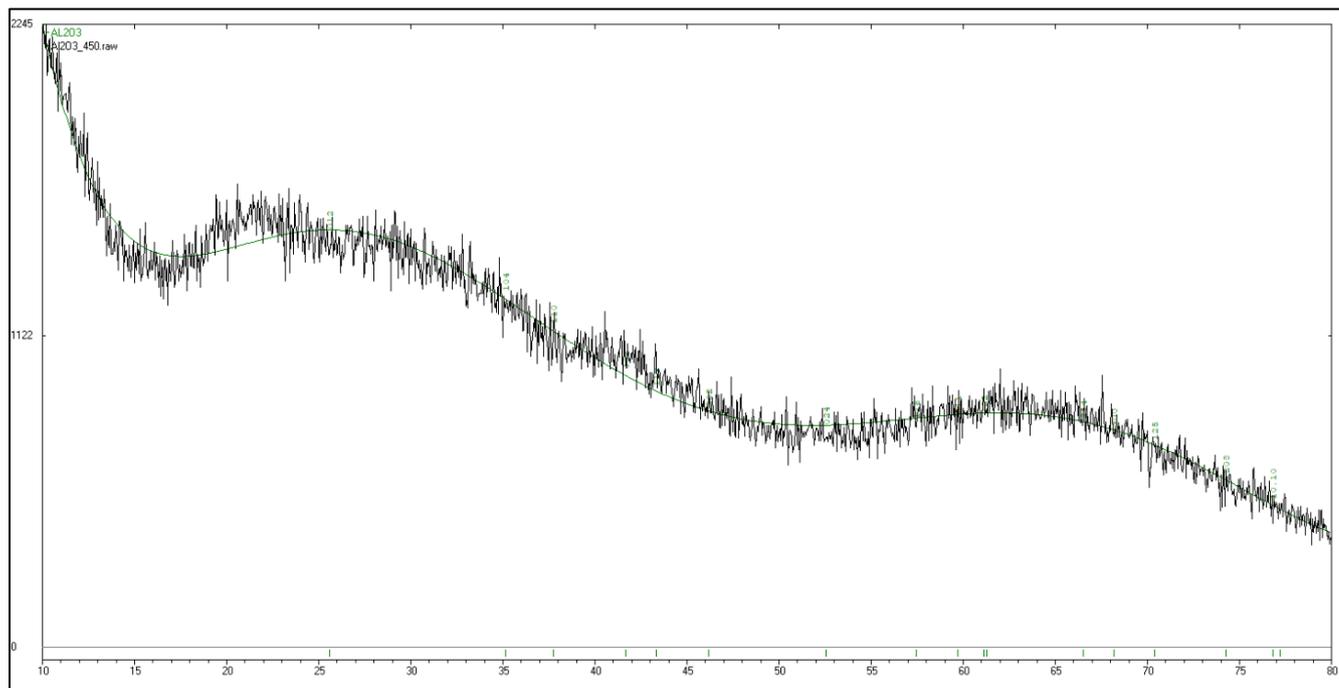


Fig. 1a – XRD data of amorphous Al₂O₃ calcined at 450 °C

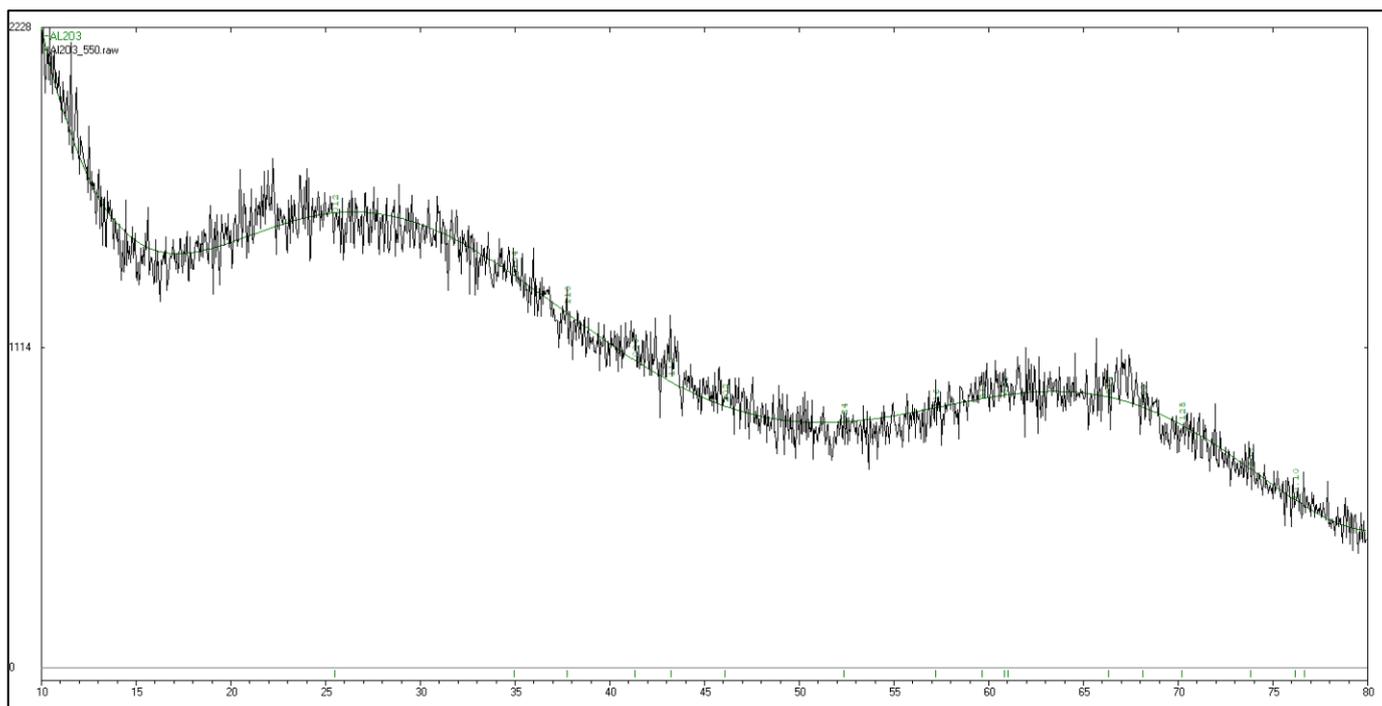


Fig. 1b – XRD data of amorphous Al₂O₃ calcined at 550 °C

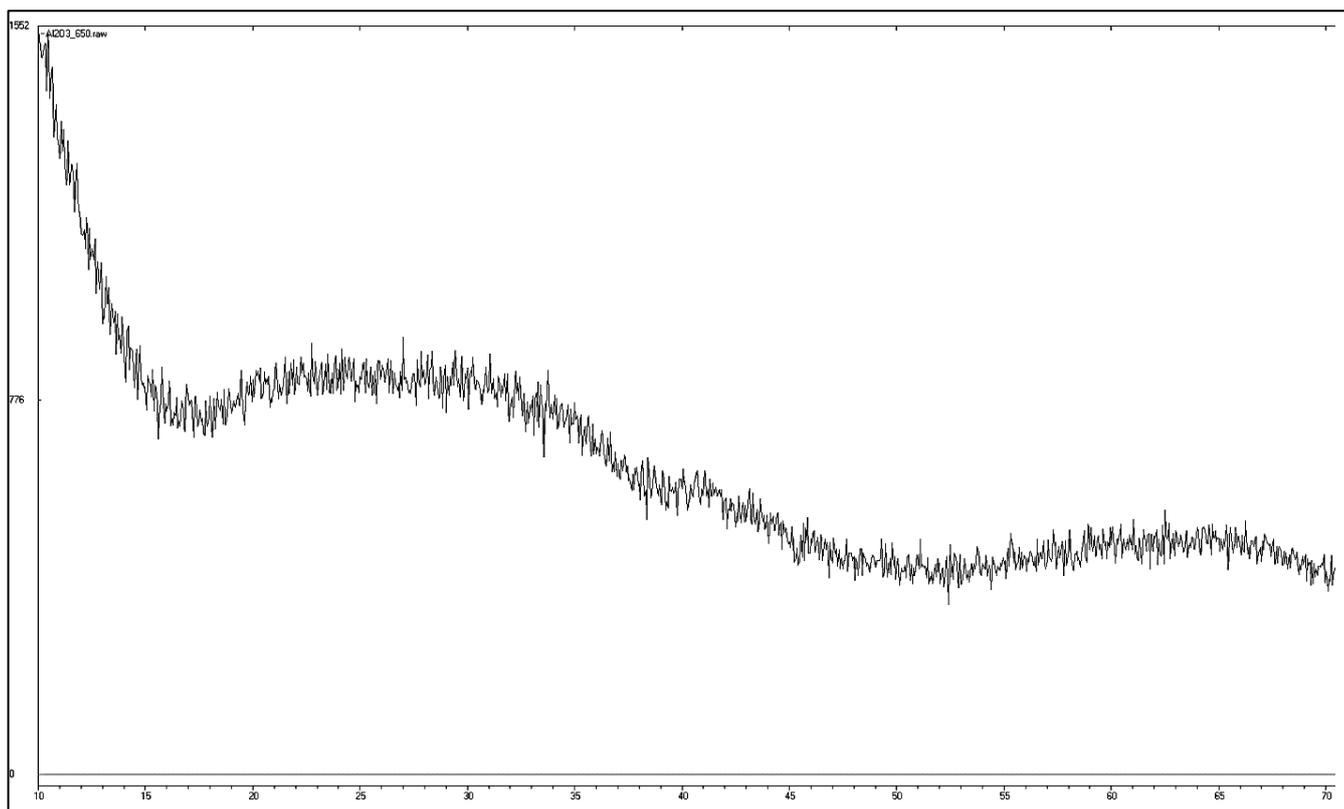


Fig. 1c – XRD data of amorphous Al_2O_3 calcined at 650 °C

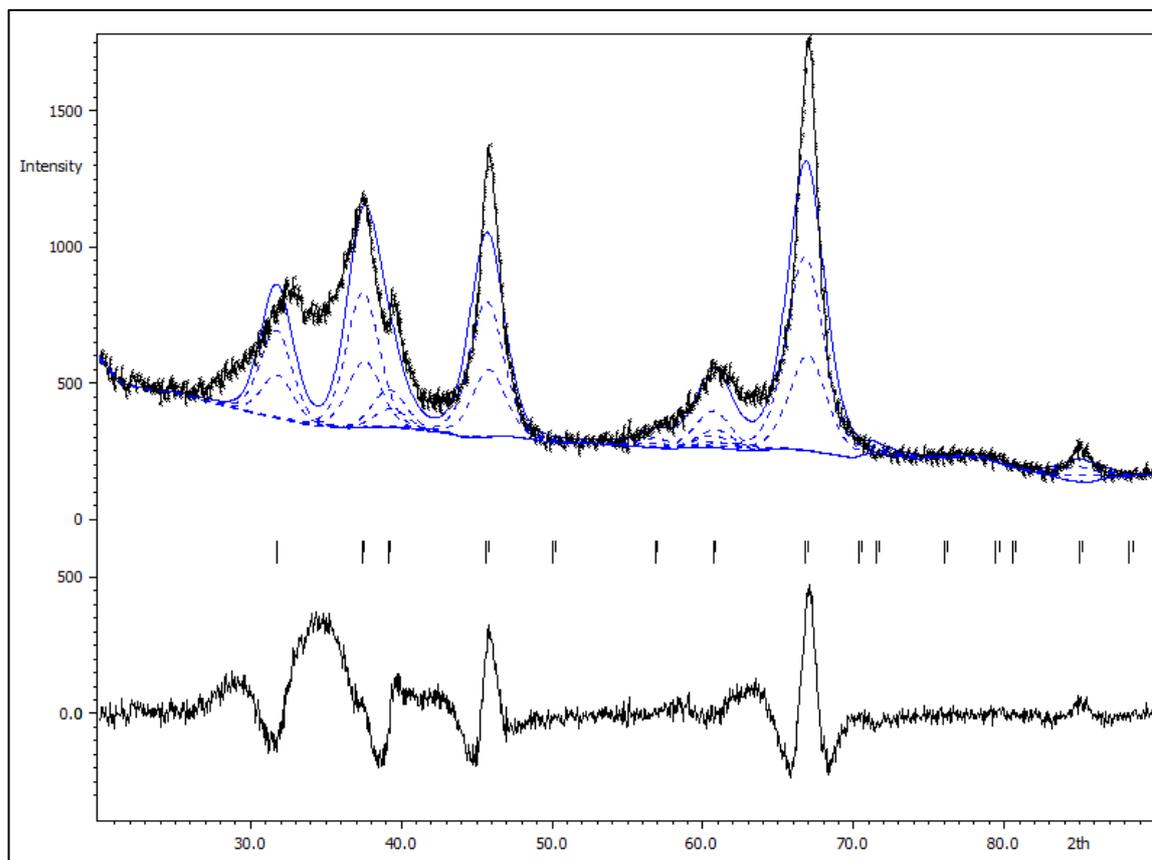


Fig. 1d – XRD data of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ calcined at 850 °C

The amorphous structure of Al_2O_3 can be obtained at temperatures 450-650 °C, as evidenced by Figures 1a-c. It should be noted that the process of recrystallization of amorphous Al_2O_3 started at $T=850$ °C (Figure 1d).

The spectrum from Fig. 1d can partly be identified as a phase with the structure type H1.1. (cF56/2) or $\square\text{-Al}_2\text{O}_3$. The broadness and intensities of the peaks do not fully coincide with the CIF peaks due to the presence of various types of defects in the structure 19 and possible presence of an amorphous or/and other crystalline forms of Al_2O_3 .

Purity of the Al_2O_3 samples obtained by the sol-gel method and sintering at different temperatures was analyzed using the EPMA method. First of all, the aluminum nitrate was examined for the presence of impurities. The EPMA data showed that $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ had a small Na impurity, which can be expected based on the grade of the compound purity (Fig. 2, Table 1).



Fig. 2 – The EPMA analysis of $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

Table 1 – The EPMA analysis of $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Na, %	Al, %	Total, %
S 1	11,97	0	67,52		20,5	100
S 2	11,83	0	68,54		19,63	100
S 3	11,38	0	69,04		19,58	100
S 4	18,09	0	58,28	3,1	20,52	100

The morphology and purity of the obtained oxides were shown in Figures 3a-d and Tables 2-5. A scaly morphology with large pores and a size of 200-300 μm was observed in amorphous Al_2O_3 particles., while the crystalline Al_2O_3 particles were bigger, about 0.5-1 mm.

Trace amounts of the admixture of nitrogen and carbon in the system were not found. An abundant release of NO_2 was noticed during the synthesis. It can be concluded that all undesirable impurities of nitrogen and carbon oxides were removed from the system.

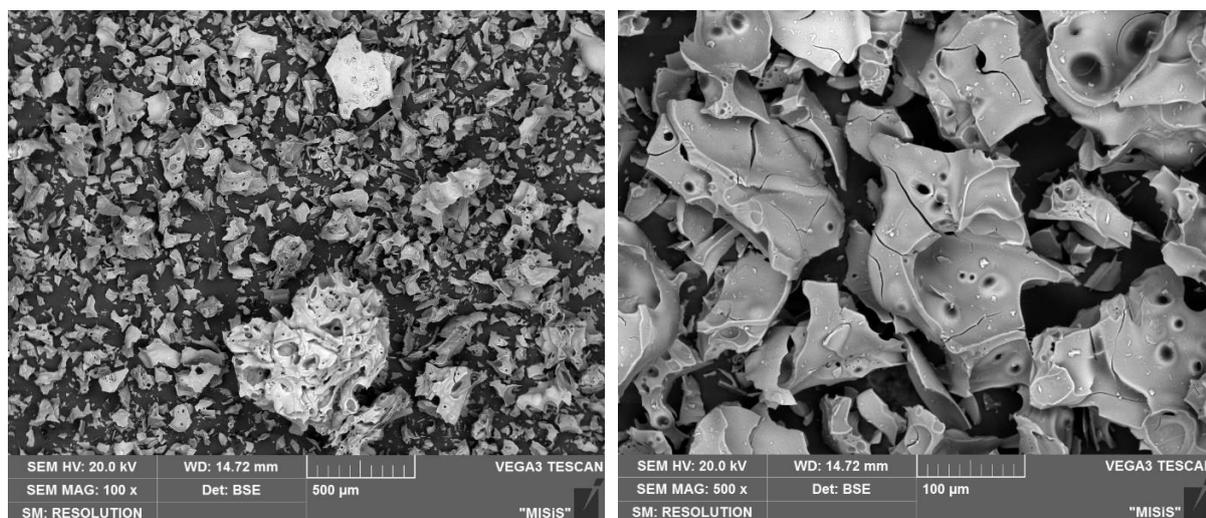


Fig. 3a – The EPMA analysis of the amorphous Al_2O_3 (450 °C)

Table 2 – The EPMA analysis of the amorphous Al₂O₃ (450 °C)

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Al, %	Total, %
S 1	0	0	59,06	40,94	100
S 2	0	0	64,77	35,23	100
S 3	0	0	69,83	30,17	100
S 4	0	0	61,4	38,6	100

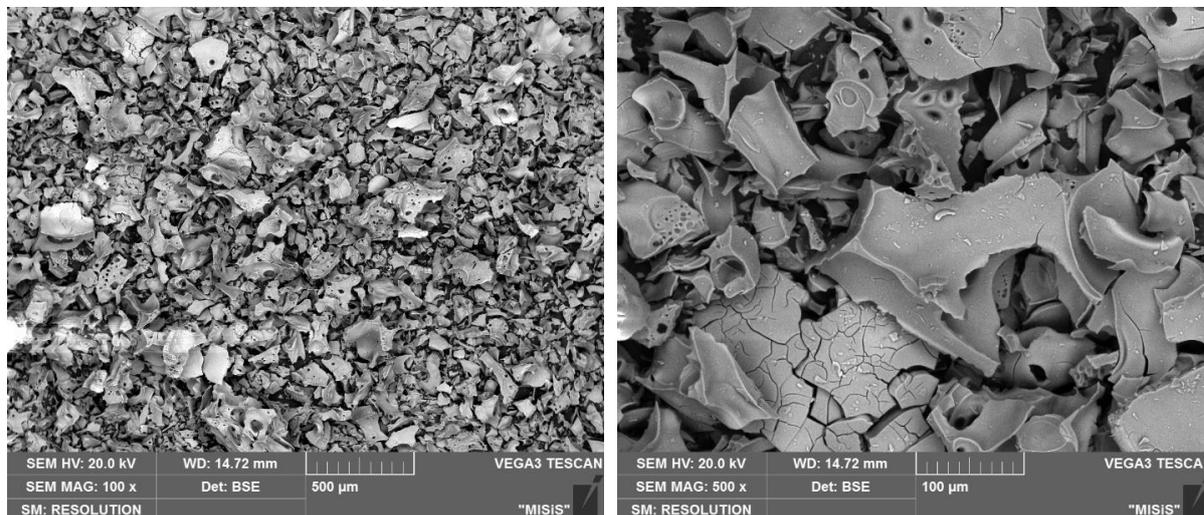


Fig. 3b – The EPMA analysis of the amorphous Al₂O₃ (550 °C)

Table 3 – The EPMA analysis of the amorphous Al₂O₃ (550 °C)

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Al, %	Total, %
S 1	0	0	54,8	45,2	100
S 2	0	0	66,34	33,66	100
S 3	0	0	64,22	35,78	100
S 4	0	0	64,61	35,39	100
S 5	0	0	64,81	35,19	100

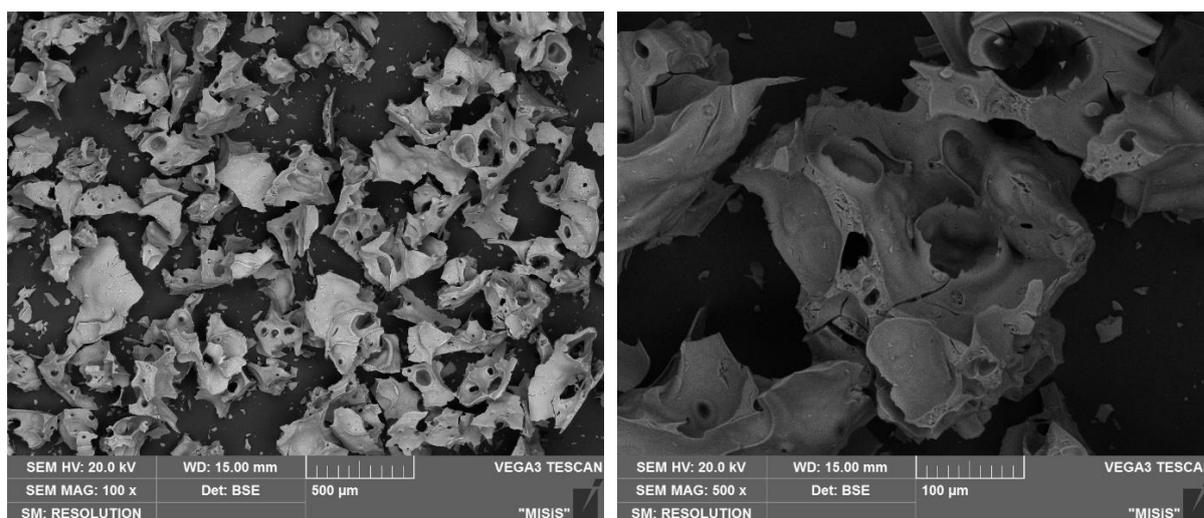


Fig. 3c – The EPMA analysis of the amorphous Al₂O₃ (650 °C)

Table 4 – The EPMA analysis of the amorphous Al₂O₃ (650 °C)

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Al, %	Total, %
S 1	0	0	67,1	32,9	100
S 2	0	0	66,04	33,96	100
S 3	0	0	67,74	32,26	100
S 4	0	0	44,53	55,47	100

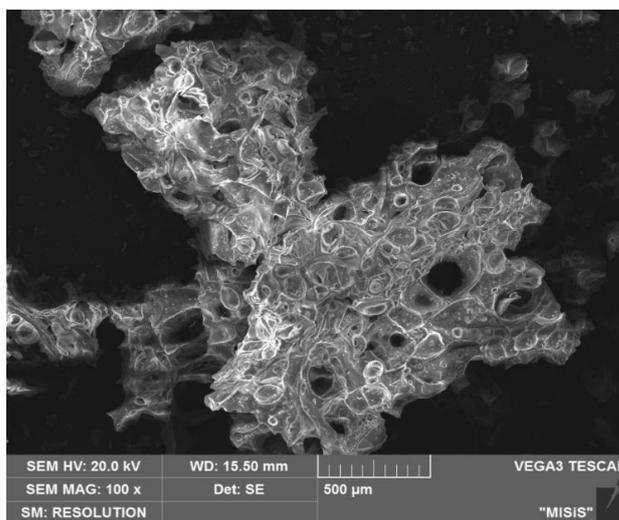


Fig. 3d – The EPMA analysis of γ -Al₂O₃ (850 °C)

Table 5 – The EPMA analysis of γ -Al₂O₃ (850 °C)

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Al, %	Total, %
D 1	0	0	61,9	38,1	100
D 2	0	0	66,86	33,14	100

It was also found that, depending on the sintering temperature of the sample, different modifications of aluminum oxide can be obtained 4.

Thermal decomposition of the corresponding nitrate:

Along with the sol-gel method, the type of structure and composition of aluminum oxide obtained by thermal decomposition of nitrate on an electric stove from the corresponding nitrate were studied.

In the sol-gel method, after annealing at 450 °C, an amorphous oxide structure can be obtained. For these reasons, the temperature of the electric stove was 450 – 490 °C with a time of 20 minutes.

According to the XRD data, aluminum oxide obtained by thermal decomposition had a crystalline structure (Fig. 4). It can be concluded that an amorphous structure cannot be obtained by this method.

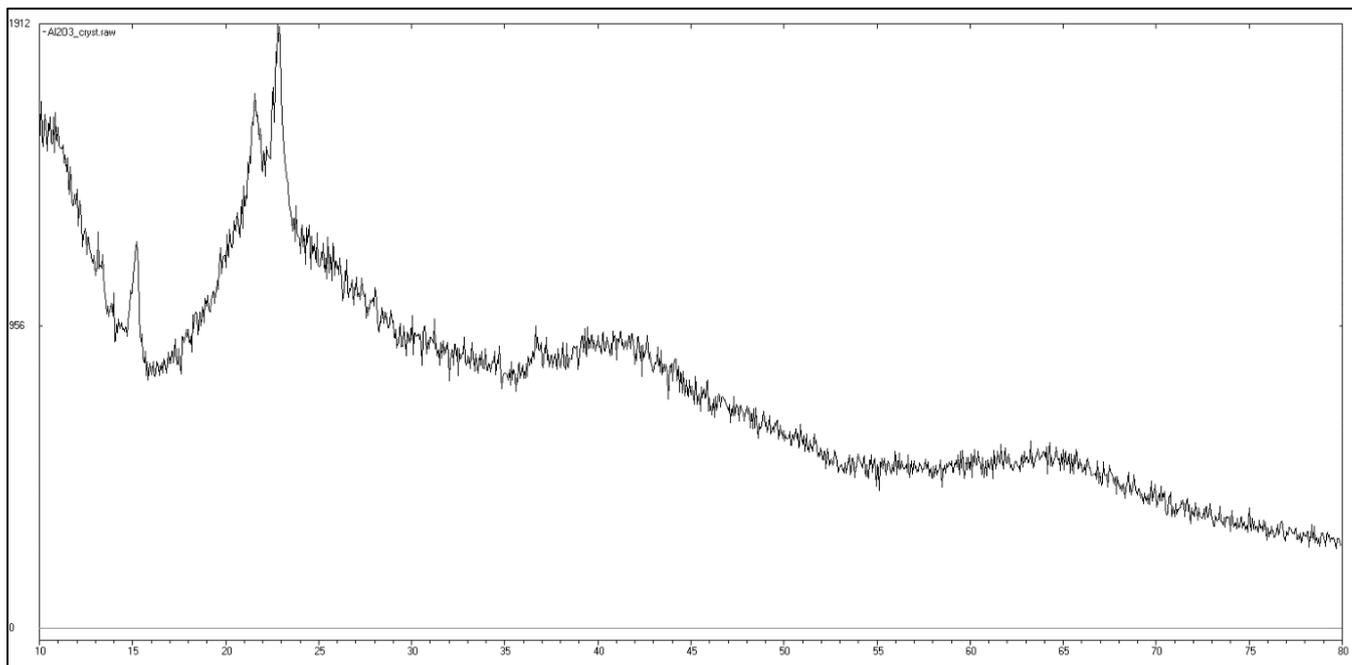
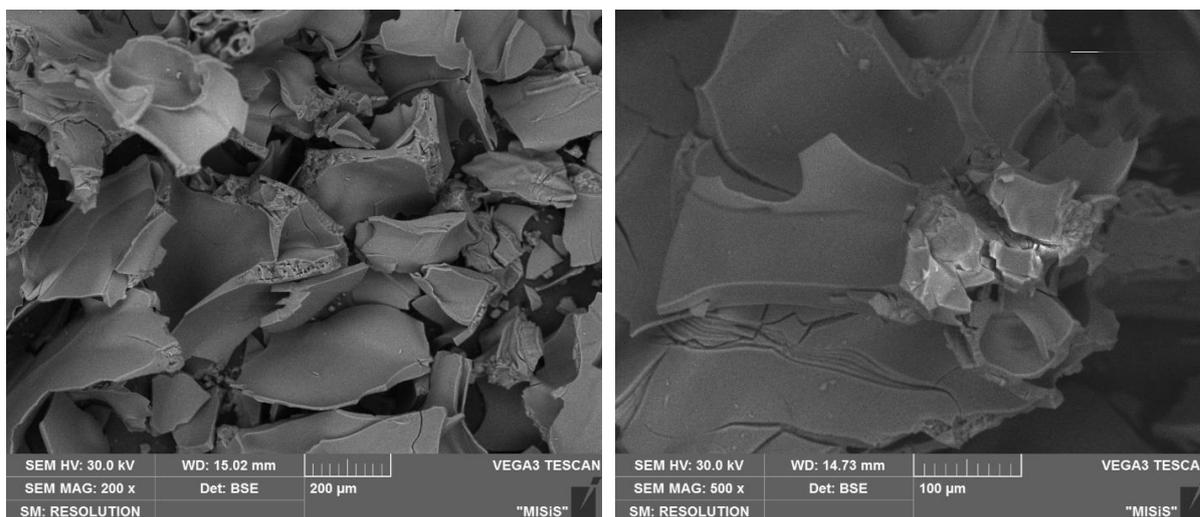


Fig. 4 – The XRD data of the aluminum oxide obtained by thermal decomposition

The purity and composition of the oxide has been proven based on EPMA data. A nitrogen impurity and the absence of trace amounts of carbon were found in the compound (Fig. 5, Table 6).

Fig. 5 – The EPMA analysis of the amorphous Al_2O_3 obtained by thermal decompositionTable 6 – The EPMA analysis of the amorphous Al_2O_3 obtained by thermal decomposition

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Al, %	Total, %
S 1	10,2	0	75,74	14,06	100
S 2		0	79,34	20,66	100
S 3	10,7	0	79,31	9,95	100
S 4	11,8	0	70,56	17,66	100
S 5	9,85	0	72,58	17,56	100

3.1.2. Fe_2O_3

Modified sol-gel method:

Several samples were taken at different stages of obtaining iron oxide (III) at different temperatures. The fractions isolated during sintering at temperatures of 600 °C and 850 °C had a crystalline structure 20. Therefore, these compounds will not be discussed further.

Thence, two samples were examined in details: the first one taken before sintering, the second one isolated after sintering at 150 °C.

It can be seen from the XRD data that the second sample had an amorphous structure with small inclusions of small crystallites 21 (Fig. 6a), which did not quite satisfy our expectations.

The first sample that was taken before sintering represents, according to the XRD data, a completely amorphous substance (Fig. 6b) which was also evidenced by the EBSD analysis data. Details of the process are described in the EBSD section. It should be noted that the modified sol-gel method did not require high sintering temperatures to obtain an amorphous structure.

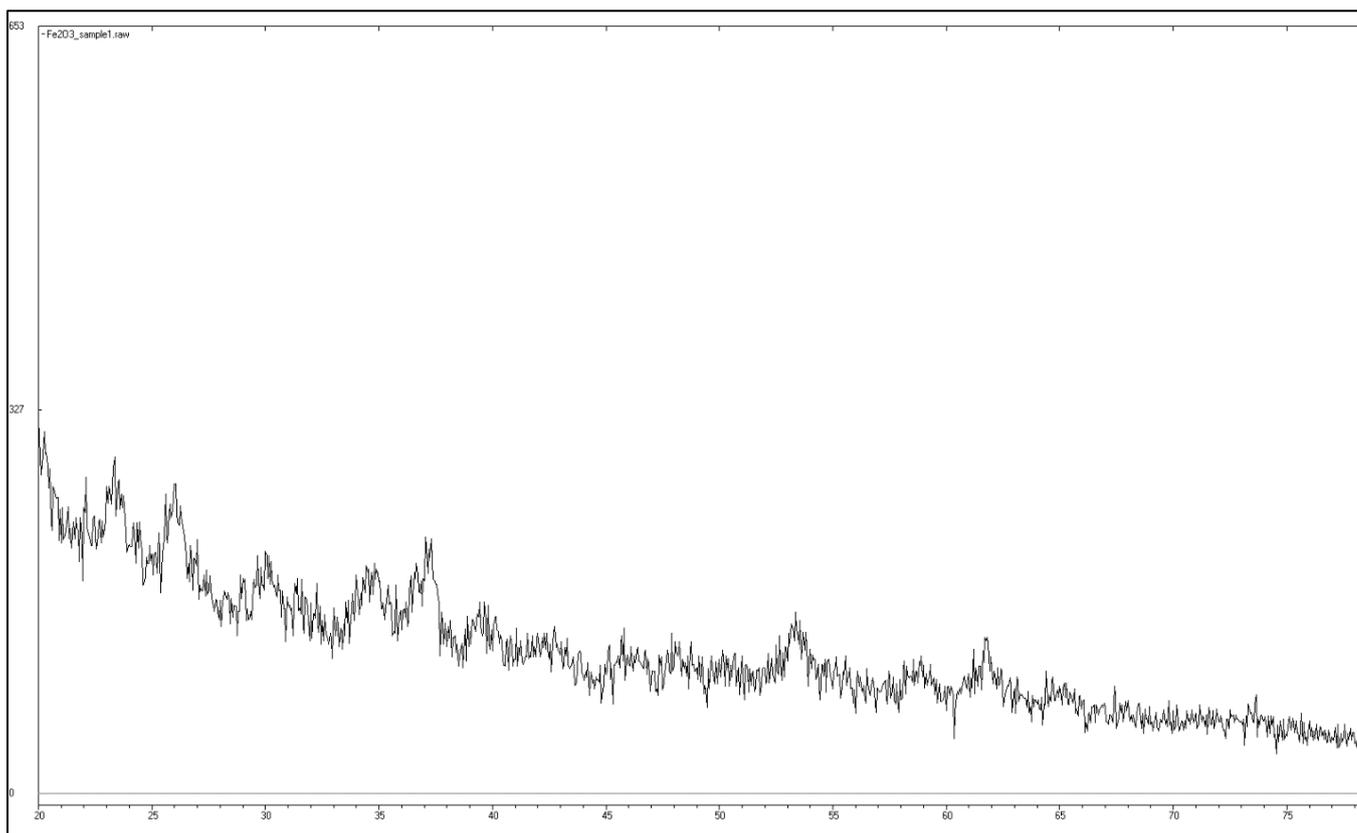


Fig. 6a – The XRD data of Fe_2O_3

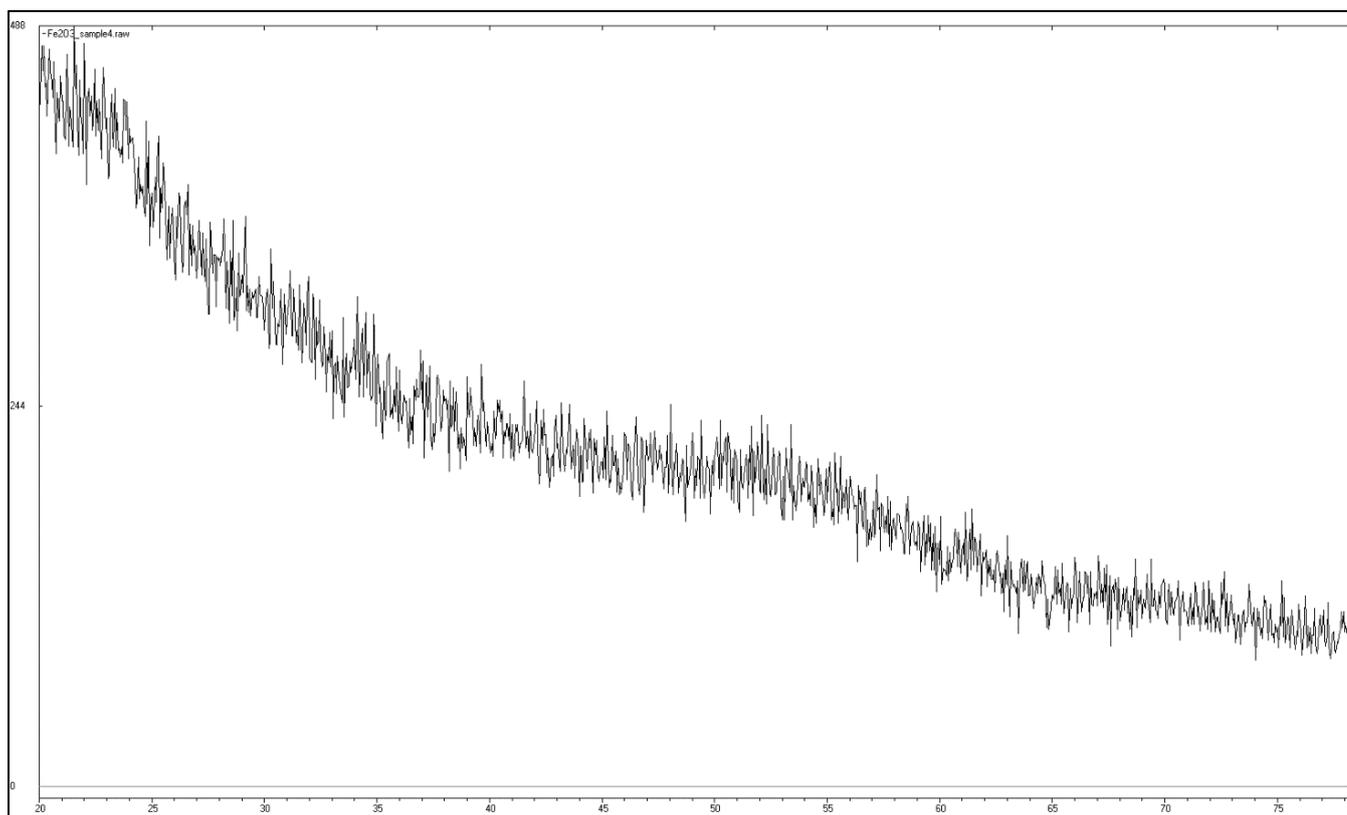


Fig. 6b – XRD data of amorphous calcined at 150 °C Fe_2O_3

As an aluminum nitrate, iron nitric acid (III) was analyzed for the impurities using EPMA. The data showed that this compound had no impurities (Fig. 7, Table 7).

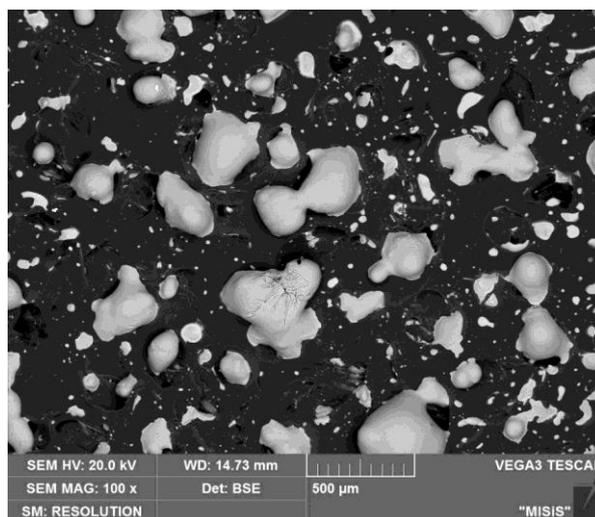


Fig. 7 – The EPMA analysis of $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$

Table 7 – The EPMA analysis of $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Fe, %	Total, %
D 1	20,06	0	63,94	15,99	100
D 2	19,37	0	65,93	14,7	100
D 3	20,09	0	62,85	17,07	100

It can be seen from the EPMA data that the obtained sample of Fe_2O_3 had no impurities and fully corresponded to its composition (Fig. 8, Table 8).

Trace amounts of nitrogen and carbon in the system were not found. An abundant release of NO_2 was noticed during the synthesis. It can be concluded that all undesirable impurities of nitrogen and carbon oxides were removed from the system.

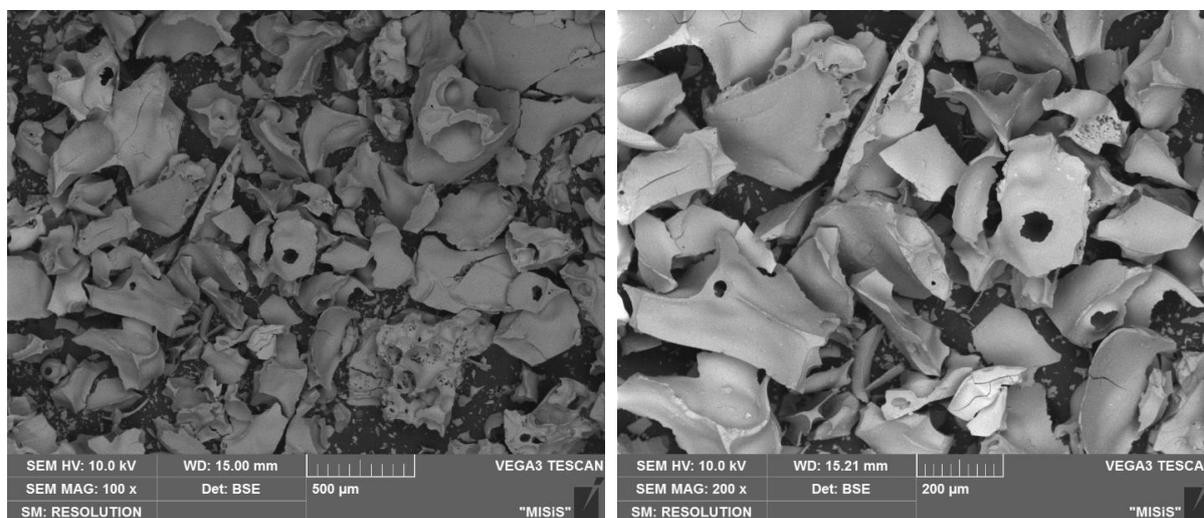


Fig. 8 – The EPMA analysis of the iron oxide calcined at 150 °C

Table 8 – The EPMA analysis of the iron oxide calcined at 150 °C

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Fe, %	Total, %
S 1	0	0	78,41	21,59	100
S 2	0	0	69,69	30,31	100
S 3	0	0	73,67	26,33	100

The EPMA data showed that the amorphous Fe_2O_3 had no impurities (Fig. 9, Table 9). The morphologies of both samples were flake-like.

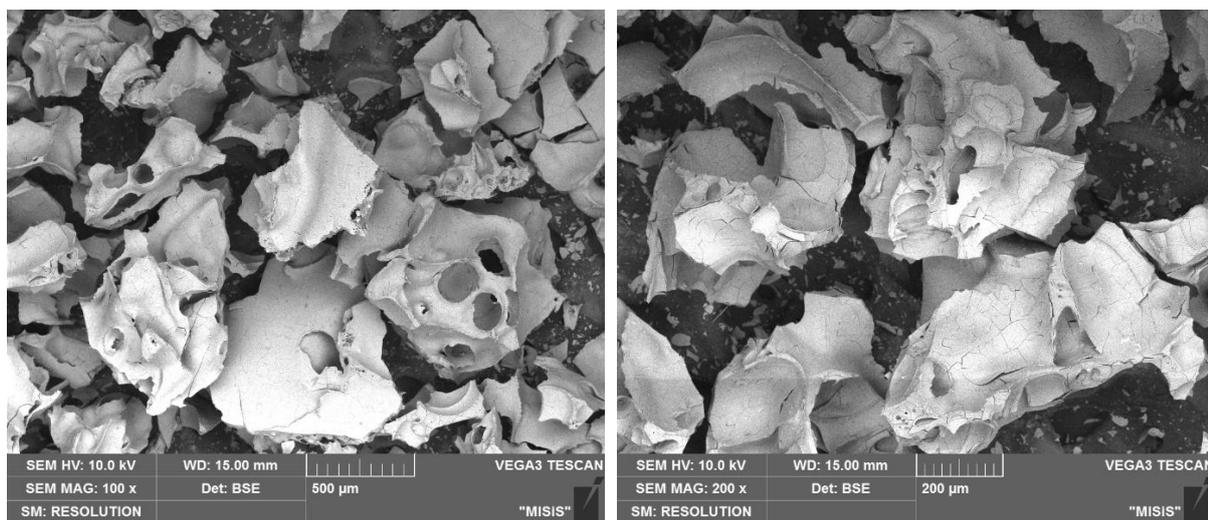


Fig. 9 – The EPMA analysis of the amorphous Fe₂O₃

Table 9 – The EPMA analysis of the amorphous Fe₂O₃

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Fe, %	Total, %
S 1	0	0	64,49	35,51	100
S 2	0	0	77,95	22,05	100
S 3	0	0	67,51	32,49	100

Comparing these two samples, the sample taken after sintering at 150°C was not completely amorphous. This sample, as previously stated and as seen from the XRD data (Fig. 6a), had inclusions of small crystallites, in comparison with the sample taken after drying (Fig. 6b). It can be concluded that to obtain an amorphous structure of iron oxide (III), sintering can be carried out at low temperatures, which was fundamentally different from the synthesis of Al₂O₃. It can be seen that to achieve the desired result, just a long drying period of several hours was enough.

Thermal decomposition of the corresponding nitrate:

The XRD analysis data showed that the compound isolated after the thermal decomposition of the iron salt using an electron oven at 100 °C had inclusions of large crystallites 21 (Fig. 10). From the EPMA data, the substance was pure and had large crystals in its composition (Fig. 11, Table 10).

The residual amount of nitrogen and carbon compounds was not detected.

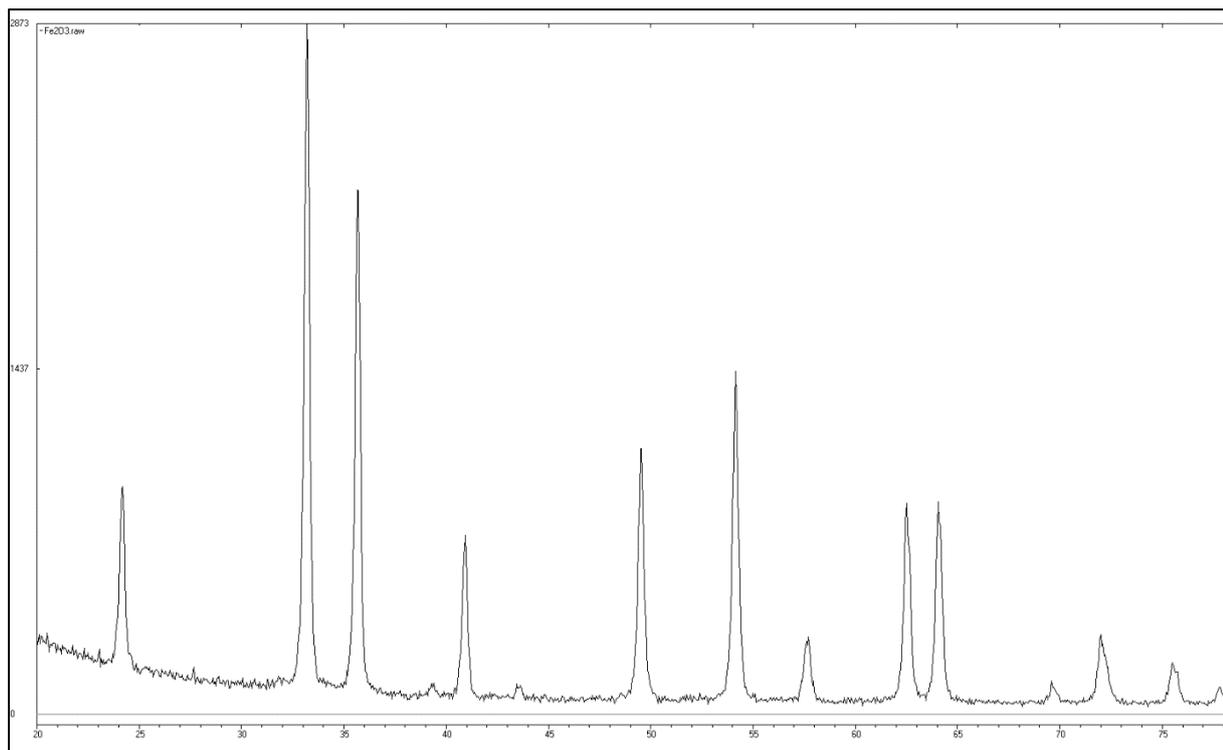
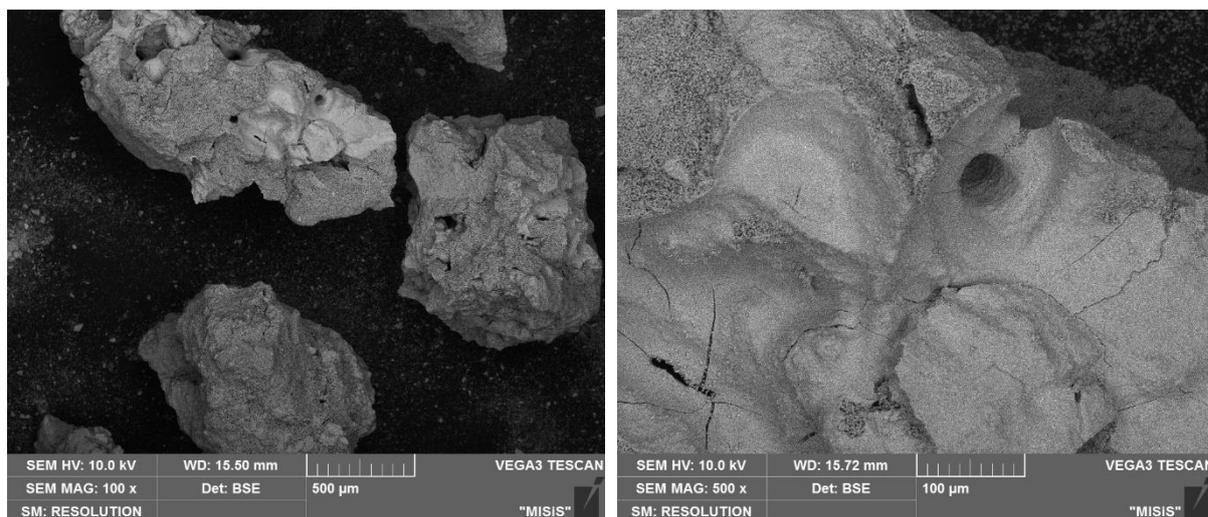


Fig. 10 – The XRD data of the iron oxide obtained by thermal decomposition

Fig. 11 – The EPMA analysis of the Fe₂O₃ obtained by thermal decompositionTable 10 – The EPMA analysis of the Fe₂O₃ obtained by thermal decomposition

Spectrum Label	N, %	C, %	O, %	Fe, %	Total, %
S 1	0	0	61,13	38,87	100
S 2	0	0	60,71	39,29	100
S 3	0	0	20,07	79,93	100

3.2. EBSD

The objects of research were cylindrical samples, which were obtained by pressing at a pressure of 100 MPa powder of oxides Al₂O₃ and Fe₂O₃ with a diameter of 4-5 mm and a height of 7 mm with plane-parallel surfaces. The sections were prepared using the Struers Labopol-5 system. Further, the samples were pressed into a polystyrene polymer, the surface was ground on sandpaper of different grain sizes (220, 320, 800, 1200, 2400, 4000), then polished on a water-alcohol suspension of SiO₂.

The samples were investigated using the method of automatic analysis of backscattered electron diffraction (EBSD) patterns on a TESCAN VEGA LMH scanning electron microscope with a LaB6 cathode (SEM) with an Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy X-ray energy dispersive microanalysis system and an EBSD NordLysMax2 Oxford Instruments attachment with the AZtec version 3.5 software. Various databases were used to identify materials and phases: the Oxford Instruments database of pure elements and organic substances, the NIST database of phases and elements. Scanning was carried out with a step of 0.1 μm.

The essence of the method is: a sample tilted at an angle of 70° was placed in a microscope chamber. The electron beam was focused on the sample surface and interacts with the sample atoms. An angle of 70° allowed to increase the number of reflected electrons, because in this case, the region of interaction of the beam electrons with the sample will be located closer to the surface, which increased the possibility of electrons escaping from the sample. The backscattered electron detector captured these electrons, which provided information about the intensity of the backscattering of electrons in different areas of the sample surface. Some of the reflected electrons are diffracted from different areas of the crystal in accordance with the Wolfe-Bragg law ($n\lambda=2d\sin\theta$, where θ - the angle between the incident electron of the beam and the plane from which it was reflected) and form the diffraction pattern of the Kikuchi line. A Kikuchi line is a pair of parallel lines caused by diffraction of reflected electrons from one specific area of the crystal lattice. Diffraction from all atomic areas set of Kikuchi lines (called the diffraction pattern) on the phosphor screen.

Automatic indexing used the Mean Angular Deviation (MAD), it meant the quality of the solution. The smaller the number, the better the match between the detected Kikuchi bands and the simulated phase lines. According to the accepted phase identification rules, an SDD value less than 1 indicates a good match. The work used the OMS coefficient < 0.35.

In all samples, diffraction patterns (Kikuchi lines) and any textures were not detected, which indicates the absence of a crystal lattice and confirms amorphousness.

3.3. Thermal stability of amorphous oxides

The temperatures of recrystallization (deamorphization) of the oxides depending on the heating rate were determined by differential scanning calorimetry to evaluate the thermal stability of the obtained amorphous oxides.

3.3.1. Al₂O₃

Recrystallization (de-amorphization) temperature

DSC heating curves of amorphous Al₂O₃ obtained by the modified sol-gel method, measured at heating rates of 5, 10, 15, and 20 K/min, respectively, are shown in Figure 12. No other peaks associated with phase transformations on heating up to 1100 °C and on subsequent cooling were observed.

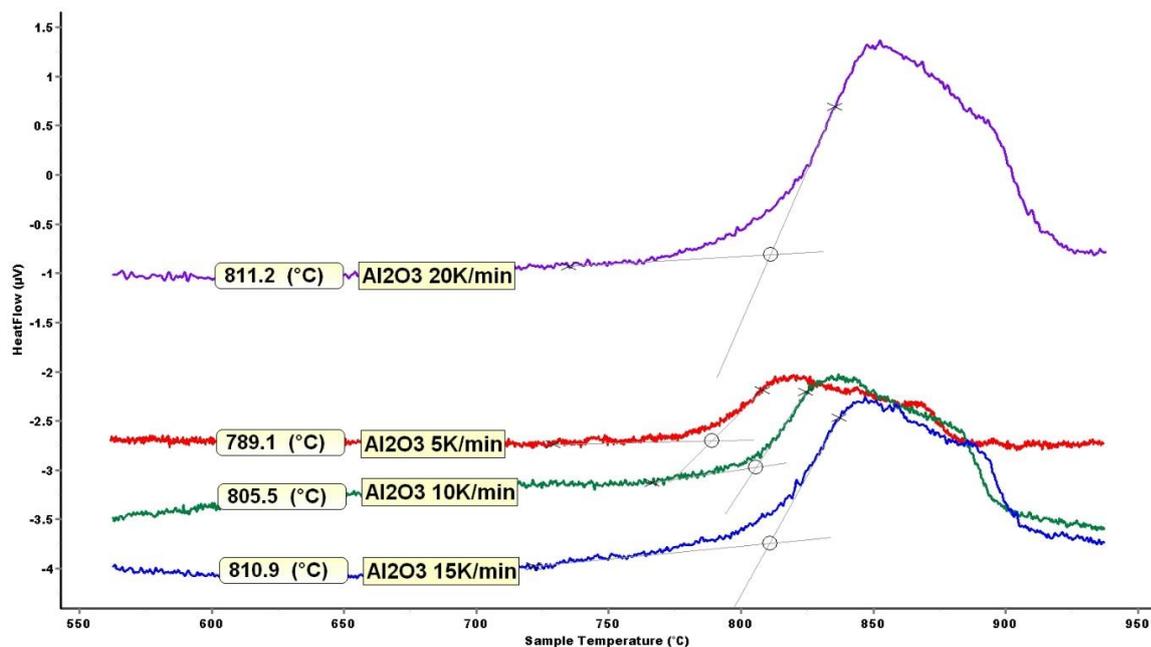


Fig. 12 – DSC heating curves of amorphous Al_2O_3 obtained at different heating rates

The dependence of the crystallization onset temperature on the heating rate was shown in Figure 13. It can be seen that the recrystallisation temperature increased monotonically from 789.1 °C (heating rate 5 K/min) up to 811.2 °C (heating rate 20 K/min). Apparently, it would not change with further increasing of heating rate.

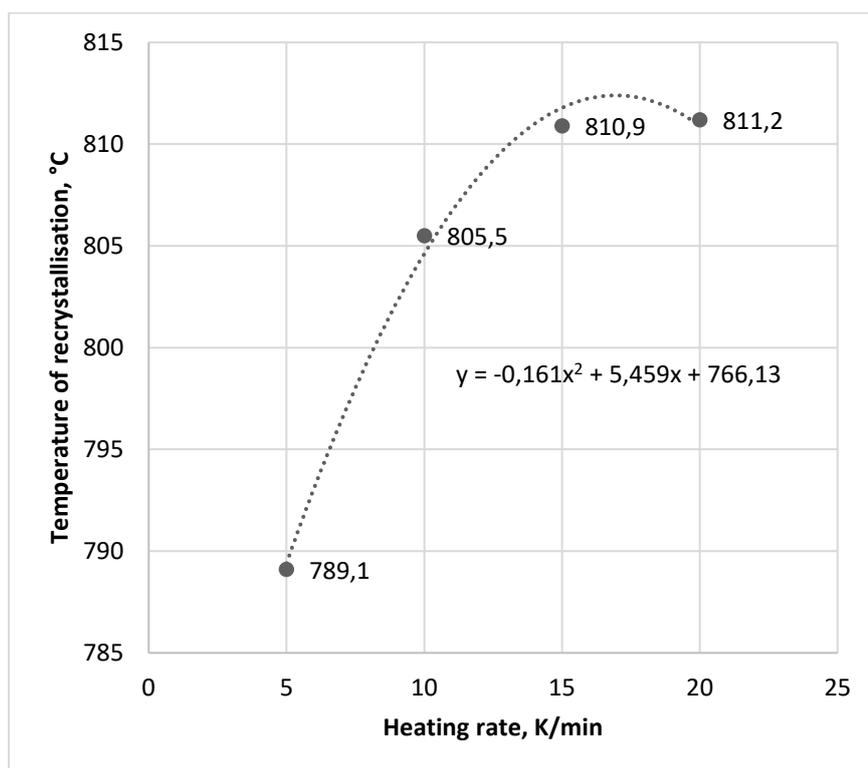


Fig. 13 – Temperature of recrystallization (de-amorphization) of aluminum oxide against the heating rate

Proof of the crystallinity of the structure

The heating the sample to an appropriate temperature above the recrystallization temperature was investigated. The XRD spectrum data of Al_2O_3 after heating in an oven over 815 °C and holding for about 60 minutes was shown in Fig. 14. It can be seen that the peaks obtained mainly corresponded to the Al_2O_3 , but broader and more distorted than for those of a crystalline substance. It was also possible that an insignificant amount of another crystalline phase was presented in the XRD spectrum data.

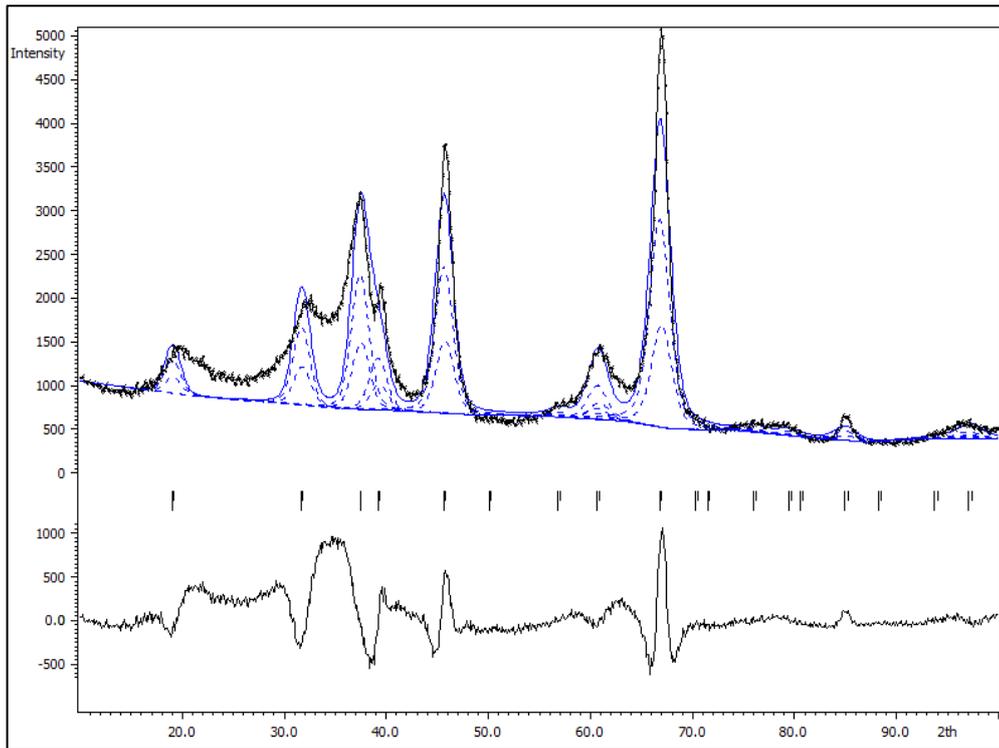


Fig. 14 – XRD spectrum of Al_2O_3 after heating in an oven over $815\text{ }^\circ\text{C}$

3.3.2. Fe_2O_3

Recrystallization (de-amorphization) temperature

Thermal stability of amorphous Fe_2O_3 was also investigated using DSC method. DSC heating curves of amorphous Fe_2O_3 obtained by the modified sol-gel method, measured at heating rates of 1, 5 and 10 K/min, respectively, are shown in Figure 15. No other peaks associated with phase transformations on heating up to $250\text{ }^\circ\text{C}$ and on subsequent cooling were observed.

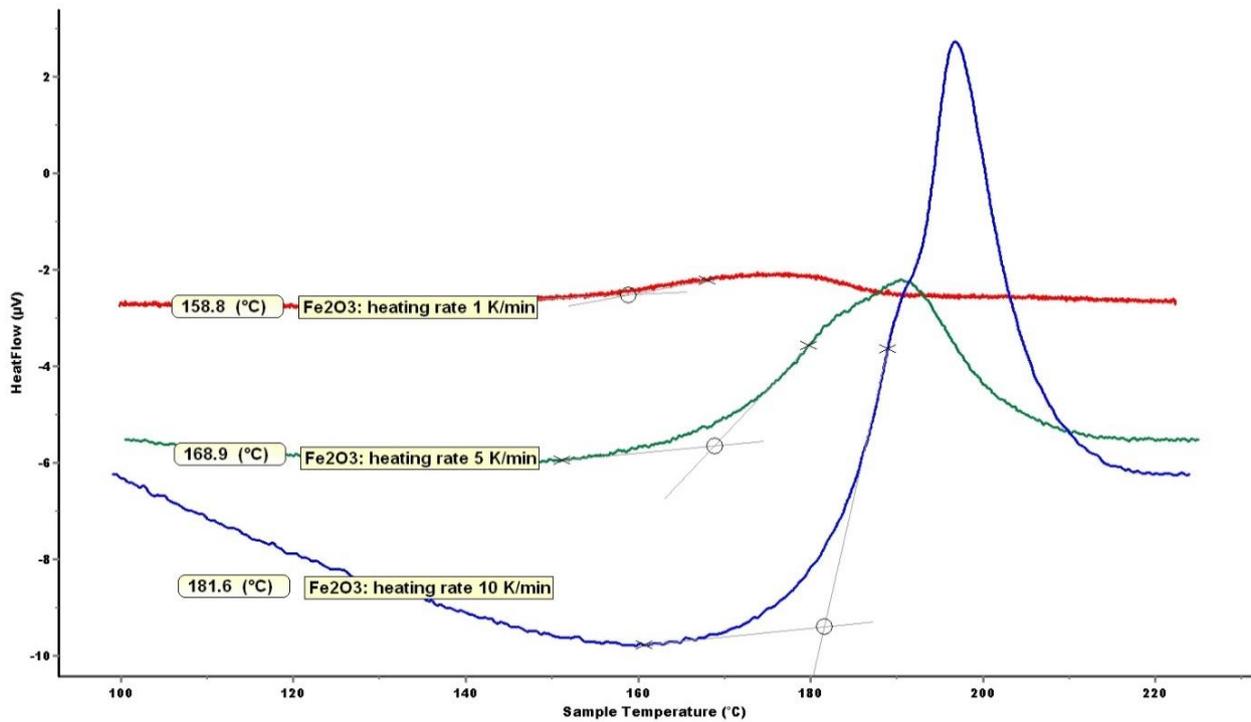


Fig. 15 – DSC heating curves of amorphous Fe_2O_3 obtained at different heating rates

The dependence of the crystallization onset temperature on the heating rate was shown in Figure 16. The recrystallization temperature increased with the heating rate linearly.

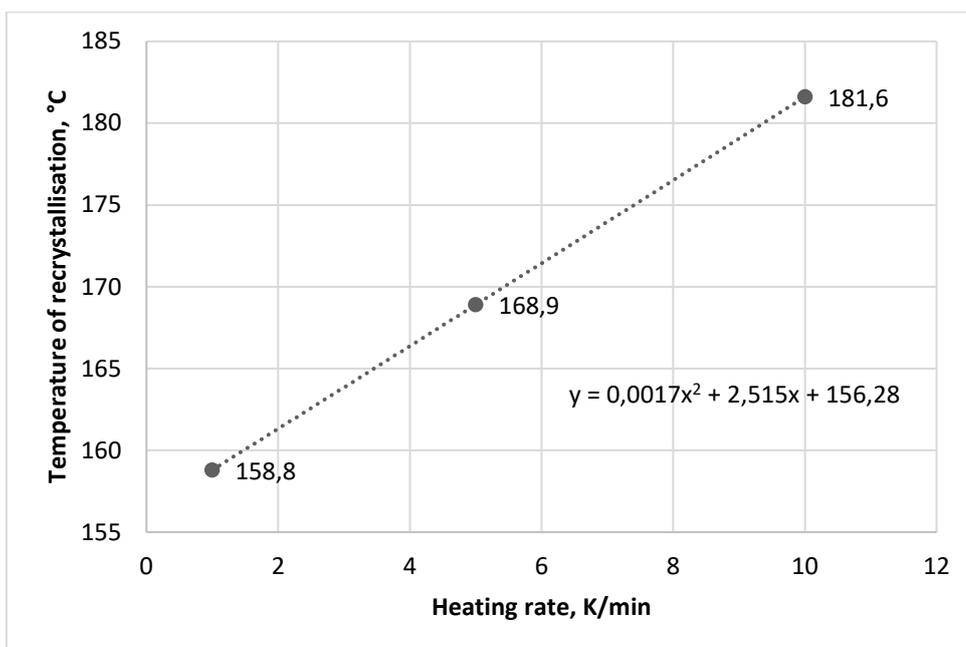


Fig. 16 – Temperature of recrystallization (de-amorphization) of iron (III) oxide against the heating rate

Proof of the crystallinity of the structure

The reliability of the obtained crystalline Fe_2O_3 was analyzed using the XRD data of the sample, after heating it to a temperature above the recrystallization temperature and holding for about 30 minutes. The confirmation of the crystal structure of the obtained sample can be seen in Figure 17, which was a crystalline Fe_2O_3 (hematite structure).

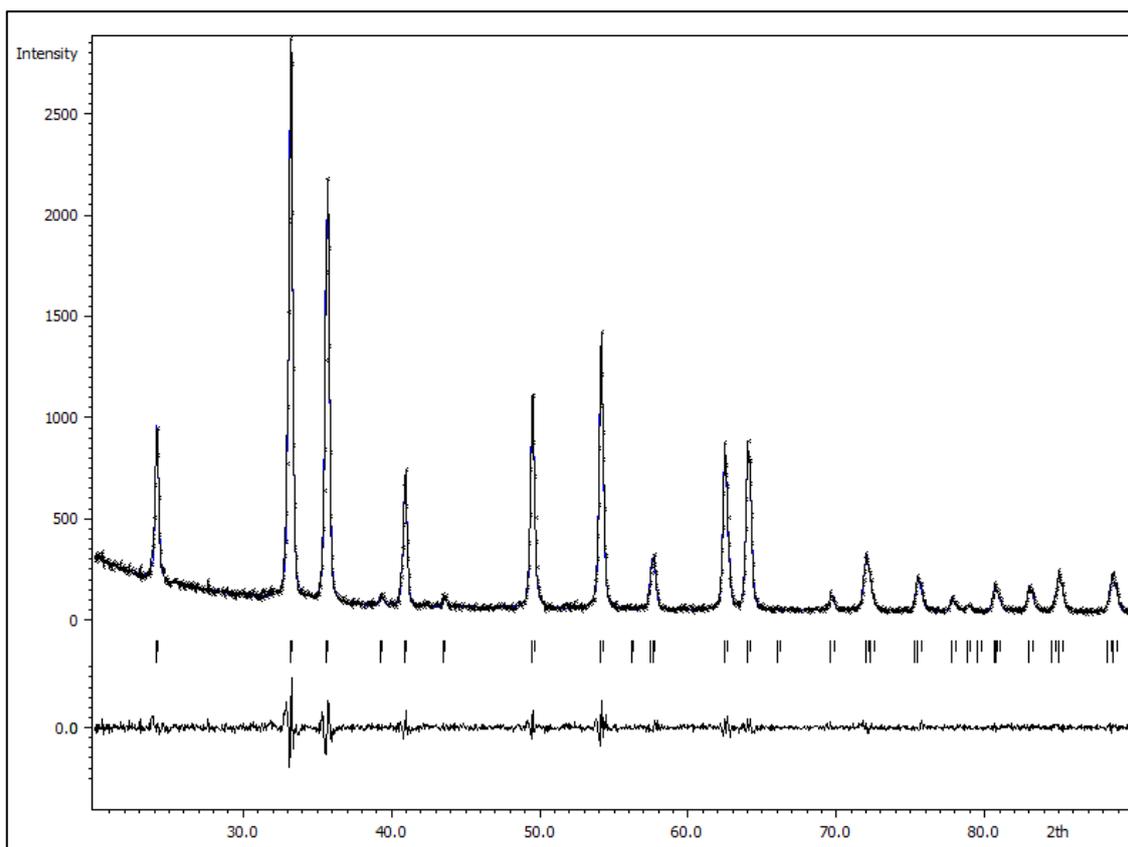


Fig. 17 – XRD spectrum of Fe_2O_3 after heating in an oven over 200 °C

3.4. The enthalpy of fusion (or crystallization)

This test method was applicable to solid samples in granular form and described the determination of the enthalpy (heat) of fusion (melting) and crystallization by differential scanning calorimetry (DSC) 22.

Using the thermal curve, can be constructed a baseline on the differential heat flow curve by connecting the two points at which the melting endotherm deviated from the baseline before and after the melt (Fig. 12 and Fig. 15). After this area can be integrated as a function of time to achieve the melting endothermic peak area in mJ 23.

The experimental calibration coefficient at the melting temperature of the standard reference material can be calculated as:

$$E = (H \cdot m) / (A) \quad (1)$$

where:

E – calibration coefficient at the temperature of the melting endotherm,

H – enthalpy of fusion of the standard material, in J/g or (mJ/g),

m – mass of the standard, in g, and

A – melting endotherm peak area, in mJ.

$$H = E \cdot H_o / W \quad (2)$$

where:

H – enthalpy of fusion (or crystallization) of the sample in kJ/mol,

W – mass of the specimen, mg,

E – Calibration constant from (1),

H_o – observed enthalpy of fusion (or crystallization), mJ.

3.4.1. Al₂O₃

The standard reference material for aluminum oxide was Ag measured at 5 K/min. It was chosen based on the similarity between the melting point of silver and the recrystallization temperature of amorphous Al₂O₃.

According to (1), the calibration coefficient at the temperature of the melting endotherm can be calculated (Table 11):

Table 11 – The calibration coefficient at the temperature of the melting endotherm data of Al₂O₃

E	H, mJ/g	m, g	A, mJ
105 681,93	104,8e+6 24	0,01414	14,022

According to (2), the enthalpy of fusion (or crystallization) of the sample can be calculated (Table 12):

Table 12 – The enthalpy of fusion (or crystallization) data of Al₂O₃

H, kJ/mol	E	H _o , mJ	W, mg
-15,02	105 683,93	-26,944	19,33

The enthalpy of fusion (crystallization) of amorphous Al₂O₃, according to calculations, is -15.02 kJ/mol. For example, this value was studied earlier for the gamma modification by Qiyuan and is -26.78 ± 0.41 kJ/mol 25.

3.4.2. Fe₂O₃

Similarly, the standard reference material for iron oxide (III) was In measured at 5 K/min. It was chosen based on the similarity between the melting point of indium and the recrystallization temperature of amorphous Fe₂O₃.

According to (1), the calibration coefficient at the temperature of the melting endotherm can be calculated (Table 13):

Table 13 – The calibration coefficient at the temperature of the melting endotherm data of Fe₂O₃

E	H, mJ/g	m, g	A, mJ
146 199,19	28,51e+6 26	0,03786	7,383

According to (2), the enthalpy of fusion (or crystallization) of the sample can be calculated (Table 14):

Table 14 – The enthalpy of fusion (or crystallization) data of Fe₂O₃

H, kJ/mol	E	H _o , mJ	W, mg
-59,84	146 199,19	-46,644	18,2

The enthalpy of fusion (crystallization) of amorphous Fe₂O₃, according to calculations, is -59.84 kJ/mol.

3.5. Heat capacity

Based on the sensitivity of the device and the ability to measure heat capacity data only at high temperatures, amorphous alumina was selected as the object of this study. The data of the high-temperature heat capacity of amorphous alumina were compared with the literature data of the high-temperature heat capacity of gamma oxide by Qiyuan 25 and NIST data 27.

According to Qiyuan the relationship between the heat capacity of γ-Al₂O₃ and temperature could be expressed as

$$C_p = 115.25 + 19.53 \times 10^{-3}T - 33.81 \times 10^{-5}T^{-2} \text{ in the range } 298.15 - 1000 \text{ K } 25.$$

Or, based on the NIST data, the heat capacities of alumina phases can be calculated using

$C_p = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + E/t^2$, where C_p – heat capacity (J/mol*K) and t – temperature (K)/1000, in a wide range of temperatures.

As expected, the plot of heat capacity versus temperature had an increasing character (Fig. 18).

On the plot of the heat capacity versus temperature was shown that the measurements were started in the range of 450 - 500 K. This phenomenon was associated with the low sensitivity of the device and the ability to display heat capacity data starting from about 473 K.

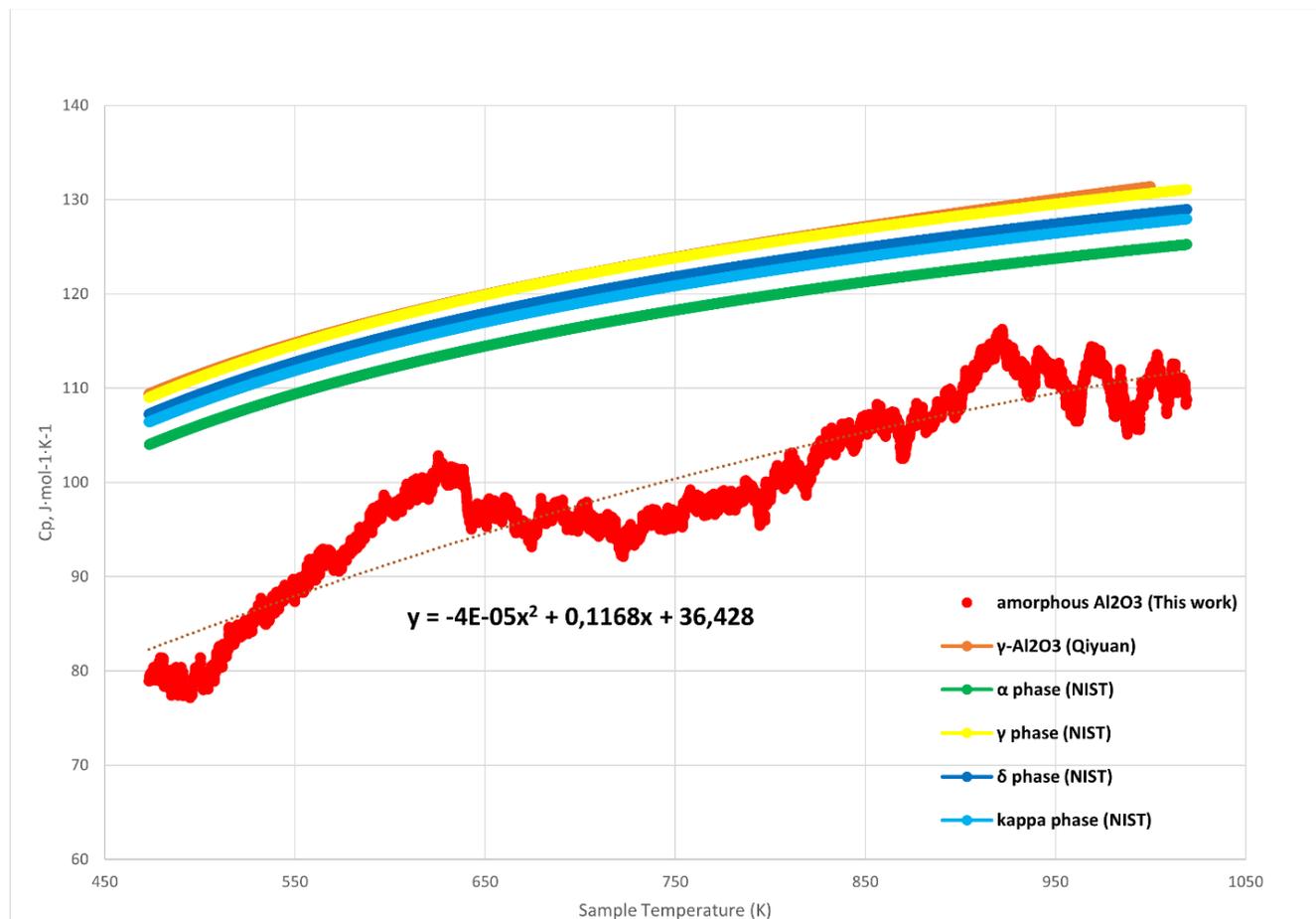


Fig. 18 – Heat capacity of amorphous Al_2O_3 compared to literature data

4. Conclusion

In the present paper the amorphous structures of amphoteric oxides Al_2O_3 and Fe_2O_3 obtained the modified sol-gel method were investigated. It should be noted that the modified sol-gel method had a small number of stages, which also significantly reduced the synthesis time. It was shown that for Al_2O_3 , in addition to the expected amorphous structure, the γ -modification can also be obtained. And as a result of obtaining Fe_2O_3 , it turned out that it can be synthesized at significantly lower temperatures.

Thermal stability of the amorphous oxides was studied using the DSC method. It was found that amorphous Al_2O_3 is stable up to 790 – 810 °C, while amorphous Fe_2O_3 recrystallizes at ~ 160 – 180 °C. The dependence of the phase transition temperature on the heating rate of the samples was carried out, which had a linear character. Based on XRD data, the reliability of this experiment was proved by investigating the oxides obtained after the transition. As expected, the dependence of heat capacity on temperature, measured in the range 473 – 1050 K, had an increasing character.

Финансирование

Авторы выражают признательность за финансовую поддержку Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» (№02-2020-036), реализуемой Постановлением Правительства N 211 от 16 марта 2013 года.

Funding

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the Increase Competitiveness Program of NUST «MISIS» (№K2-2020-036), implemented by the Governmental Decree N 211 dated March 16, 2013.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Enhancement of Ce/Cr Codopant Solubility and Chemical Homogeneity in TiO_2 Nanoparticles through Sol–Gel versus Pechini Syntheses / W. Chen, et al. // *Inorganic Chemistry*. – 2018. – Vol. 57 (12). – pp. 7279–7289.

2. The Chemistry of Metal Alkoxides / N. Turova, E. Turevskaya, V. Kessler et al. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
3. Rabinovich V. Brief Chemical Handbook / V. Rabinovich, Z. Khavin. – Chemistry. 3rd ed., 1991.
4. Kotov Y. Characteristics of aluminum oxide nanopowders obtained by the method of electric explosion of wire / Y. Kotov // Russian Nano Technologies. – 2007. – Vol. 2 (7–8). – pp. 109–115.
5. "Corundum". Handbook of Mineralogy. III Halides, Hydroxides, Oxides / J. Anthony, R. Bideaux, K. Bladh et al. – US: Mineralogical Society of America, 1997.
6. The Geology and Genesis of Gem Corundum Deposits, Gem Corundum / G. Giuliani, D. Ohnenstetter, A. Fallick, et al. – Research Gate: Mineralogical Association of Canada, 2014. – 37-38 p.
7. Paglia G. Determination of the Structure of γ -Alumina using Empirical and First Principles Calculations Combined with Supporting Experiments / G. Paglia. – Curtin University of Technology, 2004.
8. Levin I. Metastable Alumina Polymorphs: Crystal Structures and Transition Sequences / I. Levin, D. Brandon // Journal of the American Ceramic Society. – 1998. – Vol. 81 (8). – pp. 1995–2012.
9. Kurt J. SDS of Iron (III) oxide / J. Kurt. – KJLC, 2014.
10. Greedan J. Magnetic oxides, Encyclopedia of Inorganic chemistry / J. Greedan. – 1994.
11. Elliott S. Medium-range structural order in covalent amorphous solids / S. Elliott // Nature. – 1991. – Vol. 354 (6353). – pp. 445–452.
12. Chemical properties of inorganic substances / R. Lidin, V. Molochko, L. Andreeva. – Chemistry, 2000. 480 p.
13. Knunyants I. Chemical encyclopedic dictionary Soviet Encyclopedia / I. Knunyants. – 1983. – 200 p.
14. Cui H. Structure switch between α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ during the large scale and low temperature sol-gel synthesis of nearly monodispersed iron oxide nanoparticles / H. Cui, Y. Liu, W. Ren // Advanced Powder Technology. – 2013. – Vol. 24. – pp. 93-97.
15. Ztec A. Oxford Instruments Nanotechnology Tools Limited / A. Ztec. – 2010-2015. – 860 p.
16. Kraus W. POWDERCELL, Rev. 1.8a / W. Kraus, G. Nolze. – Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), 1996.
17. National bureau of standards. Standard Material 720. Synthetic Sapphire (α -Al₂O₃). – 1982.
18. Tetelbaum D. Properties of Al₂O₃: *nc*-Si nanostructures formed by ion implantation of silicon into sapphire and amorphous aluminum oxide films / D. Tetelbaum, A. Mikhailov, A. Belov // Solid State Physics. – 2009. – Vol. 51 (2). – pp. 385-392.
19. Zhou R. Structures and transformation mechanisms of the η , γ and θ transition aluminas / R. Zhou, R. Snyder // Acta Crystallographica. – 1991. – Vol. B47. – pp. 617–630.
20. Housecroft C. Chapter 22: d-block metal chemistry: the first-row elements / C. Housecroft, A. Sharpe. // Inorganic Chemistry. – 3rd ed. – 2008. – 716 p.
21. Ultrafine Particles of Iron (III) Oxides by View of AFM – Novel Route for Study of Polymorphism in Nano-world / M. Vujtek, R. Zboril, R. Kubinek et al. – Departments of Experimental Physics, Inorganic, and Physical Chemistry: Palacky University, 2014.
22. Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization by Differential Scanning Calorimetry. – 2012.
23. Standard Practice for Heat Flow Calibration of Differential Scanning Calorimeters. – 2014.
24. Emsley J. The elements, 3rd edition / J. Emsley. – Oxford Press: Oxford, 1998.
25. Investigation of the thermodynamic properties of γ -Al₂O₃ / C. Qiyuan, Z. Wenming, C. Xinmin et al. // Thermochemica Acta. – 1995. – Vol. 253. – pp. 33–39.
26. Values from National Institute of Standards and Technology (NIST). USA.
27. Chase M. W. Jr. NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition / M. W. Jr. Chase // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1998. – Monograph 9. – pp. 1-1951.