

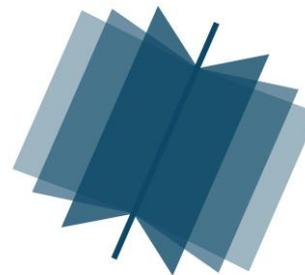
№ 12 (114) ▪ 2021
Часть 1 ▪ Декабрь

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЖУРНАЛ**

INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL

ISSN 2227-6017 ONLINE

Екатеринбург
2021



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

**№ 12 (114) 2021
Часть 1
Декабрь**

Дата выхода 17.12.2021
Цена: бесплатно.

Журнал имеет свободный доступ, это означает, что статьи можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии 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

Ганичева А.В., Ганичев А.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ПОРТРЕТОВ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ И ОБУЧАЕМЫХ	6
Короткий А.И., Цепелев И.А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАВОВЫХ ПОТОКОВ В МОДЕЛЯХ ИЗОТЕРМАЛЬНОЙ ВЯЗКОЙ МНОГОФАЗНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ.....	12
Тормосов Е.А. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛОВ РИМАНА С ПОМОЩЬЮ АСИМПТОТИЧЕСКИХ МНОГОЧЛЕНОВ, ОСНОВАННЫХ НА ПОЛИНОМАХ ЧЕБЫШЕВА ПЕРВОГО РОДА. ПРОГРАММА НА БАЗЕ MICROSOFT EXCEL.....	19
Трубаев Н.А. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОТЕНЦИАЛА В ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКЕ	28
Хамхоев Б.М., Торшхоева З.С., Арчакова Р., Ужахова Л.Я., Евлоев А.В., Ажигогова А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛА TlGaSe ₂	37

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Аббасов И.Б., Дешмух Р.Р. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ	43
Желанкин В.Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО УРОВНЯ РИСКА АВАРИИ ДАМБЫ ЗОЛОШЛАКОУТВАЛА ПО УСЛОВИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И ПОДХОД К НАЗНАЧЕНИЮ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ.....	50
Зеньков Е.В. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ЦЕЛЬНОКАТАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА.....	57
Ильичева Ю.В., Лизункова О.В., Холоденина Т.С. ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РОТАЦИОННОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА И СЕМЯН.....	64
Рахаев А.В., Шишков Е.М. МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА КОРОННЫЙ РАЗРЯД.....	68
Руднев Б.И., Повалихина О.В. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ САЖИ И ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ.....	74
Терюкалова Н.В., Новицкая О.С., Сизова О.В. МИКРОСТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ CrN-TiN	81
Титова Ю.В., Белова Г.С., Минеханова А.Ф., Майдан Д.А., Амосов А.П. САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПОРОШКОВОЙ НИТРИДНО-КАРБИДНОЙ КОМПОЗИЦИИ TiN-SiC ПРИ ГОРЕНИИ СИСТЕМЫ «Si-Ti-NaN ₃ -(NH ₄) ₂ SiF ₆ -C»	86
Федосеева В.П., Сайкин М.С. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИЙ	92
Федотов В.А., Берестова А.В. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВЫПЕЧКИ ХЛЕБА И МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ	102
Федотов В.А., Соловых С.Ю. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ВЫПЕЧКИ ХЛЕБА	105
Федотова А.Д., Крукович М.Г. ПРЕДИКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ФАЗ АЗОТИРОВАННЫХ СЛОЕВ	108

АРХИТЕКТУРА / ARCHITECTURE

Сазыкина Е.В. «КЛАСТЕР» КАК НОВАЯ ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ ФОРМА АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	114
---	-----

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ / AGRICULTURAL SCIENCES

Арьков Д.П., Сухов А.А., Никифорова Д.Н., Антясова Е.А., Жихарев А.Г. КОНСТРУИРОВАНИЕ ПЛИТ ДЛЯ ОБЛИЦОВКИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ.....	119
Бакай Ф.Р., Лепёхина Т.В., Кровикова А.Н. ОЦЕНКА ГЕНЕТИЧЕСКОГО И РЕПРОДУКТИВНОГО РИСКА КОРОВ ГОЛШТИНСКОЙ ПОРОДЫ	124
Куколева С.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА В СЕЛЕКЦИИ СУДАНСКОЙ ТРАВЫ	129
Ленченко С.О., Львов Ю.Б. ДИНАМИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДЫ УЗВ ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОМ ВЫРАЩИВАНИИ РЫБЫ И РАСТЕНИЙ.....	134
Мухтарова О.М. ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИ ПОДБОРА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ КОРОВ	137
Плаксина В.С., Пронудин К.А., Асташов А.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ.....	142
Погост А.А., Лошакова П.О., Клименков Ф.И., Клименкова И.Н. НОВЫЕ ЯРОВЫЕ ПШЕНИЧНО-ПЫРЕЙНЫЕ ГИБРИДЫ, СОЗДАННЫЕ В ОТДЕЛЕ ОТДАЛЕННОЙ ГИБРИДИЗАЦИИ ГЛАВНОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА ИМ. Н.В. ЦИЦИНА РАН.....	147
Симеониди Д.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЗОН НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ.....	153
Симоненко Е.С., Симоненко С.В., Хованова Ю.С. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОДУКТОВ ДИЕТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕБНОГО И ДИЕТИЧЕСКОГО ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ	157
Симоненко С.В., Мануйлов Б.М., Антипова Т.А., Симоненко Е.С., Копытко М.С. РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУР СУХИХ НАПИТКОВ С L-АРГИНИНОМ ДЛЯ ДЕТСКОГО ПИТАНИЯ	162
Степанченко Д.А., Куколева С.С., Старчак В.И., Кибальник О.П., Ефремова И.Г. ВЛИЯНИЕ ХЕЛАТНЫХ МИКРОУДОБРЕНИЙ НА ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА СЕМЯН СОРТОВ ЗЕРНОВОГО СОРГО	168

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / CHEMISTRY

Азадалиева С.Ф., Джафаров М.М., Гусейнова С.И., Ганбаров Х.Г. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ AgNO ₃ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ШТАММОМ ДРОЖЖЕВОГО ГРИБА <i>SACCHAROMYCES ELLIPSOIDEUS</i> BDU – XR1	174
Кузнецова Н.С. СИНТЕЗ, ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГИДРОКСИАМИНОКИСЛОТ С ИОНАМИ МЕДИ	180
Пасюков Д.В., Новикова Д.А., Андреева А.Н., Шумская И.Ю. СИНТЕЗ N – ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЛИГАНДОВ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ЛИГАНДЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	184
Токтабаева З.К., Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Фахруденова И.Б. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ Г. КОКШЕТАУ АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ.....	189

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHARMACEUTICS

Тихомирова Т.И., Андреева О.А., Червонная Н.М., Аджахметова С.Л., Лигай Л.В. АНТИОКСИДАНТЫ ЛИСТЬЕВ ИРГИ КРУГЛОЛИСТНОЙ	193
--	-----

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.189>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ПОРТРЕТОВ
ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ И ОБУЧАЕМЫХ**

Научная статья

Ганичева А.В.¹, Ганичев А.В.^{2,*}

¹ ORCID: 0000-0002-0224-8945;

² ORCID: 0000-0003-3389-7582;

¹ Тверская государственная сельскохозяйственная академия, Тверь, Россия;

² Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия,

* Корреспондирующий автор (alexey.ganichev[at]yandex.ru)

Аннотация

Внедрение цифровых методов в образовательный процесс делает актуальным использование математических методов и моделей. Важной проблемой является математическое описание характеристик обучаемых и преподавателей, которые образуют их психолого-педагогические портреты. В качестве моделей портретов выбраны их векторные характеристики и матричное представление. Для математического согласования цифровых портретов при векторном описании предлагается применять величину их скалярного произведения. Разработан метод, позволяющий найти пропорции элементов структурной матрицы портретов, при которых будут сбалансированы характеристики преподавателей и обучаемых в данном учебном коллективе. Метод основан на анализе значения собственного числа структурной матрицы модели.

Ключевые слова: эксперт, векторный портрет, скалярное произведение, структурная матрица, вектор, собственное число матрицы.

MODELING OF PSYCHOLOGICAL AND PEDAGOGICAL PORTRAITS OF TEACHERS AND STUDENTS

Research article

Ganicheva A.V.¹, Ganichev A.V.^{2,*}

¹ ORCID: 0000-0002-0224-8945;

² ORCID: 0000-0003-3389-7582;

¹ Tver State Agricultural Academy, Tver, Russia;

² Tver State Technical University, Tver, Russia

* Corresponding author (alexey.ganichev[at]yandex.ru)

Abstract

The introduction of digital methods into the educational process makes the use of mathematical methods and models relevant. The mathematical description of the characteristics of students and teachers who form their psychological and pedagogical portraits is an important problem. Their vector characteristics and matrix representation are chosen as portrait models. For mathematical matching of digital portraits with vector description, it is proposed to apply the magnitude of their scalar product. The article introduces a method of finding the proportions of the elements of the structural matrix of portraits, in which the characteristics of teachers and students in this educational team will be balanced. The method is based on the analysis of the eigenvalue of the structural matrix of the model.

Keywords: expert, vector portrait, scalar product, structural matrix, vector, matrix eigenvalue.

Введение

Проблема составления психологических портретов является очень важной во многих сферах жизни общества. Эта проблема является очень актуальной для учебных заведений. В учебных заведениях для разработки психологических портретов обучаемых и психолого-педагогических портретов преподавателей используют в настоящее время преимущественно два метода: тестирование и анкетирование. Следует отметить, что заполнять и обрабатывать анкеты и тесты вручную крайне трудоемко и неэффективно. Программные продукты используют для обработки результатов этих анкетирования и тестирования, при этом применяются, в основном, статистические методы. Использование для решения данной проблемы преимущественно мнения экспертов-психологов вносит в формируемые портреты элемент субъективизма, а это может быть и предвзятость суждений. Поэтому разработка новых методов автоматизации процессов создания психологических портретов является важной и актуальной задачей.

Для повышения эффективности учебного процесса следует учитывать при его планировании, организации и управлении особенности и характерные качества, как преподавателей, так и типологию личности обучаемых.

Важнейшие черты современных студентов (ответственность, мотивация к процессу, результату обучения, успеху), полученные методом тестирования, рассмотрены в статье [1]. В работе [2] приведены социально-психологический портреты современного студенчества, полученный методом анкетирования. Психолого-педагогический, социально-типический портреты современного преподавателя ВУЗа представлены, соответственно, в статьях [3], [4]. Инструментарий составления портретов – анкетирование и опрос. Интересным вопросом является представление студентов о современном преподавателе вуза [5], в том числе о идеальном преподавателе [6]. Рассматриваются личностные качества и социально-профессиональные компетенции. Важной проблемой является организация взаимодействия участников образовательного процесса для повышения эффективности подготовки студентов [7]. Для решения данной проблемы следует построить математические модели согласования основных качеств субъектов

учебного процесса. В работе [8] предложен метод количественной оценки качеств преподавателей и обучаемых с помощью теории нечетких множеств. В статье [9] разработана модель согласования портретов преподавателей и обучаемых. В [10] для определения степени согласования интересов индивидуумов используется аппарат теории формальных грамматик, а в [11] - методы теории многоуровневых иерархических систем.

Данные о численной оценке качеств преподавателей и студентов, наиболее значимых для их эффективного взаимодействия, приведены в работе [12]. Эти данные получены на основе анкетирования 408 студентов и 144 преподавателей и аспирантов региональных вузов.

Большое внимание взаимодействию преподавателей и обучаемых уделяется за рубежом. Эта область исследований считается новой, важной и относительно мало исследованной [13]. Обзор основных проблем и достижений зарубежных ученых по данной проблеме изложен в работе [14]. Особенности и роль личности преподавателя в образовательном процессе рассмотрены в исследовании [15].

Количественные оценки взаимодействия преподавателей и обучаемых в разнообразных условиях динамичного учебного процесса могут быть получены методом математического моделирования, но в настоящее время эта проблема еще недостаточно изучена.

Целью данной работы является разработка методов и моделей согласования портретов преподавателей и обучаемых. Для решения этой задачи применяется аппарат векторного описания характеристик портрета и его матричное представление.

Методы и принципы исследования

1. Векторные характеристики портрета

Можно выделить основные качества преподавателей: компетентность, умение объяснять материал, честность, объективность, трудолюбие, культура общения и т.д. К характеристикам обучаемых относятся: интеллектуальность, эрудированность, креативность, трудолюбие, дисциплинированность, способность к самооценке и т.д.

Качества преподавателей и обучаемых оцениваются путем тестирования, анкетирования, оценок экспертов. В роли экспертов выступают преподаватели, обучающиеся, психологическая служба, руководство учебной организации.

С помощью метода экспертных оценок формируются коллективные оценки качеств преподавателей (Π) и учащихся (\mathcal{V}).

В соответствии с определенными шкалами согласно вопросам анкетирования данного Π с учетом мнения данного \mathcal{V} и аналогично анкетирования данного \mathcal{V} с учетом мнения данного Π составляются векторы $\alpha(\Pi)$ и $\alpha(\mathcal{V})$. Координаты $\alpha(\Pi)$ представляют собой численное выражение (оценку) качеств данного Π данным \mathcal{V} . Аналогично вектор $\alpha(\mathcal{V})$ дает численную оценку качеств данного \mathcal{V} в восприятии данного Π .

Векторные портреты Π и \mathcal{V} можно сравнивать с эталонными портретами (векторами нормы). Координаты этих векторов рассматриваются, например, как средние арифметические мнения всех учащихся и сотрудников данного учебного заведения относительно того, как они оценивают качества Π и \mathcal{V} . В качестве эталонных координат можно также полагать максимальные значения шкалы оценивания. В случае совпадения длин векторов важную роль играет отклонение вектора от эталона. В этом случае сравниваются скалярные произведения одного и другого вектора с эталоном.

Пусть $\alpha_n(\Pi)$ и $\alpha_n(\mathcal{V})$ - соответствующие векторы нормы. Сравнивая скалярные произведения $\alpha(\Pi_i) \cdot \alpha_n(\Pi)$ для разных i , можно судить о качестве портрета $\alpha(\Pi_i)$: чем больше скалярное произведение, тем выше качество портрета.

Если характеристики, включаемые в портрет, неравноправны между собой, то их численные оценки могут браться с соответствующими весовыми коэффициентами.

Возможен следующий подход. Если данное качество Π плохо действует на данного \mathcal{V} , то соответствующая координата в векторе $\alpha(\mathcal{V})$ зануляется. Аналогично для вектора $\alpha(\Pi)$. Если j -ая координата соответствует качествам Π и \mathcal{V} , которые одновременно плохо действуют друг на друга, то произведение координат при формировании скалярного произведения берется со знаком «-». Тогда целесообразно считать более качественным портрет с большим скалярным произведением.

Векторные портреты $\alpha(\Pi)$ и $\alpha(\mathcal{V})$ связаны с процессом получения и усвоения учебных фрагментов e данной дисциплины. Поэтому рассматриваются векторы $\alpha(\Pi, e)$ и $\alpha(\mathcal{V}, e)$.

В общем случае координаты векторов $\alpha(\Pi, e)$ и $\alpha(\mathcal{V}, e)$ меняются со временем, в частности, при переходе от одного изучаемого фрагмента к другому, т.е. $\alpha(\Pi, e) = \alpha(\Pi, e)(t)$ и $\alpha(\mathcal{V}, e) = \alpha(\mathcal{V}, e)(t)$. Фиксируя моменты перехода к изучению следующего учебного фрагмента дисциплины, для Π и \mathcal{V} получаем сетевые графики, узлы которых представляют собой точки $\alpha(\Pi, e)(t_k)$ и $\alpha(\mathcal{V}, e)(t_k)$ в моменты времени t_k ($k = \overline{1, n}$), дуги соответствуют изучаемому учебному фрагменту. Нагрузке по дуге соответствует, например, время изучения данного фрагмента данным учащимся, либо балл, полученный при изучении данного фрагмента.

Такое представление динамического портрета качеств Π и \mathcal{V} дает возможность изменять оценки этих качеств в соответствии с правилами расчета сетевого графика, а также определения пропускной способности транспортной сети.

Одной из важных задач организации учебного процесса является создание благоприятного микроклимата в учебной группе с точки зрения согласования портретов преподавателя и учащихся. В качестве меры согласованности портретов могут использоваться разные критерии, например: линейное отклонение координат портрета, косинус угла между векторами, Евклидово расстояние между портретами и другие меры расстояния.

2. Матричная модель портрета

По аналогии с линейной моделью обмена [16, С. 90] предлагается следующая матричная модель согласования портрета преподавателя и учащихся. В портрет включим n характеристик, имеющих веса (x_1, x_2, \dots, x_n) . Структурная матрица согласования портретов имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Обозначим доли выигрышей от согласования a_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$), при этом $\sum_{i=1}^n a_{ij} = 1$ ($j = \overline{1, n}$). При согласовании выигрыш по каждой характеристике составляет:

$$p_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n.$$

Выигрыш от согласования должен быть больше веса характеристики:

$$p_i \geq x_i \quad (i = \overline{1, n}),$$

из которого, как показано, следует матричное уравнение, имеющее вид:

$$A \cdot \bar{x} = \lambda \cdot \bar{x}, \text{ где } \lambda = 1, \bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix},$$

A – структурная матрица, λ – собственное число матрицы, \bar{x} – искомый вектор.

От матричного уравнения переходим к системе линейных уравнений, которая решается, например, методом Гаусса. Получаем пропорции характеристик.

Заметим, что матрица A должна быть квадратной. Если это не так, вводим дополнительные качества (может быть, фиктивные, т.е. нулевые элементы структурной матрицы) или дополнительных учащихся (может быть, фиктивных, с нулевыми координатами в структурной матрице).

Полученные отношения по согласованию портретов следует учитывать при организации и проведении учебного процесса.

Основные результаты

Рассмотрим примеры. К качествам преподавателей и студентов, значимых для эффективного взаимодействия, в работе [12] отнесено 32 характеристики. Выберем среди них пять: объективность, доброжелательность, эрудиция, добросовестность, требовательность. Для этих характеристик на основе данных, приведенных в [4], векторы средних значений (по 10-балльной шкале) равны $\alpha(P) = (7,86; 8,6; 9,0; 8,19; 6,9)$, $\alpha(V) = (7,38; 7,0; 6,63; 8,0; 8,38)$. Следовательно, имеем векторные портреты P и V . При этом, чем большие значения принимают координаты вектора, тем качественнее портрет. Портреты можно сравнивать по значению модуля вектора. Так, для рассматриваемого примера $|\alpha(P)| = 18,21$, $|\alpha(V)| = 16,78$.

Проанализируем следующий пример. По оценкам студентов получены портреты двух преподавателей: $\alpha(P_1) = (8; 9; 8; 9; 7)$, $\alpha(P_2) = (9; 8; 7; 8; 9)$. Если $\alpha_n(P) = (7,86; 8,6; 9,0; 8,19; 6,9)$, то $\alpha(P_1) \cdot \alpha_n(P) = 334,29$, $\alpha(P_2) \cdot \alpha_n(P) = 323,26$, т.е. портрет первого преподавателя лучше. При $\alpha_n(P) = (10; 10; 10; 10; 10)$ скалярные произведения равны: $\alpha(P_1) \cdot \alpha_n(P) = 410$, $\alpha(P_2) \cdot \alpha_n(P) = 400$. Таким образом, при изменении вектора нормы, ранжирование портретов не меняется.

Аналогичные рассуждения и выводы справедливы также для $\alpha(V_i)$.

Обобщенный портрет для данных P и V можно охарактеризовать скалярным произведением $\alpha(P) \cdot \alpha(V)$ при использовании портретов для координат $\alpha(P)$ и $\alpha(V)$.

Для примера: $\alpha(P) \cdot \alpha(V) = 7,86 \cdot 7,38 + 8,6 \cdot 7,0 + 9,0 \cdot 6,63 + 8,19 \cdot 8,0 + 6,9 \cdot 8,38 = 317,52$.

Метод решения задачи согласования портрета преподавателя и рассмотрим на следующем примере. Пусть имеется четыре учащихся. В портрет включим четыре характеристики: объективность (B_1), добросовестность (B_2), внимательность (B_3), самокритика (B_4). По данным работы [12] черты преподавателя $\alpha(P) = (7,86; 8,19; 7,76; 6,43)$.

Пусть для примера, портреты четырех учащихся имеют вид: $\alpha(V_1) = (7,61; 7,94; 7,51; 6,18)$, $\alpha(V_2) = (7,74; 7,94; 7,64; 5,93)$, $\alpha(V_3) = (7,53; 7,86; 7,76; 6,1)$, $\alpha(V_4) = (7,61; 7,94; 7,51; 6,18)$.

Построим структурную матрицу согласования портретов преподавателя и учащихся. Для этого используем абсолютную величину разности между вектором преподавателя и векторами учащихся. А именно: первый столбец - $|\alpha(P) - \alpha(V_1)|$, второй - $|\alpha(P) - \alpha(V_2)|$, третий - $|\alpha(P) - \alpha(V_3)|$, четвертый - $|\alpha(P) - \alpha(V_4)|$, т.е.

$$A = \begin{pmatrix} 1/4 & 1/8 & 1/3 & 1/4 \\ 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1/4 \\ 1/4 & 1/8 & 0 & 1/4 \\ 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1/4 \end{pmatrix}.$$

Первый столбец показывает степень согласования характеристик учащегося V_1 с характеристиками преподавателя: в 1-ой строке – с характеристикой B_1 , во 2-ой строке – с B_2 , в 3-ей – B_3 , в 4-ой – B_4 ; второй столбец отражает степень согласования характеристик учащегося V_2 с соответствующими характеристиками B_1, B_2, B_3, B_4 преподавателя и т.д.

В результате согласования характеристика преподавателя B_i получает некоторый выигрыш x_i ($i = \overline{1,4}$), который равен $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j$, где a_{ij} – элемент структурной матрицы. Переменные x_i могут иметь разное смысловое содержание. В

ВУЗе это может быть выигрыш по баллам, рейтингу или времени усвоения материала учащимися. Может рассчитываться комплексный показатель выигрыша. Этот выигрыш учитывается при планировании учебной, методической, научной, воспитательной работы.

Требуется определить пропорции (x_1, x_2, x_3, x_4) , при которых собственное число матрицы A будет равно 1. В этом случае будут сбалансированы характеристики в учебной группе.

Алгоритм решения задачи следующий:

1) записывается основное матричное уравнение

$$A \cdot \bar{x} = \lambda \cdot \bar{x}, \text{ где } \lambda = 1, \bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix},$$

A – структурная матрица, λ – собственное число матрицы, \bar{x} – искомый вектор.

От матричного уравнения переходим к системе:

$$\begin{cases} 1/4 - 1 & x_1 + 1/8 x_2 + 1/3 x_3 + 1/4 x_4 = 0, \\ 1/4 x_1 + 1/4 - 1 & x_2 + 3x_3 + 1/4 x_4 = 0, \\ 1/4 x_1 + 1/8 x_2 - & x_3 + 1/4 x_4 = 0, \\ 1/4 x_1 + 1/2 x_2 + 1/3 x_3 + & 1/4 - 1 & x_4 = 0; \end{cases}$$

2) решая систему линейных уравнений, например, методом Гаусса, получим:

$$x_1 = 0,7c, \quad x_2 = 0,8c, \quad x_3 = 0,525c, \quad x_4 = c,$$

где c – положительное действительное число.

Если искомый вектор \bar{x} будет содержать нулевые или отрицательные координаты, то это означает, что при исходных данных не удастся сбалансировать проявление рассматриваемых характеристик у данных учащихся.

Таким образом, в данной учебной группе возможно согласование портретов. Оно получается для вектора $\bar{x} = 0,7c, 0,8c, 0,525c, c$. Полученный результат означает, что проявление четырех характеристик должно

соответствовать отношениям $\bar{x} = \left(\frac{7}{10} : \frac{4}{5} : \frac{105}{200} : 1 \right)$, переходя к целым числам, получаем, что $x_1 : x_2 : x_3 : x_4$, как

140:160:105:200, т.е. при работе с данными четырьмя учащимися наибольший результат связан с характеристикой преподавателя B_4 , наименьший – с B_1 .

Заключение

Расчет оптимального соотношения качеств участников учебного процесса позволяет определить степень согласования их интересов в группе и определить пути ее увеличения. Это позволит улучшить качество процесса обучения за счет ликвидации или сглаживания конфликтных ситуаций, оптимального распределения часов лекций и

практических занятий, определения сроков проведения контрольных мероприятий, формирования индивидуальных траекторий обучения студентов.

Разработанные методы и модели могут быть использованы не только в образовательном процессе, но и при формировании различных коллективов – исполнителей совместной работы в любых сферах деятельности. Это могут быть организационно-управленческие, производственные, научные, творческие коллективы.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Булатова Д.С. Современный студент технического вуза: элементы психологического портрета / Д.С. Булатова, А.А. Казбекова, Я.Л. Либман // Педагогическое образование в России. - 2016. - № 4. - С. 87-92.
2. Грязнов А.Н. Социально-психологический портрет студента / А.Н. Грязнов, В.Ш. Масленникова, В.А. Боговарова // Казанский педагогический журнал. - 2013. – № 3 (98). – С. 160-167.
3. Загороднюк А.Н. Психолого-педагогический портрет современного преподавателя ВУЗа / А.Н. Загороднюк // Kant. - 2018. - № 4 (29). - С. 26-30.
4. Лапшов В.А. Социально-типический портрет преподавателя отечественного вуза / В.А. Лапшов // Социология образования. - 2016. - № 4. - С. 4-14.
5. Андреева Э.В. Современный преподаватель вуза глазами студентов / Э.В. Андреева // Аллея науки. - 2018. - № 4 (20). - С. 874-876.
6. Ефимова Г.З. Идеальный педагог высшей школы: личностные качества и социально-профессиональные компетенции / Г.З. Ефимова, А.Н. Сорокин, М.В. Грибовский // Образование и наука. - 2021. - Т. 23. - № 1. - С. 202-230. - DOI: 10.17853/1994-56392021-1-202-230.
7. Анциферова А.Г. Взаимодействие преподавателя и студента как фактор воздействия на личностный и профессиональный рост обучающегося / А.Г. Анциферова // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. - 2016. - № 3 (6). - С. 23.
8. Ганичева А.В. Оценка психолого-педагогических портретов преподавателей и обучаемых / А.В. Ганичева // Экономические и гуманитарные исследования регионов. - 2018. - № 5. - С. 30-33.
9. Ганичева А.В. Математическая модель взаимоотношений индивидуумов / А.В. Ганичева, А.В. Ганичев // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. - 2018. - № 3. - С. 4.
10. Ганичева А.В. Модель согласования портретов преподавателей и обучаемых / А.В. Ганичева, А.В. Ганичев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. - 2020. - Т. 8. - № 3 (30). - С. 16-17.
11. Ганичева А.В. Согласование интересов участников учебного процесса / А.В. Ганичева // Бизнес. Образование. Право. - 2017. - № 4 (41). - С. 350-355.
12. Макарова Л.Н. Проблемные зоны взаимодействия преподавателей и студентов / Л.Н. Макарова, М.В. Старцев // Социально-экономические явления и процессы. - 2017. - Т. 12. - № 5. - С. 210-216.
13. Göncz A. The influence of students' personality traits on their perception of a good teacher within the five-factor model of personality / A. Göncz, L. Göncz, J. Pekić // Acta Polytechnica Hungarica. 2014; 11: 65–86. DOI:10.12700/APH.11.03.2014.03.5.
14. Göncz L. Teacher personality: a review of psychological researched guidelines for a more comprehensive theory in educational psychology / L. Göncz // Open Review of Educational Research. 2017; 4(1): 75-95. DOI: 10.1080/23265507.2017.1339572.
15. Romanov D.K. Psychological aspects of perception and understandings of teachers by university students / D.K. Romanov, L.M. Dauksha // Integration of Education. 2016; 2(20): 228-237. DOI: 10.15507/1991-9468.083.020.201602.228-237.
16. Высшая математика для экономистов / [Н.Ш. Кремер и др.]; под ред. проф. Н.Ш. Кремера. - 3-е изд. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. - 479 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bulatova D.S. Sovremennyj student tekhnicheskogo vuza: ehlementy psikhologicheskogo portreta [A modern student of a technical university: elements of a psychological portrait] / D. S. Bulatova, A. A. Kazbekova, Ya. L. Liberman // Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii [Pedagogical education in Russia]. - 2016. -No. 4. -pp. 87-92 [in Russian]
2. Gryaznov A.N. Social'no-psikhologicheskij portret studenta [Socio-psychological portrait of a student] / A. N. Gryaznov, V. Sh. Maslennikova, V. A. Bogovarova // Kazanskiy pedagogicheskij zhurnal [Kazan Pedagogical Journal]. -2013. – № 3 (98). – pp. 160-167 [in Russian]
3. Zagorodnyuk A.N. Psikhologo-pedagogicheskij portret sovremennogo prepodavatelja VUZa [Psychological and pedagogical portrait of a modern university teacher] / A. N. Zagorodnyuk // Kant. -2018. -No. 4 (29). -pp. 26-30 [in Russian]
4. Lapshov V.A. Social'no-tipicheskij portret prepodavatelja otechestvennogo vuza [Socio-typical portrait of a teacher of a domestic university // Sociology of education] / V. A. Lapshov. - 2016. -No. 4. -pp. 4-14 [in Russian]
5. Andreeva E.V. Sovremennyj prepodavatel' vuza glazami studentov [A modern university teacher through the eyes of students] / E. V. Andreeva // Alleya nauki [Alley of Science]. -2018. -No. 4 (20). -pp. 874-876 [in Russian]
6. Efimova G.Z. Ideal'nyj pedagog vysshejj shkoly: lichnostnye kachestva i social'no-professional'nye kompetencii [The ideal teacher of a higher school: personal qualities and socio-professional competencies] / G. Z. Efimova, A. N. Sorokin, M. V. Gribovsky // Obrazovanie i nauka [Education and Science]. - 2021. -Vol. 23. -No. 1. -pp. 202-230. -DOI: 10.17853/1994-56392021-1-202-230 [in Russian]
7. Antsiferova A.G. Vzaimodejstvie prepodavatelja i studenta kak faktor vozdejjstviya na lichnostnyj i professional'nyj rost obuchajushhegosja [Interaction of a teacher and a student as a factor of influence on the personal and professional growth

of a student] / A. G. Antsiferova // *Ehlektronnyj nauchno-metodicheskij zhurnal Omskogo GAU* [Electronic scientific and methodological journal of the Omsk State Agrarian University]. - 2016. -No. 3 (6). -p. 23[in Russian]

8. Ganicheva A.V. Ocenka psikhologo-pedagogicheskikh portretov prepodavatelej i obuchaemykh [Evaluation of psychological and pedagogical portraits of teachers and trainees] / A. V. Ganicheva // *Ehkonomicheskie i gumanitarnye issledovanija regionov* [Economic and humanitarian studies of the regions]. - 2018. - № 5. -pp. 30-33 [in Russian]

9. Ganicheva A.V. Matematicheskaja model' vzaimootnoshenij individuumov [Mathematical model of the relationship of individuals] / A. V. Ganicheva, A. V. Ganicheva // *Nauchnoe obozrenie. Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij zhurnal* [Scientific review. International Scientific and Practical journal]. -2018. -No. 3. -p. 4 [in Russian]

10. Ganicheva A.V. Model' soglasovanija portretov prepodavatelej i obuchaemykh [Model of matching portraits of teachers and trainees] / A. V. Ganicheva, A. V. Ganicheva // *Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies]. - 2020. -Vol. 8. -No. 3 (30). -pp. 16-17 [in Russian]

11. Ganicheva A.V. Soglasovanie interesov uchastnikov uchebnogo processa [Coordination of interests of participants in the educational process] / A. V. Ganicheva // *Biznes. Obrazovanie. Pravo.* [Business. Education. Law]. -2017. -No. 4 (41). -pp. 350-355 [in Russian]

12. Makarova L.N. Problemnye zony vzaimodejstvija prepodavatelej i studentov [Problem areas of interaction between teachers and students] / L. N. Makarova, M. V. Startsev // *Social'no-ehkonomicheskie javlenija i processy* [Socio-economic phenomena and processes]. -2017. -Vol. 12. -No. 5. -pp. 210-216 [in Russian]

13. Göncz A. The influence of students' personality traits on their perception of a good teacher within the five-factor model of personality / A. Göncz, L. Göncz, J. Pekić // *Acta Polytechnica Hungarica*. 2014; 11: 65–86. DOI:10.12700/APH.11.03.2014.03.5.

14. Göncz L. Teacher personality: a review of psychological researched guidelines for a more comprehensive theory in educational psychology / L. Göncz // *Open Review of Educational Research*. 2017; 4(1): 75-95. DOI: 10.1080/23265507.2017.1339572.

15. Romanov D.K. Psychological aspects of perception and understandings of teachers by university students / D.K. Romanov, L.M. Dauksha // *Integration of Education*. 2016; 2(20): 228-237. DOI: 10.15507/1991-9468.083.020.201602.228-237.

16. Vysshaja matematika dlja ehkonomistov [Higher Mathematics for economists] / [N.Sh. Kremer et al.]; edited by Prof. H.S. Kremer. - 3rd ed. - Moscow: UNITY-DANA, 2010. -479 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.001>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАВОВЫХ ПОТОКОВ В МОДЕЛЯХ ИЗОТЕРМАЛЬНОЙ ВЯЗКОЙ МНОГОФАЗНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Научная статья

Короткий А.И.¹, Цепелев И.А.²

^{1, 2} Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

* Корреспондирующий автор (starodubtsevayv[at]ya.ru)

Аннотация

Поток лавы начинает формироваться, когда расплавленная порода извергается на поверхность Земли и медленно распространяется на поверхности из вулканического жерла. Извержения создают различные потоки лавы (например, течения различной структуры и скорости потока) под действием гравитации в зависимости от химического состава, температуры магматических пород и топографии поверхности, по которой протекает лава. Несмотря на то, что потоки вулканической лавы не оказывают существенного влияния на жизнь людей, их опасность немалая, поскольку горячая лава убивает растительность, разрушает инфраструктуру и может вызвать наводнение из-за таяния снега/льда. Следуя развитию вычислительных ресурсов, численное моделирование лавовых потоков за последние несколько десятилетий продвигалось от моделирования одномерных потоков к моделированию трехмерных потоков, которое наиболее адекватно способно отразить реальные природные процессы. В этой статье разрабатываются трехмерные численные модели течений изотермальной вязкой ньютоновской многофазной жидкости на различных поверхностях под действием силы тяжести, с целью исследовать динамику и взаимодействие потоков лавы. Полное моделирование потока лавы является сложной задачей с физической, математической и численной точек зрения. Математическая модель включает в себя уравнение Навье—Стокса, уравнение несжимаемости и уравнения переноса фаз с соответствующими начальными и граничными условиями. Для численной аппроксимации математической модели применяется метод конечных объемов. Программные коды реализованы в пакете ANSYS Fluent на языке C. При проведении численных экспериментов использовалась ЭВМ параллельного действия. Демонстрируются результаты расчетов модельного эксперимента. Модели реконструкции потоков лавы могут оказывать существенную помощь при проектировании барьеров, отражающих потоки лав. Доступность технологических и научных данных (например, данные спутниковых мониторингов, высокоскоростные алгоритмы расчетов и реалистичные модели) позволят интегрировать данные в модели с традиционными методами изучения вулканической активности, что позволит более эффективно использовать результаты.

Ключевые слова: вязкая жидкость, многофазная жидкость, уравнение Навье—Стокса, краевая задача, численное моделирование.

NUMERICAL SIMULATION OF LAVA FLOWS IN MODELS OF ISOTHERMAL VISCOUS MULTIPHASE INCOMPRESSIBLE FLUID

Research article

Korotkiy A.I.¹, Tsepelev I.A.²

^{1, 2} N.N. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

* Corresponding author (starodubtsevayv[at]ya.ru)

Abstract

A lava flow begins to form when molten rock erupts onto the surface of the Earth and slowly spreads to the surface from a fissure vent. Eruptions create different lava flows (for example, flows of a different structure and flow velocity) under the influence of gravity, depending on the chemical composition, temperature of igneous rocks, and the topography of the surface over which the lava flows. Despite the fact that volcanic lava flows do not have a significant impact on people's lives, their danger is considerable, since hot lava kills vegetation, destroys infrastructure, and can cause flooding due to melting snow/ice. Following the development of computing resources, numerical modeling of lava flows over the past few decades has moved from modeling one-dimensional flows to modeling three-dimensional flows, which is most adequately able to reflect real natural processes. In order to investigate the dynamics and interaction of lava flows, the current article develops three-dimensional numerical models of flows of an isothermal viscous Newtonian multiphase fluid on various surfaces under the influence of gravity. A complete simulation of a lava flow is a challenging task from a physical, mathematical, and numerical point of view. The mathematical model includes the Navier-Stokes equation, the incompressibility equation, and the phase transfer equations with corresponding initial and boundary conditions. The finite volume method is used for numerical approximation of the mathematical model. The program codes are implemented in the ANSYS Fluent package in C. When conducting numerical experiments, a parallel-acting computer was used. The article demonstrates the results of calculations of the model experiment. Lava flow reconstruction models can provide significant assistance in the design of barriers reflecting lava flows. The availability of technological and scientific data (such as satellite monitoring data, high-speed calculation algorithms, and realistic models) will allow for integrating data into models with traditional methods of studying volcanic activity, which will allow more efficient use of the results.

Keywords: viscous liquid, multiphase liquid, Navier-Stokes equation, boundary value problem, numerical modeling.

Введение

Лавовые потоки – это потоки частично расплавленной породы, которые распространяются по поверхности Земли

под действием силы тяжести. При охлаждении такого расплава на его поверхности образуется твердая корка, расплав постепенно затвердевает, пока не превратится в твердое тело. Математическое и компьютерное моделирование играют важную роль в понимании структур потока лавы, его морфологии и тепловой эволюции (например, см., [1], [2]). Следуя развитию вычислительных ресурсов, численное моделирование лавовых потоков за последние несколько десятилетий продвигалось от моделирования одномерных потоков к моделированию трехмерных потоков, которое наиболее адекватно способно отразить реальные природные процессы. В работе [2] представлен обзор численных подходов и программных средств для моделирования распределения потоков лавы. С развитием средств космического и аэромониторинга, в моделях реконструкции потоков лавы могут использоваться цифровые данные об изменении поверхности местности под влиянием накопления лавы, и тем самым оказывать помощь при проектировании барьеров, отражающих лавовую опасность. Доступность данных спутникового мониторинга, высокоскоростных ЭВМ, реалистичных математических моделей, позволяют интегрировать данные и модели, и эффективно использовать полученные результаты. В данной работе для моделирования движения лавы используется метод переноса объёмной доли (VOF). Этот метод основан на дискретизации расчетной области неструктурированной сеткой. Для аппроксимации систем дифференциальных уравнений, которые описывают движение ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости под действием внешних сил [3], [4] и учитывает влияние теплопереноса на границе взаимодействия различных жидкостей, применяется метод конечных объемов [5].

Реология лавы зависит от ее химического состава, температуры, содержания кристаллов и водяного пара. Так, например, лавы с преобладанием базальта более плотные и вязкие, чем лавы с преобладанием кремния. Реология зависит также от времени как результат охлаждения, кристаллизации и конденсации водяного пара. Охлаждение определяется сочетанием переноса тепла в жидкой лаве с переносом его на поверхность лавы и в окружающую атмосферу посредством радиационного и конвективного теплообмена [6]. В работе [7] численное моделирование течения лавовых потоков осуществлялось в двумерной постановке в рамках движения теплопроводной двухфазной неньютоновской несжимаемой жидкости с учетом нелинейного теплообмена на границе жидкость-воздух.

В этом исследовании представлена трехмерная модель потока вязкой несжимаемой жидкости, находящейся под действие силы тяжести, которая может описывать изотермические течения лавы. В математической модели течения лавовых потоков, представленной в настоящем исследовании, не учитываются явно тепловые и реологические процессы, которые, несомненно, влияют на динамику распространения лавы. Также модель не учитывает процессы дегазации и зависимость плотности от температуры. Вместо этого используется некоторая модельная зависимость физических характеристик лавового потока (а именно, плотность и вязкость) от времени, чтобы симулировать процесс затвердевания расплавленных пород.

Постановка задачи

Многофазный поток – это поток с участием более чем одной жидкости. Каждая такая жидкость обладает своими физическими характеристиками, а именно, плотностью и вязкостью. Жидкости не смешиваются, но обладают некоторой областью межфазного взаимодействия и могут взаимодействовать друг с другом посредством межфазных сил, например, силы поверхностного натяжения в зоне взаимодействия.

Опишем математическую модель рассматриваемого движения жидкости. В качестве основных уравнений состояния жидкости примем уравнения движения двухфазной вязкой жидкости. В модельной области $\Omega \subset R^3$ (см. рисунок 1) движение такой вязкой жидкости на промежутке времени $t \in T = [t_0, \vartheta]$, где $t = t_0$ – начало времени наблюдения за процессом, $t = \vartheta$ – конечный момент времени наблюдения за процессом, представляется уравнением Навье–Стокса, и уравнением несжимаемости (неразрывности) [3], [4]

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \langle \mathbf{u}, \nabla \rangle (\rho \mathbf{u}) - \nabla \cdot (\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)) = -\nabla p - \rho \mathbf{g},$$

$$\mathbf{x} \in \Omega, \quad t \in T; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad t \in T; \quad (2)$$

$$\mathbf{u}(t_0, \mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \mathbf{u}) = 0, \quad \alpha_i(0, \mathbf{x}) = \alpha_i^0(\mathbf{x}), \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

плотность и вязкость среды может быть вычислена из соотношений

$$\rho(t, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^4 \rho_i^{(t)} \alpha_i(t, \mathbf{x}), \quad \mu(t, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^4 \mu_i^{(t)} \alpha_i(t, \mathbf{x}), \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i(t, \mathbf{x}) = 1. \quad (6)$$

Здесь $\mu_i, \rho_i, i = 1, 2, 3$ – вязкость и плотность жидкостей, которые поступают в рассматриваемую область извне; μ_4, ρ_4 – вязкость и плотность жидкости, которая заполняют модельную область в начальный момент времени. Модельная область $\Omega = [0, l_1] \times [0, l_2] \times [f(x_1, x_2), f(x_1, x_2) + l_3]$ ограничена снизу поверхностью исследуемой местности $f(x_1, x_2)$, где $0 \leq x_1 \leq l_1, 0 \leq x_2 \leq l_2, l_1 = 6 \text{ km}, l_2 = 4 \text{ km}$ – горизонтальные размеры региона и $l_3 = 0.3 \text{ km}$ – высота модельной области. На нижней границе модельной области и боковых границах задается условие прилипания: $\mathbf{u} = 0$. На той части нижней поверхности, где расположено жерло, задаются условия: $u = u(t), \rho = \rho(t), \mu = \mu(t)$, где $\mathbf{u}(t)$ – скорость экструзии магмы. На верхней границе модельной области задаются условия: $\nabla \mathbf{u} = 0, p = 10^5, \rho = \text{const} = \rho_4, \mu = \text{const} = \mu_5$. Заметим, что указанные граничные условия гарантируют выполнение условия (2).

Задача состоит в нахождении функций

$$(\mathbf{u} = u(t, x), p = p(t, x), \alpha_i = \alpha_i(t, x)), \quad i = 1, \dots, 4, \quad t \in T, \quad x \in \Omega,$$

являющихся решением начально-краевой задачи (1) -- (4) с указанными выше начальными и граничными условиями. Величины $\rho_i, \mu_i, i = 1, \dots, 4$, считаются известными. Данная задача нелинейна относительно искомых функций, аналитическое нахождение решений такой задачи математически сложно, поэтому альтернативным методом исследования является численное моделирование. В работе [8] проводится исследование корректности постановок начально-краевых задач для упомянутых выше моделей. Вводится понятие обобщенного (слабого) решения соответствующей математической задачи. Также исследуется разрешимость задачи и указана зависимость решения задачи от исходных данных и параметров модели.

Система уравнений (1)–(6) имеет устойчивое решение, если произвольное по отношению к нему малое возмущение, возникнув в какой-либо момент, далее со временем убывает. В противном случае решение неустойчиво. Можно показать, что при малых числах Рейнольдса, когда вязкие силы играют преобладающую роль, гидродинамические решения устойчивы. Неустойчивости возникают при больших числах Рейнольдса, когда существенны инерционные силы. Многофазная жидкость также будет находиться в неустойчивом состоянии, если сверху находятся более плотные фазы жидкости. Такая система будет эволюционировать под действием силы тяготения. В данном исследовании наверху находится фаза, моделирующая воздух, что не позволяет силе тяжести вывести систему из устойчивого равновесия.

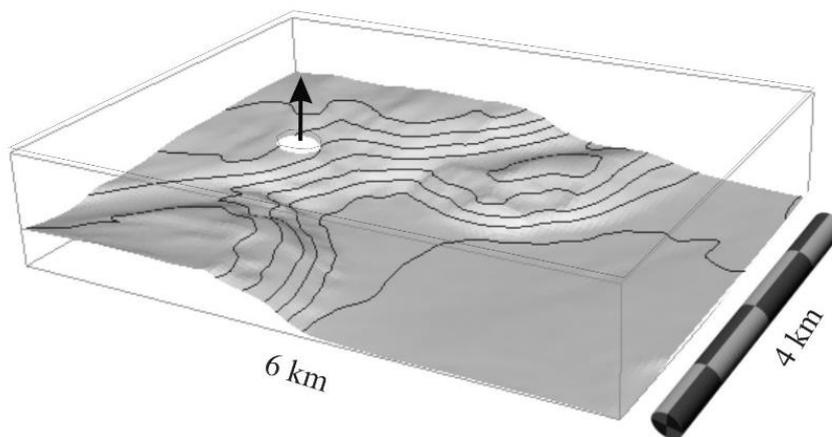


Рис. 1 – Модельная область и ее граница

Численный метод решения задачи

Для численного анализа модельной задачи мы используем программное обеспечение Ansys Fluent (<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>), основанное на методе конечных объемов. Модельная область разбивается на $\sim 10^6$ гексаэдров, составляющих конечные объемы. Численные коды используют многофазную нестационарную VOF (Volume Of Fluid) модель [9], а решатель использует неявную по времени схему интегрирования уравнений (1) -- (4) для совместного определения поля скоростей, давления и объемной доли жидкости. Метод VOF основан на технике отслеживания поверхности,

применяемой к фиксированной эйлеровой сетке. Он разработан для двух или более несмешивающихся жидкостей, когда положение границы раздела между жидкостями четко определяется. Уравнения импульса (1) являются общими для всех жидкостей, и объемная доля каждой из жидкостей (4) в каждой расчетной ячейке (элемент конечного объема) отслеживается по всей области. Если в i ячейке расчетной сетки $\alpha_p(\cdot, x_i) = 1$, тогда эта ячейка полностью заполнена p жидкостью. Если $\alpha_p(\cdot, x_i) = 0$, тогда в ячейке i жидкость p не присутствует. Если $0 < \alpha_p(\cdot, x_i) < 1$, то ячейка i есть зона интерфейса между жидкостью p и другими жидкостями. Для всех моментов времени для каждой ячейки сетки выполнено условие (6).

Для аппроксимации давления и лапласиана используются численные схемы второго порядка точности; для дискретизации конвективных членов -- монотонные схемы (см., например, [10]). Давление дискретизируется по ступенчатой схеме второго порядка PRESTO! (PREssure STaggering Option) [11]. Давление и скорость вычислялись SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) методом [12], где параметры релаксации выбраны равными 0.01 и 0.3 для скорости и давления, соответственно. Учитывая нелинейность задачи, временной шаг выбирается в диапазоне от 1с. до 10с. в зависимости от устойчивости и для оптимизации скорости сходимости систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), полученных после дискретизации задач (1), (2), (4). Неявная схема позволяет

выполнять устойчивые вычисления с относительно большим временным шагом. Для решения всех СЛАУ используется многосеточные методы [10].

Заметим, что число Рейнольдса ([13], С.87) для лавы мало, поскольку лава движется медленно и вязкость ее большая. Поэтому течение лавы всегда ламинарное. При этом число Рейнольдса для воздуха большое. Отношение вязкости лавы к вязкости воздуха может достигать порядка 10^{12} . Численная неустойчивость, которая может возникнуть в процессе вычислений, приводит к тому, что движение в воздухе становится турбулентным, что делает дальнейшее проведение расчетов невозможным. Для преодоления этой трудности приходится уменьшать параметр релаксации для определения скорости и проводить расчеты с очень малым шагом по времени. Отметим, что попытки решать данную задачу явными методами не увенчались успехом.

Учитывая высокую размерность дискретной задачи, для вычислений привлекался вычислительный кластер “Уран” (ИММ УрО РАН, г.Екатеринбург). Вычисления проводились на 1 узле, который состоит из двух 18-и ядерных процессоров Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v4 2.30GHz; оперативная память 256 GB; кэш-память 45 MB SmartCache. Ориентировочное время счета составило около 36 часов на 32 ядрах CPU.

Вычислительный эксперимент

Расчетная сетка строится по следующему алгоритму. В прямоугольнике $[0, l_1] \times [0, l_2]$ строится равномерная прямоугольная сетка $\{x_1^i, x_2^j; 0 \leq i \leq n_1, 0 \leq j \leq n_2\}$. Далее определяется гексаэдр (блоки), каждый из которых определяется 8 вершинами:

$$\begin{aligned} & (x_1^i, x_2^{j+1}, f(x_1^i, x_2^{j+1})); & (x_1^{i+1}, x_2^{j+1}, f(x_1^{i+1}, x_2^{j+1})); \\ & (x_1^{i+1}, x_2^j, f(x_1^{i+1}, x_2^j)); & (x_1^i, x_2^j, f(x_1^i, x_2^j) + l_3); \\ & (x_1^i, x_2^j, f(x_1^i, x_2^j) + l_3); & (x_1^i, x_2^{j+1}, f(x_1^i, x_2^{j+1}) + l_3) \\ & (x_1^{i+1}, x_2^{j+1}, f(x_1^{i+1}, x_2^{j+1}) + l_3); & (x_1^{i+1}, x_2^j, f(x_1^{i+1}, x_2^j) + l_3); \\ & & 0 \leq i < n_1, \quad 0 \leq j < n_2. \end{aligned}$$

Каждый такой блок разбивается в вертикальном направлении $0 \leq k \leq n_3$ точками таким образом, что высота каждой ячейки определяется по формуле

$$h_k = \frac{h}{3} + \frac{k}{n_3 - 1} \frac{h}{3}, \quad h = \frac{l_3}{n_3 - 1}, \quad 0 \leq k < n_3.$$

Такое разбиение делает высоту ячеек, которые ближе к нижней границе, кратно меньше, чем у тех ячеек, которые ближе к верхней границе. Таким образом, удастся аппроксимировать лавовые потоки более качественно учетом того, что высота лавы уменьшается по мере изменения рельефа местности весьма существенно. Для генерации сетки использовался пакет OpenFOAM (<https://www.openfoam.com/>). Число неортогональности сетки в данном расчет не превосходило 17, а среднее число неортогональности равнялось 3. Построенная таким образом гексаэдральная сетка может быть легко масштабирована в любом направлении практически без потери качества. При уменьшении вязкости жидкости, высота растекания жидкости уменьшается. В этом случае просто уменьшаются вертикальные высоты ячеек сетки, примыкающие к нижней поверхности, для более качественного моделирования тонких структур.

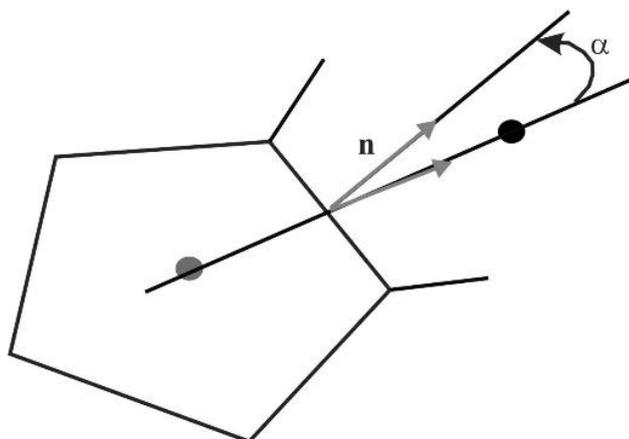


Рис. 2 – Ортогональность – угловое отклонение вектора (в градусах), соединяющего геометрические центры двух ячеек, и вектора нормали к их общей грани. Иногда под ортогональностью понимают значение косинуса этого угла

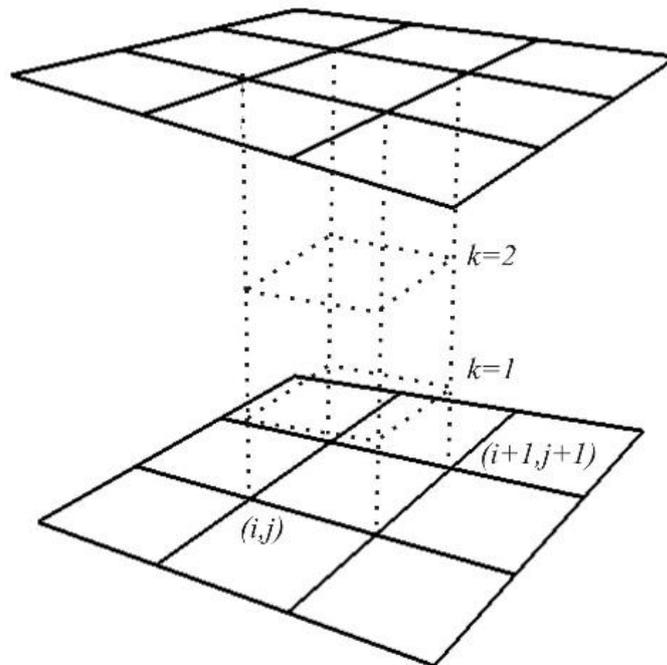


Рис. 3 – Построение расчетной сетки
Примечание: здесь $n_1 = n_2 = n_3 = 4$

До начала эксперимента предполагается, что модельная область заполнена жидкостью с характеристиками $\rho_4 = \text{const} = 1.0 \text{ kg m}^{-3}$ и $\mu_4 = \text{const} = 10^{-4} \text{ Pa s}$, которая моделирует воздушную среду. С момента времени t_0 жидкость с характеристиками $\rho_1(t_0)$ и $\mu_1(t_0)$ (см. рисунок 1) из некоторой области нижней границы втекает в область модели со скоростью $u_1 = -u_{\text{in}}(t_0)n$, где n -- вектор внешней нормали в соответствующей точке нижней границы. Жидкость стекает по рельефу в течение $\Delta t_1 = 2.5$ часов, после чего подача жидкости 1 прекращается (см. рисунок 4). С момента времени $t_1 = t_0 + \Delta t_1$ мы изменяем свойства жидкости 1, увеличивая вязкость излившейся жидкости в 10 раз, $\mu_1(t_1) = 10\mu_1(t_0) \text{ Pa s}$. После этого мы продолжаем вычисления, и с момента времени t_1 жидкость с характеристиками $\rho_2(t_1)$ и $\mu_2(t_1)$ из той же области на нижней границе и с той же скоростью начинает поступать внутрь модельной области. Жидкость 2 течет над жидкостью 1 в течение примерно $\Delta t_2 = 6.7$ часов, после чего подача жидкости 2 также прекращается (см. рисунок 5). Жидкость 2 практически полностью перекрывает жидкость 1, поскольку вязкость жидкости 1 выше и она движется медленнее жидкости 2 в результате действия силы тяжести и изостатического сжатия жидкости 1 жидкостью 2. С момента времени $t_2 = t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2$ мы изменяем свойства жидкости 1 и 2, увеличивая вязкость излившейся жидкости в 10 раз, $\mu_1(t_2) = 100\mu_1(t_0)$, $\mu_2(t_2) = 10\mu_2(t_1)$. Вычисления продолжают и с момента времени t_2 жидкость с характеристиками $\rho_3(t_2)$ и $\mu_3(t_2)$ из той же области на нижней границе и со скоростью $u_2 = -0.2u_{\text{in}}(t_0)n$ поступает внутрь модельной области. В начале жидкость 3 находится под жидкостями 1 и 2. Далее жидкость 3 выходит на поверхность и течет вверх двух более «старых» жидкостей, толкая их вниз и еще больше сжимая нижележащие жидкости. Вычисления продолжают до момента времени $t_3 = t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$, $\Delta t_3 = 8.3$ часов (см. рисунок 6). Такой сценарий излияния расплавленных пород генерирует слоистый по своему составу поток лавы.

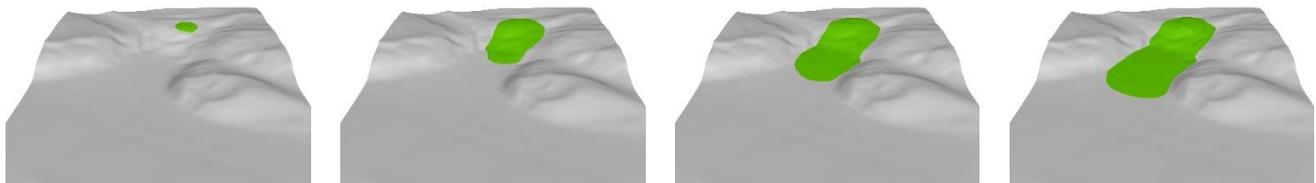


Рис. 4 – Демонстрируются границы раздела между воздухом и жидкостью 1, характеризующие движение этой жидкости по рельефу в моменты времени 0s, 3000s, 6000s и 9000s

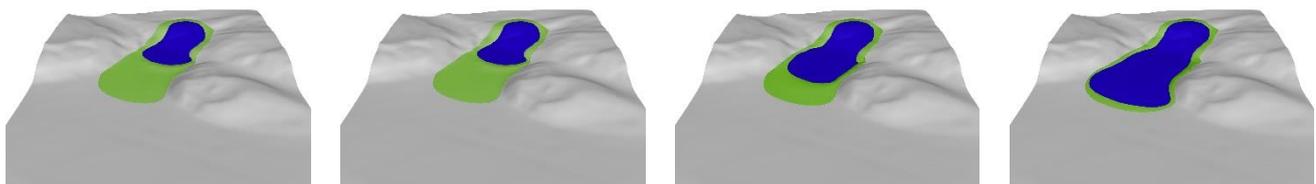


Рис. 5 – Совместное движение жидкости 1 и жидкости 2 по рельефу в моменты времени 10000s, 18000s, 26000s и 33000s

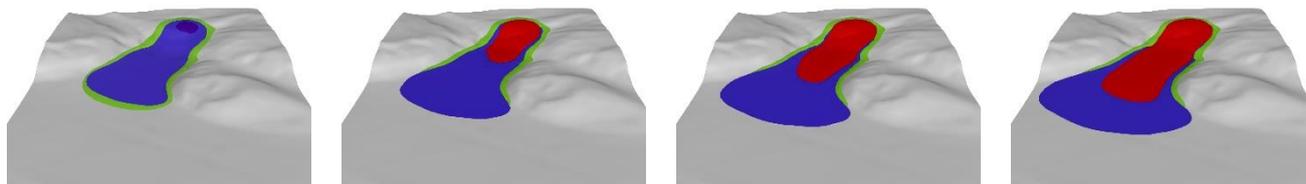


Рис. 6 – Совместное движение жидкости 1, жидкости 2 и жидкости 3 по склону в моменты времени 34000s, 43000s, 53000s и 63000s

Таблица 1 – Физические параметры жидкостей в численном эксперименте

Период времени	Жидкости	Плотность	Вязкость	Скорость
$1 - \Delta t_1 = 9000 \text{ s}$	1	2500kg/s	10^7 Pa s	0,5 m/s
	2	-	-	
	3	-	-	
$1 - \Delta t_2 = 24000 \text{ s}$	1	2500kg/s	10^8 Pa s	0,5 m/s
	2	2300kg/s	10^7 Pa s	
	3	-	-	
$1 - \Delta t_3 = 30000 \text{ s}$	1	2500kg/s	10^9 Pa s	0,1 m/s
	2	2300kg/s	10^8 Pa s	
	3	2300kg/s	10^8 Pa s	

Заключение

В данной работе представлена численная реализация пространственной мультифазной модели движения ньютоновских вязких несжимаемых жидкостей, которые распространяются в воздушной среде под действие силы тяжести. Проведены расчеты модельного примера движения таких жидкостей, с учетом того, что каждая жидкость имеет свои физические характеристики. Учитывая применение пакета ANSYS Fluent для реализации решателей систем дифференциальных уравнений, данный подход может быть применен для моделирования более сложных задач в пространственных областях. Моделирование, представленное в работе, способно предсказать динамику и морфологию лавового потока, что в сочетании уже с традиционными методами оценки лавовой опасности, поможет уменьшить риски экономических потерь при извержении вулканов, особенно в густонаселенных регионах мира ([14]).

Финансирование

Работа выполнена при поддержке РФФИ и DFG в соответствии с исследовательским проектом №20-51-12002. При проведении работ был использован суперкомпьютер «Уран» ИММ УрО РАН.

Funding

This work was supported by RFBR and DFG according to the research project No 20-51-12002. Our work was performed using "Uran" supercomputer of IMM UB RAS.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

- Macedonio G. A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard / G. Macedonio, A. Costa, A. Longo // Computers & Geosciences, 2005. — Vol. 31. — P. 837–845. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.01.013 .
- Cordonnier B. Benchmarking lava-flow models / B. Cordonnier, E. Lev, F. Garel // Geological Society, London, Special Publications, 2015. — Vol. 426. — P. 425–445. DOI: 10.1144/SP426.7A .
- Kolev N.I. Multiphase flow dynamics/ N.I. Kolev // Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — 781 p.
- Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть 1 / Р.И. Нигматулин. — М.: Наука, 1987. — 464 с.
- Ferziger J.H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J.M. Ferziger, M. Perit // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. — 426 p. DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2 .
- Griffiths W.R. The Dynamics of Lava Flows / W.R. Griffiths // Annual Review of Fluid Mechanics, 2000. — Vol. 32. — P. 477–518. DOI: 10.1146/annurev.fluid.32.1.477 .
- Tsepelev I. Computational modelling of lava flows in multiphase fluid models with temperature- and shear rate-dependent rheology / I. Tsepelev, A. Korotkii // AIP Conference Proceedings, 2020. — Vol. 2312, No. 050022. — 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0035525> .
- Цепелев И.А. Гравитационное течение двухфазной вязкой несжимаемой жидкости / И.А. Цепелев, А.И. Короткий, Ю.В. Стародубцева // Труды ИММ УрО РАН, — 2021, — Том 27, N 4.
- Hirt C.W. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nichols // J. Comput.Phys, 1981. — Vol. 39, No. 1, — P. 201–225.

10. Ismail-Zadeh A. Computational Methods for Geodynamics / A. Ismail-Zadeh, P. Tackley. — Cambridge University Press, Cambridge, 2010. — 347 p. DOI: 10.1017/CBO9780511780820 .
11. Peyret R. Handbook of Computational Fluid Mechanics / R. Peyret. — Academic Press Limited, USA, 1996. —467 p.
12. Patankar S.V. A calculation procedure for heat and mass transfer in three-dimensional parabolic flows / S.V. Patankar, D.B. Spalding // Int. J. Heat Mass Transfer, 1972. — Vol. 15, — P. 1787–1806. DOI: 10.1016/0017-9310(72)90054-3 .
13. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability / S. Chandrasekhar. — Oxford: Clarendon Press, 1961. — 654 p.
14. Ismail-Zadeh A. Integrating natural hazard science with disaster risk reduction policy / A. Ismail-Zadeh // Advancing Culture of Living with Landslides”, 2017. — Springer, Cham, — P. 167–172. DOI: 0.1007/978-3-319-59469-9-13 .

Список литературы на английском языке / References in English

1. Macedonio G. A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard / G. Macedonio, A. Costa, A. Longo // Computers & Geosciences, 2005. — Vol. 31. — P. 837–845. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.01.013 .
2. Cordonnier B. Benchmarking lava-flow models / B. Cordonnier, E. Lev, F. Garel // Geological Society, London, Special Publications, 2015. — Vol. 426. — P. 425–445. DOI: 10.1144/SP426.7A .
3. Kolev N.I. Multiphase flow dynamics/ N.I. Kolev // Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — 781 p.
4. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznyh sred [Dynamics of multiphase media]. Part 1 / R.I. Nigmatulin. - M.: Nauka, 1987— - 464 p. [in Russian]
5. Ferziger J.H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J.M. Ferziger, M. Perit // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. — 426 p. DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2 .
6. Griffiths W.R. The Dynamics of Lava Flows / W.R. Griffiths // Annual Review of Fluid Mechanics, 2000. — Vol. 32.— P. 477–518. DOI: 10.1146/annurev.fluid.32.1.477 .
7. Tsepelev I. Computational modelling of lava flows in multiphase fluid models with temperature- and shear rate-dependent rheology / I. Tsepelev, A. Korotkii // AIP Conference Proceedings, 2020. —Vol. 2312, No. 050022. — 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0035525> .
8. Tsepelev I.A. Gravitacionnoe techenie dvufaznoj vjazkoj neszhimaemoj zhidkosti [Gravitational flow of a two-phase viscous incompressible fluid] / I.A. Tsepelev, A.I. Korotkiy, Yu.V. Starodubtseva // Trudy IMM UrO RAN [Proceedings of IMM UrO RAS], - 2021, - Volume 27, N 4. [in Russian]
9. Hirt C.W. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nichols // J. Comput.Phys, 1981. — Vol. 39, No. 1, — P. 201–225.
10. Ismail-Zadeh A. Computational Methods for Geodynamics / A. Ismail-Zadeh, P. Tackley. — Cambridge University Press, Cambridge, 2010. — 347 p. DOI: 10.1017/CBO9780511780820 .
11. Peyret R. Handbook of Computational Fluid Mechanics / R. Peyret. — Academic Press Limited, USA, 1996. —467 p.
12. Patankar S.V. A calculation procedure for heat and mass transfer in three-dimensional parabolic flows / S.V. Patankar, D.B. Spalding // Int. J. Heat Mass Transfer, 1972. — Vol. 15, — P. 1787–1806. DOI: 10.1016/0017-9310(72)90054-3 .
13. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability / S. Chandrasekhar. — Oxford: Clarendon Press, 1961. — 654 p.
14. Ismail-Zadeh A. Integrating natural hazard science with disaster risk reduction policy / A. Ismail-Zadeh // Advancing Culture of Living with Landslides”, 2017. — Springer, Cham, — P. 167–172. DOI: 0.1007/978-3-319-59469-9-13 .

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.002>

**ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛОВ РИМАНА
С ПОМОЩЬЮ АСИМПТОТИЧЕСКИХ МНОГОЧЛЕНОВ, ОСНОВАННЫХ
НА ПОЛИНОМАХ ЧЕБЫШЕВА ПЕРВОГО РОДА. ПРОГРАММА НА БАЗЕ MICROSOFT EXCEL**

Научная статья

Тормосов Е.А.*

Северный (Арктический) Федеральный Университет, Архангельск, Россия

* Корреспондирующий автор (tormosov.e[at]mail.ru)

Аннотация

Стандартный метод вычисления интегралов Римана с применением формулы Ньютона-Лейбница, предполагает нахождение первообразной подынтегральной функции. Однако этот метод работает не всегда. Существуют множественные численные методы для вычисления определенных интегралов от функций, не имеющих первообразную. В данной статье мы представляем численный метод вычисления приближенных значений определенных интегралов с помощью асимптотических многочленов, основанных на полиномах Чебышева первого рода. Так же покажем программу на базе Microsoft Excel, использование которой позволит производить расчет любого интеграла Римана без промежуточных вычислений, требуя при этом минимальное количество времени.

Ключевые слова: Полиномы Чебышева первого рода, асимптотические многочлены, интеграл Римана, Microsoft Excel.

**NUMERICAL METHOD FOR CALCULATING RIEMANN INTEGRALS USING ASYMPTOTIC POLYNOMIALS
BASED ON THE FIRST-KIND CHEBYSHEV POLYNOMIALS. A PROGRAM BASED ON MICROSOFT EXCEL**

Research article

Tormosov E.A.*

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

* Corresponding author (tormosov.e[at]mail.ru)

Abstract

The standard method for calculating Riemann integrals using the Newton-Leibniz formula involves finding a primitive subintegral function. However, this method does not always work. There are multiple numerical methods for calculating certain integrals from functions that do not have a primitive. The current article presents a numerical method for calculating approximate values of certain integrals using asymptotic polynomials based on the first-kind Chebyshev polynomials. The study also shows a program based on Microsoft Excel, the use of which will allow for calculating any Riemann integral without intermediate calculations and requiring a minimum amount of time.

Keywords: first kind Chebyshev polynomials, asymptotic polynomials, Riemann integral, Microsoft Excel.

Введение

Тема аппроксимации функции полиномами затрагивалась математиками с давних времен, в 1973 году Этерман И.И. в своей работе предоставил асимптотический многочлен, в состав которого входят полиномы Чебышева первого и второго рода. А также разложение функции по последовательности линейных функционалов.

Выводы, сделанные Этерманом И.И., нашли применение в работе Грибковой В.П., в своей работе она представляет решение определенных интегралов одной функции, решение интегралов функций нескольких переменных, а так же решение различных дифференциальных и интегральных уравнений. В основе методов лежат асимптотические многочлены, в основе которых лежат полиномы Чебышева.

Эти методы нашли так же применение в физике, механике, численном моделировании, так зарубежные авторы F. Gross, C.F Osgood, P. Karunkar., S. Chakravety, Грибкова В.П., Антонов В.В., применяют результаты для нахождения численного решения интегро-дифференциального уравнения теории упругости, либо решение задачи теории крыла, а также решения задач гидродинамики.

Актуальность, цель работы

В настоящее время компьютерное моделирование значительно упрощает расчеты. Чем выше степень полинома Чебышева, тем сложнее вычисление асимптотического многочлена, содержащего полином соответствующей степени. Известно, что для наилучшей аппроксимации функции, а следовательно, для наилучшего результата расчета, требуется вычислить не менее десяти членов последовательности. С этой целью мы подключаем компьютерное моделирование, а именно, используем программу Microsoft Excel. Преимуществом так же является то, что использование данной программы не требует дополнительного обучения. Интерфейс программы очень прост и знаком каждому.

Научные результаты

Можно увидеть, что вычисление интегралов Римана с помощью асимптотических многочленов и разложения функции по последовательности функционалов, дают практически те же результаты, что вычисление интегралов Римана с помощью нахождения первообразной. Погрешность результатов не превышает 0,04%. Данный метод имеет огромное преимущество в том, что с его помощью можно вычислять интегралы Римана с подынтегральной функцией, не имеющей первообразную. А использование программы позволяет выполнить это без промежуточных расчетов.

Полиномы Чебышева первого рода

Полиномы Чебышева первого рода определяются формулой: [2].

$$T_n(x) = \cos(n \arccos x), -1 \leq x \leq 1 \quad (1)$$

Если ввести замену переменной $x = \cos \theta$ то можно перейти к тригонометрической форме полинома

$$T_n(x) = \cos n\theta \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (2)$$

Ввиду того, что выполняется соотношение

$$\cos n\theta = 2 \cos \theta \cos(n-1)\theta - \cos(n-2)\theta$$

Для последовательного вычисления многочленов $T_n(x)$ будет справедлива рекуррентная формула

$$T_n(x) = 2x T_{n-1}(x) - T_{n-2}(x) \quad (3)$$

Первые 10 полиномов имеют вид:

Таблица 1 – Первые десять полиномов Чебышева первого рода

$T_0(x)$	1
$T_1(x)$	x
$T_2(x)$	$2x^2 - 1$
$T_3(x)$	$4x^3 - 3x$
$T_4(x)$	$8x^4 - 8x^2 + 1$
$T_5(x)$	$16x^5 - 20x^3 + 5x$
$T_6(x)$	$32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1$
$T_7(x)$	$64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$
$T_8(x)$	$128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1$
$T_9(x)$	$256x^9 - 576x^7 + 432x^5 - 120x^3 + 9x$
$T_{10}(x)$	$512x^{10} - 1280x^8 + 1120x^6 - 400x^4 + 50x^2 - 1$

Восстановление функции по последовательности ее линейных функционалов

Любая функция $f(x)$ может быть представлена с помощью многочлена степени n и остаточного члена в виде бесконечной суммы [1]

$$f(x) = Q_n^f(x) + \sum_{r=n}^{\infty} L_r^f \psi_{r+1}^{(n)}(x) \quad (4)$$

Где

$$Q_n^f(x) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^{n+1} {}'' f(x_k) \left(1 + 2 \sum_{m=1}^n T_m(x_k) T_m(x) \right) \quad (5)$$

Асимптотический многочлен, основанный на полиномах Чебышева первого рода для системы точек $x \in [-1; 1]$ в выбранной системе узлов $x = \cos\left(\frac{k\pi}{n+1}\right)$. Символ $''$ обозначает, что $k=0$ и $k=n+1$ член последовательности необходимо умножить на $\frac{1}{2}$. [4].

Линейный функционал

$$L_r^f = \frac{1}{r+1} \sum_{k=0}^{r+1} {}'' (-1)^k f(x_k) \quad (6)$$

При $n=0$ получаем

$$f(x) = Q_0^f(x) + \sum_{r=0}^{\infty} L_r^f \psi_{r+1}^{(0)}(x) \tag{7}$$

Позволяющий восстановить функцию $f(x)$ по последовательности ее линейных функционалов $\{L_r^f\}_{r=n}^{\infty}$
 Функции $\psi_{r+1}^{(n)}(x)$ имеют вид [5]

$$\psi_{r+1}^{(n)}(x) = \sum_{m_j \geq n+1} \mu(2r_j + 1) B_{m_j}^{(n)}(x)$$

Где сумма является конечной, она распространяются на все делители m_j целое числа $r + 1$, удовлетворяющее условиям:

- 1) $m_j \geq n + 1$;
- 2) $r + 1 = (2r_j + 1)m_j$
- 3)

$$B_{m_j}^{(n)}(x) = \begin{cases} T_{m_j}(x), & \text{при } m_j = (2r_j + 1)(n + 1) \\ T_{m_j}(x) - T_{|l|}(x), & \text{при } m_j = 2r_j(n + 1) + l; \quad 0 \leq l \leq n \end{cases}$$

$\mu(d)$ – функция Мёбиуса, которая принимает значения:

$$\begin{cases} \mu(n) = 1 \\ \mu(n) = -1 \\ \mu(n) = 0 \end{cases}$$

Где $\mu(n) = 1$ – если разложение n на простые множители содержит их четное число и нет квадратов простых множителей;

$\mu(n) = -1$ – если множителей нечетное число и нет квадратов простых множителей;

$\mu(n) = 0$ – если есть квадраты простых множителей.

Для восстановления функции по ее линейным функционалам нужно степень многочлена положить равной нулю. Тогда для всех $x \in [-1; 1]$ будет справедливо разложение, которое можно назвать рядом Фурье-Чебышева [4]

$$f(x) = \frac{1}{2}(f(1) + f(-1)) + \sum_{r=0}^{\infty} L_r^f \psi_{r+1}^0(x) \tag{8}$$

Если представить все функции $\psi_{r+1}^{(n)}(x)$ через полиномы Чебышева, то часть матрицы до $n = 10$ будет выглядеть следующим образом:

Таблица 2 – Функции $\psi_{r+1}^{(n)} \forall x \in [-1,1], n = \overline{0,9}, r = \overline{1,10}$

n\r	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	T_1	$T_2 - T_0$	$T_3 - T_1$	$T_4 - T_0$	$T_5 - T_1$	$T_6 - T_2$	$T_7 - T_1$	$T_8 - T_0$	$T_9 - T_3$	$T_{10} - T_2$
1		T_2	$T_3 - T_1$	$T_4 - T_0$	$T_5 - T_1$	$T_6 - T_2$	$T_7 - T_1$	$T_8 - T_0$	$T_9 - T_3$	$T_{10} - T_2$
2			T_3	$T_4 - T_2$	$T_5 - T_1$	$T_6 - T_0$	$T_7 - T_1$	$T_8 - T_2$	$T_9 - T_3$	$T_{10} - T_2$
3				T_4	$T_5 - T_3$	$T_6 - T_2$	$T_7 - T_1$	$T_8 - T_0$	$T_9 - T_1$	$T_{10} - T_2$
4					T_5	$T_6 - T_4$	$T_7 - T_3$	$T_8 - T_2$	$T_9 - T_1$	$T_{10} - T_0$
5						T_6	$T_7 - T_5$	$T_8 - T_4$	$T_9 - T_3$	$T_{10} - T_2$
6							T_7	$T_8 - T_6$	$T_9 - T_5$	$T_{10} - T_4$
7								T_8	$T_9 - T_1$	$T_{10} - T_6$
8									T_9	$T_{10} - T_8$
9										T_{10}

Разложение функции $f(x)$ в ряд по линейным функционалам с учетом вида функций $\psi_{r+1}^0(x)$ можно представить следующим образом

$$f(x) = Q_0^f + L_0^f T_1(x) + L_1^f (T_2(x) - T_0) + L_2^f (T_3(x) - T_1(x)) + L_3^f (T_4(x) - T_0) + L_4^f (T_5(x) - T_1(x)) + L_5^f (T_6(x) - T_2(x)) + \dots \quad (9)$$

Сходимость ряда (7) зависит от дифференциальных свойств подынтегральной функции, и определяется теоремами Берштейна, которые дают возможность по скорости убывания последовательности [4]:

$$E_0^f \geq E_1^f \geq E_2^f \geq \dots$$

Судить о дифференциальных свойствах функции $f(x)$ для которой E_n^f является наибольшими отклонениями соответствующих полиномов наилучшего равномерного приближения.

Теорема 1

Пусть наибольшее отклонение E_n^f функции $f(x) \in C_{[a,b]}$ удовлетворяет неравенству

$$E_n^f \leq \frac{A}{n^\alpha}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

Если $\alpha < 1$ то на всяком сегменте $[a', b']$ целиком содержащемся в промежутке $[a, b]$ функция $f(x)$ входит в класс $Lip \alpha$ Если же $\alpha = 1$ то на всяком таком сегменте $f(x)$ входит в класс W , если

$$\omega(\delta) \leq A\delta(1 + |\ln \delta|)$$

Теорема 2

Если выполняется неравенство

$$E_n^f \leq \frac{A}{n^{p+\alpha}}$$

Где p – натуральное число, $0 \leq \alpha \leq 1$ то во всех точках интервала (a, b)

Существует производная $f^{(p)}(x)$. При этом если $\alpha < 1$, то $f^{(p)}(x)$ на всяком сегменте $[a', b']$ целиком содержащемся в промежутке $[a, b]$ функция $f(x)$ входит в класс $Lip \alpha$, если же $\alpha = 1$, то на всяком таком сегменте $f(x)$ входит в класс W

Скорость убывания наибольших отклонений аналитических функций, класса $A_{[a,b]}$ характеризуется следующей теоремой.

Теорема 3

Пусть $f(x)$ есть непрерывная функция, заданная на сегменте $[a, b]$, а E_n^f ее наибольшее отклонение при приближении полиномами $P(x)$. Для того, чтобы $f(x) \in A_{[a,b]}$ необходимо и достаточно, чтобы было

$$E_n^f < Kq^n$$

Где $K = \text{const}$ и $q < 1$ а условие

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{E_n^f} = 0$$

Является необходимым и достаточным для того, чтобы функция $f(x)$ была целой.

Решение определенного интеграла будет определяться формулой

$$I = \int_{-1}^1 f(x) dx = \int_{-1}^1 Q_n^f(x) dx + \int_{-1}^1 \sum_{r=n}^{\infty} L_r^f \psi_{r+1}^{(n)}(x) dx \quad (10)$$

Или

$$I = \int_{-1}^1 f(x) dx = f(+1) + f(-1) + \sum_{r=0}^{\infty} L_r^f \bar{\psi}_{r+1}^{(0)} \quad (11)$$

Где $\bar{\psi}_{r+1}^{(0)} = \int_{-1}^1 \psi_{r+1}^{(0)}(x) dx$

Учитывая выражения для функций $\psi_{r+1}^{(n)}(x)$ согласно таблице 2, приведем значения функций $\bar{\psi}_{r+1}^{(0)}$ до $n = 10$ причем для нечетных $r + 1$ значения $\bar{\psi}_{r+1}^{(0)} = 0$

Таблица 3 – Функции $\psi_{r+1}^{(0)}(x)$ и интегралы $\bar{\psi}_{r+1}^{(0)} = \int_{-1}^1 \psi_{r+1}^{(0)}(x)dx$

$r + 1$	$\psi_{r+1}^{(0)}(x)$	$\int_{-1}^1 \psi_{r+1}^{(0)}(x)dx$
2	$T_2(x) - T_0$	$-\frac{8}{3}$
4	$T_4(x) - T_0$	$-\frac{32}{15}$
6	$T_6(x) - T_2(x)$	$\frac{64}{105}$
8	$T_8(x) - T_0$	$-\frac{128}{63}$
10	$T_{10}(x) - T_2(x)$	$\frac{64}{99}$

Следовательно, квадратурная формула (11) примет вид

$$\int_{-1}^{+1} f(x)dx = f(1) + f(-1) - \frac{8}{3}L_1^f - \frac{32}{15}L_3^f + \frac{64}{105}L_5^f - \dots \quad (12)$$

Данная формула может быть обобщена на промежуток $[a, b]$ с помощью соотношения

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2} \int_{-1}^1 f\left(\frac{b-a}{2}x + \frac{(b+a)}{2}\right)dx; a \leq t \leq b, \quad (13)$$

Программа на базе Microsoft Excel

Рассмотрим работу программы. Вычислим интеграл $\int_{-1}^1 e^x dx$.

Основная страница программы содержит четыре основных строки (рисунок 1);

A	B	C	D	E
	a	-1		
	b	1		
	$f(a)$	0,367879441		
	$f(b)$	2,718281828		
	Integral	2,350402387287		

Рис. 1 – Главная страница программы

В соответствующие строки вводятся пределы интегрирования и необходимая функция по правилу ввода функций для MS Excel. В четвертой строке получаем значение интеграла. Формула значения интеграла выглядит следующим образом (рисунок 2);

A	B	C	D	E
	a	-1		
	b	1		
	$f(a)$	0,367879441		
	$f(b)$	2,718281828		
	Int	$= (C4 - C3) / 2 * (C5 + C6 + Tn!L15)$		

Рис. 2 – Формула, заложенная в вычислении интеграла в MS Excel

Что соответствует формуле (12) с учетом формулы (13)

Сумма $\sum_{r=0}^{\infty} L_r^f \tilde{\psi}_{r+1}^{(0)}$ вычисляется на последующих листах. Для начала вычисляем сумму линейных функционалов. Составляем матрицы $x_k, f(x_k), \sum_{k=0}^{r+1} (-1)^k f(x_k)$. По вертикали идут числа $k = \overline{0; 11}$, по горизонтали $r = \overline{0; 10}$ (рисунок 3-5);

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-1	1										
2	x_k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
4	1	-1,000000	0,000000	0,500000	0,707107	0,809017	0,866025	0,900969	0,923880	0,939693	0,951057	0,959493
5	2		-1,000000	-0,500000	0,000000	0,309017	0,500000	0,623490	0,707107	0,766044	0,809017	0,841254
6	3			-1,000000	-0,707107	-0,309017	0,000000	0,222521	0,382683	0,500000	0,587785	0,654861
7	4				-1,000000	-0,809017	-0,500000	-0,222521	0,000000	0,173648	0,309017	0,415415
8	5					-1,000000	-0,866025	-0,623490	-0,382683	-0,173648	0,000000	0,142315
9	6						-1,000000	-0,900969	-0,707107	-0,500000	-0,309017	-0,142315
10	7							-1,000000	-0,923880	-0,766044	-0,587785	-0,415415
11	8								-1,000000	-0,939693	-0,809017	-0,654861
12	9									-1,000000	-0,951057	-0,841254
13	10										-1,000000	-0,959493
14	11											-1,000000

Рис. 3 – Матрица вычислений x_k

$f(x_k)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282	2,718282
1	0,367879	1,000000	1,648721	2,028115	2,245699	2,377443	2,461987	2,519044	2,559195	2,588443	2,610373
2		0,367879	0,606531	1,000000	1,362086	1,648721	1,865427	2,028115	2,151240	2,245699	2,319272
3			0,367879	0,493069	0,734168	1,000000	1,249222	1,466214	1,648721	1,799997	1,924874
4				0,367879	0,445296	0,606531	0,800498	1,000000	1,189637	1,362086	1,514999
5					0,367879	0,420620	0,536070	0,682029	0,840593	1,000000	1,152940
6						0,367879	0,406176	0,493069	0,606531	0,734168	0,867348
7							0,367879	0,396976	0,464848	0,555556	0,660066
8								0,367879	0,390748	0,445296	0,519514
9									0,367879	0,386333	0,431170
10										0,367879	0,383087
11											0,367879

Рис. 4 – Матрица вычислений $f(x_k)$

$(-1)^k f(x_k)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141	1,359141
1	-0,183940	-1,000000	-1,648721	-2,028115	-2,245699	-2,377443	-2,461987	-2,519044	-2,559195	-2,588443	-2,610373
2		0,183940	0,606531	1,000000	1,362086	1,648721	1,865427	2,028115	2,151240	2,245699	2,319272
3			-0,183940	-0,493069	-0,734168	-1,000000	-1,249222	-1,466214	-1,648721	-1,799997	-1,924874
4				0,183940	0,445296	0,606531	0,800498	1,000000	1,189637	1,362086	1,514999
5					-0,183940	-0,420620	-0,536070	-0,682029	-0,840593	-1,000000	-1,152940
6						0,183940	0,406176	0,493069	0,606531	0,734168	0,867348
7							-0,183940	-0,396976	-0,464848	-0,555556	-0,660066
8								0,183940	0,390748	0,445296	0,519514
9									-0,183940	-0,386333	-0,431170
10										0,183940	0,383087
11											-0,183940
Суммы	1,175201	0,543081	0,133011	0,021897	0,002715	0,000270	0,000022	0,000002	0,000000	0,000000	0,000000
L_r^f	1,175201	0,27154	0,044337	0,005474	0,000543	0,000045	0,000003	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Рис. 5 – Матрица вычислений $(-1)^k f(x_k)$

Матрицу x_k необходимо составить с учетом формулы (11) (рисунок 6);

СУММ $\times \checkmark f_x = (\$B\$1-\$A\$1)/2*\text{COS}(A3*\text{ПИ}()/(\$B\$2+1))+(\$B\$1+\$A\$1)/2$												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-1	1										
2	x_k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	$= (\$B\$1-\$A\$1)/2*\text{COS}(A3*\text{ПИ}()/(\$B\$2+1))+(\$B\$1+\$A\$1)/2$			1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
4	$\text{COS}(\text{число})$			0,500000	0,707107	0,809017	0,866025	0,900969	0,923880	0,939693	0,951057	0,959493
5	2			-0,500000	0,000000	0,309017	0,500000	0,623490	0,707107	0,766044	0,809017	0,841254
6	3			-1,000000	-0,707107	-0,309017	0,000000	0,222521	0,382683	0,500000	0,587785	0,654861
7	4				-1,000000	-0,809017	-0,500000	-0,222521	0,000000	0,173648	0,309017	0,415415
8	5					-1,000000	-0,866025	-0,623490	-0,382683	-0,173648	0,000000	0,142315
9	6						-1,000000	-0,900969	-0,707107	-0,500000	-0,309017	-0,142315
10	7							-1,000000	-0,923880	-0,766044	-0,587785	-0,415415
11	8								-1,000000	-0,939693	-0,809017	-0,654861
12	9									-1,000000	-0,951057	-0,841254
13	10										-1,000000	-0,959493
14	11											-1,000000

Рис. 6 – формула, заложенная в матрице вычисления x_k

Далее идет расчет $\bar{\psi}_{r+1}^{(0)} = \int_{-1}^1 \psi_{r+1}^{(0)}(x) dx$. С помощью формулы Ньютона-Лейбница, подставляем значение первообразных функций $\psi_{r+1}^{(0)}(x)$ в пределах $a = -1$ и $b = 1$ (рисунок 7, 8);

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2	a,b	-1	1							
3	Значения первообразных			$r+1$	a	b	$\psi_{r+1}^{(0)}$	L_r^f	$L_r^f \bar{\psi}_{r+1}^{(0)}$	
4	T0	-1,000000	1,000000	1	0,5000000	0,5000000	0,0000000	1,17520119	0,00000000000000	
5	T1	0,5000000	0,5000000	2	1,3333333	-1,3333333	-2,6666667	0,27154032	-0,7241075130870	
6	T2	0,3333333	-0,3333333	3	-1,0000000	-1,0000000	0,0000000	0,04433686	0,00000000000000	
7	T3	-0,5000000	-0,5000000	4	1,0666667	-1,0666667	-2,1333333	0,00547424	-0,0116783796120	
8	T4	0,0666667	-0,0666667	5	-0,3333333	-0,3333333	0,0000000	0,00054293	0,00000000000000	
9	T5	0,1666667	0,1666667	6	-0,3047619	0,3047619	0,6095238	4,4977E-05	0,0000274147492	
10	T6	0,028571	-0,028571	7	-0,6666667	-0,6666667	0,0000000	3,1984E-06	0,00000000000000	
11	T7	-0,1666667	-0,1666667	8	1,0158730	-1,0158730	-2,0317460	1,9921E-07	-0,0000004047492	
12	T8	0,015873	-0,015873	9	0,6000000	0,6000000	0,0000000	1,1037E-08	0,00000000000000	
13	T9	0,1000000	0,1000000	10	-0,3232323	0,3232323	0,6464646	5,5059E-10	0,00000000003559	
14	T10	0,010101	-0,010101					$\sum_{r=0}^{10} L_r^f \bar{\psi}_{r+1}^{(0)}$	-0,735758882	

Рис. 7 – Матрица вычисления ряда Фурье-Чебышева – матрица вычисления ряда

СУММ $\times \checkmark f_x = 8*B2^5/5-8*B2^3/3+B2$										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2	a,b	-1	1							
3	Значения первообразных			$r+1$	a	b	$\psi_{r+1}^{(0)}$	L_r^f	$L_r^f \bar{\psi}_{r+1}^{(0)}$	
4	T0	-1,0000000	1,0000000	1	0,5000000	0,5000000	0,0000000	1,17520119	0,00000000000000	
5	T1	0,5000000	0,5000000	2	1,3333333	-1,3333333	-2,6666667	0,27154032	-0,7241075130870	
6	T2	0,3333333	-0,3333333	3	-1,0000000	-1,0000000	0,0000000	0,04433686	0,00000000000000	
7	T3	-0,5000000	-0,5000000	4	1,0666667	-1,0666667	-2,1333333	0,00547424	-0,0116783796120	
8	T4	$=8*B2^5/5-8*B2^3/3+B2$		5	-0,3333333	-0,3333333	0,0000000	0,00054293	0,00000000000000	
9	T5	0,1666667	0,1666667	6	-0,3047619	0,3047619	0,6095238	4,4977E-05	0,0000274147492	
10	T6	0,028571	-0,028571	7	-0,6666667	-0,6666667	0,0000000	3,1984E-06	0,00000000000000	
11	T7	-0,1666667	-0,1666667	8	1,0158730	-1,0158730	-2,0317460	1,9921E-07	-0,0000004047492	
12	T8	0,015873	-0,015873	9	0,6000000	0,6000000	0,0000000	1,1037E-08	0,00000000000000	
13	T9	0,1000000	0,1000000	10	-0,3232323	0,3232323	0,6464646	5,5059E-10	0,00000000003559	
14	T10	0,010101	-0,010101					$\sum_{r=0}^{10} L_r^f \bar{\psi}_{r+1}^{(0)}$	-0,735758882	

Рис. 8 – Матрица вычисления ряда Фурье-Чебышева – формула, заложенная в матрице

Сумма чисел, найденных путем произведения линейных функционалов L_r^f и значений интеграла от функций $\psi_{r+1}^{(0)}$ и является третьим слагаемым в формуле (12)

Сравним результаты вычисления определенных интегралов численным методом в программе с вычислением их формулой Ньютона-Лейбница

Таблица 4 – сравнение результатов вычисления интегралов Римана

I	$\int_a^b f(x)dx = \int_{-1}^1 Q_n^f(x)dx + \int_{-1}^1 \sum_{r=n}^{\infty} L_r^f \psi_{r+1}^{(n)}(x)dx$	$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$	Величина погрешности
$\int_{-1}^1 e^x dx$	2,350402387287	2,350402387288	$5,31 \cdot 10^{-12}$, %
$\int_1^5 \frac{\ln x}{x} dx$	1,295145186784	1,295145196990	$5,35 \cdot 10^{-10}$, %
$\int_{-3}^4 \frac{x+1}{x^2+1} dx$	2,840177566000	2,840177561597	$4,07 \cdot 10^{-10}$, %
$\int_{-1}^1 e^{x^2} dx$	2,925303333278	Не вычисляется	-
$\int_1^3 \sin(\sqrt[3]{x^2}) dx$	1,905611088087	Не вычисляется	-

Заключение

Результаты вычисления показывают, что численный метод решения интегралов Римана с помощью асимптотических многочленов, основанных на полиномах Чебышева, практически не уступает точным расчетам этих интегралов по формуле Ньютона-Лейбница. Особое преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет вычислять интегралы, подынтегральные функции которых не имеют первообразных. Преимущество программы на базе Microsoft Excel заключается в том, что она позволяет производить расчеты данным численным методом, без промежуточных вычислений, а также требуя при этом минимальное количество времени.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Авхадиев Ф.Г. Учебно-методическое пособие по численным методам анализа / Ф.Г. Авхадиев, Р.К. Губайдуллина, Р.Г. Насибуллин - Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2019. – 113 с.
2. Хованский А.Г. Полиномы Чебышева и их обращения / А.Г. Хованский // Mat. Pros., 2013, Issue 17, 93–106
3. Богомолова О.А. Табличный процессор Microsoft Excel: учебно-практическое пособие для бакалавров направления «Строительство» очной формы обучения / О.А. Богомолова, Н.А. Михайлова, А.Д. Скороходова ; М-во образования и науки Росс. Федерации, Волгоград: ВолГАСУ 2012.
4. Верещагин Н.К. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 1. Начала теории множеств / Н.К. Верещагин., А. Шень. – 4е изд., доп.- М.: МЦНМО, 2012. – 112 с
5. Грибкова В.П. Эффективные методы равномерных приближений, основанные на полиномах Чебышева / В.П. Грибкова. – М.: Издательство «Спутник+», 2017 – 194 с.
6. Бойков И.В. Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем: сб. ст VII междунар. Науч.-техн. Конф., посвящ. 70-летию Пензенского государственного университета (Россия г. Пенза, 22-25 октября 2013г.) / под ред. И.В. Бойкова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 246 с.
7. Степанов М.М. Аппроксимация функции : методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Информатика» / М.М. Степанов, Н.Н. Потапова, Т.В. Ерещенко. м-во образования и науки Росс. Федерации, Волгогр. Госу архит-строит.ун-т. – Электрон. Текстовые и граф. Дан. – Волгоград: ВолГАСУ, 2012
8. Тимербаев М.Р. Численные методы. Приближение функций. Численное интегрирование / М.Р. Тимербаев. Учебное пособие / Казань 2015 г – 92 с.
9. Водопьянов С.К. Интегрирование по Риману / С.К. Водопьянов: Учеб. Пособие / Новосиб. Гос. Ун-т. Новосибирск, 2012. 146 с.
10. Эверович Э.И. Вещественный и комплексный анализ / Э.И. Эверович. Учебное пособие в шести частях. Часть 2. Интегральное исчисление функций скалярного аргумента. / Минск 2006 г. – 189 с.

11. Mohammad A. Generalized Chebyshev polynomials of the second kind / A. Mohammad. Department of Mathematics, Noethwood University, Midland, MI, USA 2015, 9p

Список литературы на английском языке / References in English

1. Avkhadiyev F.G. Uchebno-metodicheskoe posobie po chislennym metodam analiza [Textbook on numerical methods of analysis] / F.G. Avkhadiyev, R.K. Gubaidullina, R.G. Nasibullin - Kazan: Kazan (Volga Region) Federal University, 2019. - 113 p. [in Russian]
2. Khovansky A.G. Polinomy Chebysheva i ih obrashheniya [Chebyshev polynomials and their inversions] / A.G. Khovansky // Mat. Pros., 2013, Issue 17, 93–106 [in Russian]
3. Bogomolova O.A. Tablichnyj processor Microsoft Excel: uchebno-prakticheskoe posobie dlja bakalavrov napravlenija «Stroitel'stvo» ochnoj formy obuchenija [Microsoft Excel spreadsheet processor: an educational and practical guide for bachelors in the field of "Construction" of full-time education] / O.A. Bogomolova, N.A. Mikhailova, A.D. Skorokhodova ; M-in Education and Science Ross. Federation, Volgograd: VolgGASU 2012. [in Russian]
4. Vereshchagin N.K. Lekcii po matematicheskoj logike i teorii algoritmov. Chast' 1. Nachala teorii mnozhestv [Lectures on mathematical logic and theory of algorithms. Part 1. The Beginnings of set theory] / N.K. Vereshchagin, A. Shen. - 4th ed., dop.-M.: ICNMO, 2012. - 112 p. [in Russian]
5. Gribkova V.P. Jeffektivnye metody ravnomernyh priblizhenij, osnovannye na polinomah Chebysheva [Effective methods of uniform approximations based on Chebyshev polynomials] / V.P. Gribkova. - M.: Sputnik+ Publishing House, 2017 - 194 p. [in Russian]
6. Boikov I.V. Analiticheskie i chislennye metody modelirovanija estestvenno-nauchnyh i social'nyh problem [Analytical and numerical methods of modeling of natural-scientific and social problems]: sat. st. VII International. Sci.-tech. Conf., dedicated. To the 70th anniversary of Penza State University (Penza, Russia, October 22-25, 2013) / edited by I.V. Boikov. - Penza : Publishing House of PSU, 2013. - 246 p. [in Russian]
7. Stepanov M.M. Approksimacija funkicii : metodicheskie ukazanija k laboratornym rabotam po discipline «Informatika» [Function approximation : guidelines for laboratory work in the discipline "Informatics"] / M.M. Stepanov, N.N. Potapova, T.V. Ereshchenko. m-in education and Science Ross. Federation, Volgogr. Gosyu arhit-builds.un-T. - Electron. Text and graph. Dan. - Volgograd: VolgGASU, 2012 [in Russian]
8. Timerbaev M.R. Chislennye metody. Priblizhenie funkciij. Chislennoe integrirovanie [Numerical methods. Approximation of functions. Numerical integration] / M.R. Timerbayev. Textbook / Kazan 2015 - 92 p. [in Russian]
9. Vodopyanov S.K. Integrirovanie po Rimanu [Riemann integration] / S.K. Vodopyanov: Textbook. Manual / Novosibirsk. State. Un-T. Novosibirsk, 2012. 146 p. [in Russian]
10. Everovich E.I. Veshhestvennyj i kompleksnyj analiz [Real and complex analysis] / E.I. Everovich. The textbook is in six parts. Part 2. Integral calculus of scalar argument functions. / Minsk 2006 – 189 p . [in Russian]
11. Mohammad A. Generalized Chebyshev polynomials of the second kind / A. Mohammad. Department of Mathematics, Noethwood University, Midland, MI, USA 2015, 9p

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.003>

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОТЕНЦИАЛА В ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКЕ

Научная статья

Трубаев Н.А.*

ORCID: 0000-0001-9863-2484,

Российский университет транспорта, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (trubaevn[at]umail.ru)

Аннотация

Определение масс составляющих Землю компонентов по гравиметрическим измерениям важно для поиска полезных ископаемых и построения геоида. Наибольший интерес представляют величины масс в приповерхностном слое в несколько километров. В статье приводится численный способ определения величин этих масс в пространстве дифференцируемых функций, используя математический метод потенциала. В отличие от большинства известных алгоритмов способ приводит к решению корректно поставленной задачи, имеющей единственное решение. Описанный алгоритм обобщает предложенный ранее способ определения масс составляющих Землю компонентов в пространстве дифференцируемых функций с глобального на региональный уровень. По результатам глобального расчета можно получить исходные данные для вычисления уточненных значений масс составляющих Землю компонентов в приповерхностном слое, глубина которого определяется площадью полевых измерений. Увеличение площади полевых измерений позволяет использовать предлагаемую аппроксимацию на большей глубине и определить с заданной точностью величины масс.

Ключевые слова: теория потенциала, гравиметрия, геоид.

APPLICATION OF THE POTENTIAL METHOD IN GRAVIMETRIC EXPLORATION

Research article

Trubaev N.A.*

ORCID: 0000-0001-9863-2484,

Russian University of Transport, Moscow, Russia

* Corresponding author (trubaevn[at]umail.ru)

Abstract

Determination of the mass of the components of the Earth by gravimetric measurements is important for the search for minerals and the modelling of a geoid. Of the most interest is the magnitude of the masses in the near-surface layer of several kilometers. The article presents a numerical method for determining the values of these masses in a space of differentiable functions using the mathematical method of potential. Unlike most of the known algorithms, the method leads to the solution of a correctly posed problem with a single solution. The described algorithm generalizes the previously proposed method for determining the masses of the components of the Earth in the space of differentiable functions from the global to the regional level. Based on the results of the global calculation, it is possible to obtain initial data for calculating the refined values of the masses of the components composing the Earth in the near-surface layer, the depth of which is determined by the area of field measurements. The increase in the area of field measurements makes it possible to use the proposed approximation at a greater depth and determine the mass values with a given accuracy.

Keywords: potential theory, gravimetry, geoid.

Введение

Ознакомиться с историей и современным состоянием вопроса можно в [1], [4], [20], [3]. Автор уже обращался к заявленной теме. В [22] предложен алгоритм построения гравитационной модели Земли и геоида. В статье описана его адаптация с глобального на региональный уровень.

Используя предельные свойства ньютоновского потенциала простого слоя (1) и ньютоновского потенциала двойного слоя (2):

$$V_{\underline{S}}(p, \varphi_a) = \frac{1}{2\pi} \int_{\underline{S}} \frac{\varphi_a(q)}{r(p, q)} dS_q, \quad \varphi_a \in C_0(\underline{S}), \quad (1)$$

$$W_{\underline{S}}(p, \varphi_b) = \frac{1}{2\pi} \int_{\underline{S}} \frac{\partial}{\partial n_q} \left(\frac{1}{r(p, q)} \right) \varphi_b(q) dS_q, \quad \varphi_b \in C_1(\underline{S}), \quad (2)$$

можно получить равенства (3) для гармонической в односвязной области Θ функции u [22], [6].

$$\delta u(p) = -W_S(p, u) + V_S \left(p, \frac{\partial u}{\partial n} \right), \quad \delta = \begin{cases} 2, & \text{если } p \in \Theta \setminus S \\ 0, & \text{если } p \notin \Theta \\ 1, & \text{если } p \in S \end{cases}, \quad (3)$$

где S – граница области Θ , $S \in C_1$.

Предельные выражения для области Θ_o

Рассмотрим область $\Theta_o = \Theta$, в каждой точке q_o границы S_o которой, $q_o \in S_o$, можно вписать шар одинакового диаметра h . Причем один из трех линейных размеров области Θ_o много меньше остальных двух. То есть Θ_o представляет собой искривленную в пространстве «лепешку одинаковой толщины h », скругленную по «краям», $S_o = S_a \cup S_b \cup S_s$, где пологие (то есть с большим радиусом кривизны в каждой точке) поверхности S_a, S_b – «стороны лепешки», S_s – поверхность скругления «по краям» диаметром h (рис. 1). Любая точка срединной поверхности S_c находится на одинаковом расстоянии $h/2$ от поверхностей S_a, S_b (рис. 1). Обозначим, линии ограничивающие S_a, S_b, S_c , как L_a, L_b, L_c соответственно, а нормали к S_a, S_b, S_c как n_a, n_b, n_c соответственно (n_a и n_b имеют направление внешнее к Θ_o , из двух возможных направлений n_c выберем направление близкое к n_a).

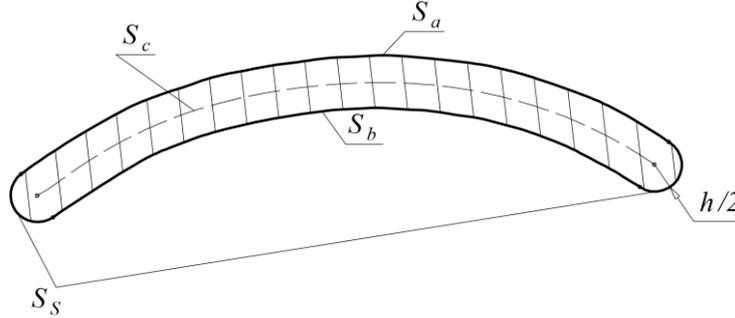


Рис. 1 – Одно из сечений области Θ_o

Рассмотрим решения задач Дирихле для областей Θ_o и $R_3 \setminus \Theta_o$ в виде потенциала простого слоя (1):

$$V_{S_o}(p, \varphi), \quad p \in \Theta_o, \tag{4}$$

$$V_{S_o}(p, \varphi), \quad p \in R_3 \setminus \Theta_o. \tag{5}$$

Так как интеграл в (1) является интегралом со слабой особенностью, непрерывной на S функцией, то существуют решения (4), (5) при одинаковой плотности φ , когда значения заданных в Θ_o и $R_3 \setminus \Theta_o$ гармонических функций совпадают на S_o .

Ниже мы используем предельные выражения нормальной производной на границе S_o гармонических функций, представленных потенциалами (4), (5). Значения гармонической функции в области $R_3 \setminus \Theta_o$ по граничным значениям ее нормальной производной (внешняя задача Неймана) определяются единственным образом; так как потенциал (5) удовлетворяет условию излучения, то по граничным значениям на S_o его нормальной производной можно определить сам потенциал.

Значения гармонической функции по граничным значениям ее нормальной производной в области Θ_o (внутренняя задача Неймана) определяются с точностью до константы, уравнение [22], (12) индекс «+», имеет решение τ_0 при нулевой правой части. Для него справедливо

$$V_{S_o}(p, \tau_0) = \tilde{c}, \quad p \in \Theta_o, \quad \tilde{c} - \text{константа.} \tag{6}$$

Производная от (6) равна нулю, константа \tilde{c} «исчезает» при дифференцировании.

В общем случае вид функции τ_0 не известен. В [18] показано, что в частном случае геометрии Θ_o (рис. 1) функция τ_0 равна константе, то есть

$$V_{S_o}(p, c_0) = c_1, \quad p \in \Theta_o, \tag{7}$$

где c_0, c_1 – константы.

Чтобы значения потенциала $V_{S_o}(p, \varphi)$ восстанавливались по граничным значениям его производной как в области $R_3 \setminus \Theta_o$, так и в области Θ_o , наложим условие на плотность φ (7):

$$\int_{S_o} \varphi(q) \tau_0(q) dS_o = \int_{S_o} \varphi(q) dS_o = 0. \tag{8}$$

Из условия (8) следует, что представляемая потенциалом $V_{S_o}(p, \varphi)$ гармоническая в Θ_o функция u ортогональна константе (7):

$$u(p) = V_{S_o}(p, \varphi), \quad \int_{\Theta_o} u(q) d\Theta_q = 0. \tag{9}$$

Пусть в некоторой области, включающей Θ_o , задана гармоническая функция \underline{u} , отвечающая условию (9), служащая граничными значениями задачи Дирихле на S_o при поиске решения в виде потенциала (4). Рассмотрим выражение потенциала (4) в точке $p_t \in S_c$ при $h \rightarrow 0$, когда каждая из поверхностей S_a, S_b стремится к S_c . То есть, если

$$\varphi(q) = \begin{cases} \varphi_a(q), & q \in S_a \\ \varphi_b(q), & q \in S_b \\ \varphi_s(q), & q \in S_s \end{cases},$$

$$\text{то при } \begin{cases} h \rightarrow 0 \\ S_a \rightarrow S_c \\ S_b \rightarrow S_c \\ S_s \rightarrow 0 \end{cases} \text{ выполняются } \begin{cases} q \rightarrow q_1, & q \in S_a, \quad q_1 \in S_c, \quad \varphi_a(q) \rightarrow \varphi_{ca}(q_1) \\ p \rightarrow p_1, & p \in S_b, \quad p_1 \in S_c, \quad \varphi_b(p) \rightarrow \varphi_{cb}(p_1) \\ V_{S_a}(p_t, \varphi_a) \rightarrow V_{S_c}(p_t, \varphi_{ca}) \\ V_{S_b}(p_t, \varphi_b) \rightarrow V_{S_c}(p_t, \varphi_{cb}) \end{cases}, \quad p_t \in S_c. \quad (10)$$

То есть

$$\lim_{h \rightarrow 0} V_{S_o}(p_t, \varphi) = \lim_{h \rightarrow 0} V_{S_a \cup S_b}(p_t, \varphi) = V_{S_c}(p_t, \varphi_{ca} + \varphi_{cb}) = \underline{u}(p_t), \quad p_t \in S_c. \quad (11)$$

Если условие (8) не выполнено, предел (11) не существует [18].) Ниже доказано, что при выполнении условия (9), равносильного условию (8), предел (11) существует.

Для потенциала $V_{S_c}(p, \varphi_c)$, $\varphi_c \in C_1(S_c)$, $p \in R_3$, в частности для $\varphi_c = \varphi_{ca} + \varphi_{cb}$ справедливы равенства для предельных значений нормальной производной [22], (12):

$$\left[\frac{\partial V_{S_c}(p_t, \varphi_c)}{\partial n_c(p_t)} \right]^{\pm} = \pm \varphi_c(p_t) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_c} \frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\frac{\varphi_c(p_t)}{r(p_t, q)} \right) dS_q, \quad (12)$$

$$\left[\frac{\partial V_{S_c}(p_t, \varphi_c)}{\partial n_c(p_t)} \right]^{-} - \left[\frac{\partial V_{S_c}(p_t, \varphi_c)}{\partial n_c(p_t)} \right]^{+} = -2\varphi_c(p_t), \quad (13)$$

$$\left[\frac{\partial V_{S_c}(p_t, \varphi_c)}{\partial n_c(p_t)} \right]^{-} + \left[\frac{\partial V_{S_c}(p_t, \varphi_c)}{\partial n_c(p_t)} \right]^{+} = \frac{1}{\pi} \int_{S_c} \frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\frac{\varphi_c(p_t)}{r(p_t, q)} \right) dS_q, \quad (14)$$

$$p_t \in S_c \setminus L_c.$$

Рассмотрим предельное изнутри Θ_0 значение на S_o нормальной производной от (4) в точке $p_a \in S_a \setminus L_a$ при $h \rightarrow 0$ с учетом [22], (12) индекс «+», (10):

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \left(\left[\frac{\partial V_{S_o}(p_a, \varphi)}{\partial n(p_a)} \right]^{+} \right) &= \lim_{h \rightarrow 0} \left(\varphi(p_a) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_o} \frac{\partial}{\partial n(p_a)} \left(\frac{\varphi(q)}{r(p_a, q)} \right) dS_q \right) = \\ &= \lim_{S_a \rightarrow S_c} \left(\varphi(p_a) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_a} \frac{\partial}{\partial n_a(p_a)} \left(\frac{\varphi_a(q)}{r(p_a, q)} \right) dS_q \right) + \\ &+ \lim_{S_b \rightarrow S_c} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{S_b} \frac{\partial}{\partial n_a(p_a)} \left(\frac{\varphi_b(q)}{r(p_a, q)} \right) dS_q \right) + \\ &+ \lim_{S_s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{S_s} \frac{\partial}{\partial n_a(p_a)} \left(\frac{\varphi_b(q)}{r(p_a, q)} \right) dS_q \right) = \\ &= \left(\varphi_{ca}(p_t) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_c} \frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\frac{\varphi_{ca}(q)}{r(p_t, q)} \right) dS_q \right) + \\ &+ \left(-\varphi_{cb}(p_t) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_c} \frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\frac{\varphi_{cb}(q)}{r(p_t, q)} \right) dS_q \right) + (0) = \\ &= \left(\varphi_{ca}(p_t) - \varphi_{cb}(p_t) \right) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_c} \frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\frac{\varphi_{ca}(q) + \varphi_{cb}(q)}{r(p_t, q)} \right) dS_q, \end{aligned} \quad (15)$$

где точка p_t – точка S_c , к которой стремится точка p_a при $h \rightarrow 0$, $S_a \rightarrow S_c$. То есть $p_a \rightarrow p_t$ при $h \rightarrow 0$, $S_a \rightarrow S_c$, где $p_a \in S_a \setminus L_a$, $p_t \in S_c \setminus L_c$. При вычислении второго предела (где $S_b \rightarrow S_c$) во втором равенстве (15) использовано равенство [22], (12) индекс «+». Также в (15) использовано, что нормаль n_a в пределе $h \rightarrow 0$ совпадает с n_c и противоположна n_b .

Так как потенциал $V_{S_o}(p, \varphi)$ в (15) является решением задачи Дирихле в области Θ_0 , то есть равен значениям гармонической функции $\underline{u}(p)$ во всех точках $p \in \Theta_0$, и функция \underline{u} , определенная в области, включающей Θ_0 , при вычислении предела $h \rightarrow 0$ не меняется, то предельное при условиях (10) значение левой части (15) равно значению производной от \underline{u} по направлению $n_c(p_t)$ в точке $p_t \in S_c$. То есть:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left(\left[\frac{\partial V_{S_o}(p_a, \varphi)}{\partial n(p_a)} \right]^{+} \right) = \frac{\partial \underline{u}(p_t)}{\partial n_c(p_t)}, \quad p_t \in S_c \setminus L_c. \quad (16)$$

Так как правая часть (16) конечна по постановке задачи, то левая часть также конечна, следовательно пределы в (15) существуют, плотности φ_{ca} , φ_{cb} конечны, поэтому предел (11) существует.

В частном случае, когда S_c – часть плоскости, второе слагаемое в последнем равенстве (15) равно нулю, следовательно, имея ввиду (12), где второе слагаемое правой части также равно нулю, существует потенциал $V_{S_c}(p, \tilde{\varphi})$, $\tilde{\varphi} = \varphi_{ca} - \varphi_{cb}$, для которого справедливо

$$\left[\frac{\partial V_{S_c}(p_t, \tilde{\varphi})}{\partial n(p_t)} \right]^+ = \tilde{\varphi}(p_t), \quad \left[\frac{\partial V_{S_c}(p_t, \tilde{\varphi})}{\partial n(p_t)} \right]^+ = \frac{\partial \underline{u}(p_t)}{\partial n_c(p_t)}, \quad p_t \in S_c \setminus L_c. \quad (17)$$

Следовательно

$$\left[\frac{\partial}{\partial n(p_t)} V_{S_c} \left(p_t, \frac{\partial \underline{u}(p_t)}{\partial n_c(p_t)} \right) \right]^+ = \frac{\partial \underline{u}(p_t)}{\partial n_c(p_t)}, \quad p_t \in S_c \setminus L_c, \quad (18)$$

где S_c – часть плоскости. При выполнении (9) из (17), (18) следует

$$V_{S_c} \left(p_t, \frac{\partial \underline{u}(p_t)}{\partial n_c(p_t)} \right) = \underline{u}(p_t), \quad p_t \in S_c \setminus L_c, \quad (19)$$

где S_c – часть плоскости. Из (11) следует $V_{S_c}(p_t, \varphi_{ca} + \varphi_{cb}) = \underline{u}(p_t)$, из (17), (19) следует $V_{S_c}(p_t, \varphi_{ca} - \varphi_{cb}) = \underline{u}(p_t)$, поэтому в рассматриваемом частном случае $\varphi_{cb}(p_t) = 0$, $p_t \in S_c \setminus L_c$.

Так как $V_{S_o}(p, \varphi) \in C_2(\Theta_o \cup S_o)$, поскольку $\underline{u} \in C_2(\tilde{\Theta})$, где $\tilde{\Theta}$ включает $\Theta_o \cup S_o$, то $\varphi \in C_1(S_o)$. Следовательно, $\varphi_{ca} \in C_1(S_c)$, $\varphi_{cb} \in C_1(S_c)$. Учитывая $\underline{u} \in C_2(L_c)$, мы можем экстраполировать равенство (19), справедливое в $p_t \in S_c \setminus L_c$, также в точки $p_t \in L_c$. На значения потенциала $V_{S_c}(p, \varphi_{ca})$ это не повлияет, так как $V_{S_c}(p, \varphi_k) = V_{S_c \setminus L_c}(p, \varphi_k)$, $\varphi_k \in C_1(S_c)$, $p \in R_3$. Таким образом из (19) получаем зависимость в точках поверхности S_c значений гармонической в Θ_o функции \underline{u} (11) от значений ее нормальной производной при выполнении условия (9):

$$V_{S_c} \left(p_t, \frac{\partial \underline{u}(p_t)}{\partial n_c(p_t)} \right) = \underline{u}(p_t), \quad p_t \in S_c, \quad (20)$$

где S_c – часть плоскости.

Из (9), (7) следует, что в (20) нормальная производная удовлетворяет условию:

$$\int_{S_c} \frac{\partial u(q)}{\partial n_c(q)} dS_q = 0. \quad (21)$$

Аппроксимация на основе равенств (3)

С помощью (20) по значениям нормальной производной на поверхности S_c можно определить значения гармонической функции на поверхности S_c . Построим численную процедуру определения приближенных значений гармонической функции u вблизи поверхности S_c по ее значениям и значениям ее нормальной производной на поверхности S_c на основе равенства (3) и оценим степень приближения.

Пусть поверхность S_c является частью гладкой границы \underline{S} односвязной области $\underline{\Theta}$, включающей в себя Землю, направление n_c – внешнее к $\underline{\Theta}$. Если известны значения гармонической $u(p)$ и ее нормальной производной $\partial u(p)/\partial n$, $p \in \underline{S}$, то (3) задает значения $u(p)$ во всех точках $p = \underline{p}$, $\underline{p} \in \underline{\Theta} \cup \underline{S}$. Если S_c – часть \underline{S} , в равенстве (3) для $p = p_t$, $p_t \in S_c$, присутствуют интегралы по всей поверхности \underline{S} . Значения $u(p_t)$, $\partial u(p_t)/\partial n_c(p_t)$, $p_t \in S_c$, связанные (20), мы знаем, следовательно можем вычислить

$$V_{S_c} \left(p_t, \frac{\partial u}{\partial n} \right), \quad W_{S_c} \left(p_t, u \right), \quad p_t \in S_c.$$

Поэтому с помощью (3) можем вычислить

$$\begin{aligned} A(p_t) &= \delta u(p_t) + W_{S_c} \left(p_t, u \right) - V_{S_c} \left(p_t, \frac{\partial u}{\partial n} \right) = \\ &= -W_{\underline{S} \setminus S_c} \left(p_t, u \right) + V_{\underline{S} \setminus S_c} \left(p_t, \frac{\partial u}{\partial n} \right), \quad \text{где } \delta = 1, \quad p_t \in S_c. \end{aligned} \quad (22)$$

Тогда

$$\delta u(\underline{p}) \approx -W_{S_c} \left(\underline{p}, u \right) + V_{S_c} \left(\underline{p}, \frac{\partial u}{\partial n} \right) + A(p_t), \quad (23)$$

где $\delta = 2$, точка $\underline{p} \in \underline{\Theta} \setminus \underline{S}$ расположена вблизи S_c , точка $p_t \in S_c$ – ближайшая к \underline{p} точка S_c . Иными словами, функция A аппроксимирована в (23) первым постоянным членом разложения Тейлора в p_t . Следовательно, точность приближения (23) определяется величиной второго члена этого разложения, соответствующего производной

$\partial A(p_t)/\partial x_i(p_t)$, $i = 1, 2, 3$. Так как поверхность S_c гладкая, и A соответствует интегралам по $\underline{S} \setminus S_c$, то наибольшее изменение A претерпевает вдоль вектора нормали n_c . Поэтому абсолютное значение второго члена разложения Тейлора ограничивается величиной $|e \partial A(p_t)/\partial n_c(p_t)|$, где e – расстояние от p_t до \underline{p} , ее можно оценить.

Пусть трехмерная односвязная область Θ_t с границей $S_t \in C_1$ является подобластью $\underline{\Theta}$, ограничивается S_c и любая ее точка отстоит от линии L_c на расстояние большее, чем R , тогда одному из сечений Θ_t соответствует заштрихованная область (рис. 2), где $R_E < R$, $R_G < R$. Для любой $\underline{p} \in \Theta_t$ справедливы оценки, соответствующие второму члену разложения Тейлора по направлению n_c (рис. 2):

$$\left| V_{\underline{S} \setminus S_c} \left(\underline{p}, \frac{\partial u}{\partial n} \right) - V_{\underline{S} \setminus S_c} \left(p_t, \frac{\partial u}{\partial n} \right) \right| < \frac{e K_R K_v}{R^3}, \quad (24)$$

$$\left| W_{\underline{S} \setminus S_c} \left(\underline{p}, u \right) - W_{\underline{S} \setminus S_c} \left(p_t, u \right) \right| < K_R K_w \left| \frac{1}{R^3} - 3 \frac{e^2}{R^5} \right|, \quad (25)$$

$\text{Max}\{|u(p)|, p \in \underline{S} \setminus S_c\}$, $K_v = \text{Max}\{|\partial u(p)/\partial n(p)|, p \in \underline{S} \setminus S_c\}$, $K_R = \int_{\underline{S} \setminus S_c} dS$. Входящие в (24), (25) параметры K_w , K_v могут быть получены из глобального расчета для области $\underline{\Theta}$ [22].

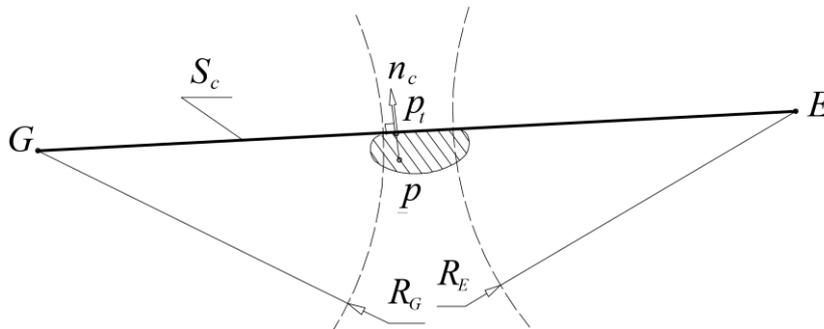


Рис. 2 – Аппроксимация формулой (23)

Примечание: точки G, E принадлежат линии L_c , ограничивающей поверхность S_c , R_G, R_E – расстояния от G, E .

Следовательно, $|A(p)|$ в (23) ограничивается суммой правых частей (24), (25), что определяет точность аппроксимации (23). Чем глубже от поверхности Земли мы хотим использовать аппроксимацию (23), тем больше должна быть площадь поверхности S_c , чтобы точки ограничивающей ее замкнутой кривой L_c были как можно дальше от рассматриваемых точек $\underline{p} \in \Theta_t$.

Решение обратной задачи

Если мы имеем результаты глобального расчета [22] для области $\underline{\Theta}$, мы знаем величины плотности $m(p)$, $p \in \underline{\Theta}$, $m \in C_1(\underline{\Theta})$, потенциала $\Upsilon_{\underline{\Theta}}(p, m)$ [22], (1), то есть, m – средняя плотность составляющих Землю компонентов в пространстве дифференцируемых функций. (В обозначении Υ_a индекс a соответствует области определения объемного ньютоновского потенциала Υ [22], (1).

Для получения уточненных значений m в локальной подобласти Θ_t области $\underline{\Theta}$ (обозначим эти уточненные значения m_t) используем аппроксимацию (23). В этом случае нам нет необходимости рассматривать всю область $\underline{\Theta}$ (то есть всю Землю), а только ее небольшую часть вблизи поверхности S_c (рис. 2), где подобласти Θ_t соответствует заштрихованная часть. Будем полагать, что из глобального расчета мы знаем значения m с достаточной точностью для проведения локального расчета, и что величины $m_t(p_t)$, $p_t \in S_t \cap S_c$, $\Omega_c(q)$, $q \in S_c$, где Ω_c – значения нормальной к S_c производной гармонической в $R^3 \setminus \underline{\Theta}$ функции, соответствующей силе тяжести, мы получили из полевых измерений. (То есть Ω_c – измеренные значения гравитационной составляющей силы тяжести поделенные на гравитационную постоянную с обратным знаком.)

Зададим функцию $\xi \in C_1(\Theta_t \cup S_t)$, отвечающую условиям:

$$\begin{cases} \xi(p_t) = m_t(p_t), & p_t \in S_t \cap S_c \\ \xi(p) = m(p), & p \in S_t \setminus (S_t \cap S_c) \end{cases}, \quad (26)$$

а также функцию $\xi_0 \in C_1(\Theta_t \cup S_t)$, $\xi_0 \neq 0$, отвечающую условию:

$$\xi_0(p) = 0, \quad p \in S_t.$$

Пусть $\underline{\Theta}_n$ – часть $\underline{\Theta}$, массы которой: $m(q)$, $q \in \underline{\Theta}_n$, порождают на S_c значения производной потенциала Υ численно не отличимые от константы:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Upsilon_{\underline{\Theta}_n}(p, m) \right) \approx c_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad p \in S_c,$$

c_i – константы. (То есть массы $m(q)$, $q \in \Theta_n$, расположены далеко от S_c , порождают в разных точках $p \in S_c$ значения силы тяжести, абсолютная величина разности которых ниже точности применяемой измерительной аппаратуры.) Обозначим $\Theta_v = \Theta \setminus \Theta_n$.

Вычислим константы

$$K = \int_{S_c} \left(\Omega_c(q) - \frac{\partial}{\partial n_c(q)} \left(\Upsilon_{\Theta_t}(q, \xi) + \Upsilon_{\Theta_v \setminus \Theta_t}(q, m) \right) - \sum_{i=1}^3 c_i n_{ci}(q) \right) dS_q,$$

$$K_0 = \int_{S_c} \frac{\partial}{\partial n_c(q)} \left(\Upsilon_{\Theta_t}(q, \xi_0) \right) dS_q,$$

где $n_{ci}(q)$ – компоненты вектора n_c , $i = 1, 2, 3$, в точке $q \in S_c$.

Определим функции

$$D(p_t) = \Omega_c(p_t) - \frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\Upsilon_{\Theta_t}(p_t, \xi + \xi_0 K/K_0) + \Upsilon_{\Theta_v \setminus \Theta_t}(p_t, m) \right) - \sum_{i=1}^3 c_i n_{ci}(p_t), \quad (27)$$

$$\underline{u}(p_t) = V_{S_c}(p_t, D), \quad p_t \in S_c. \quad (28)$$

Согласно формуле (20) значения \underline{u} , D в (28), (27) равны граничным значениям некоторой гармонической в Θ функции и ее нормальной производной соответственно, условие (21) выполнено,

$$\left[\frac{\partial \underline{u}(p_t)}{\partial n_c(p_t)} \right]^+ = D(p_t), \quad p_t \in S_c. \quad (29)$$

В равенстве (29) имеется ввиду предельное изнутри Θ значение нормальной производной на S_c от функции \underline{u} .

Поэтому для функции \underline{u} справедлива формула (3) и ее приближение (23). Причем, так как гармоническая функция \underline{u} , задаваемая в точках Θ_t формулой (3), не имеет в Θ_t источников, то

$$\int_{S_t} \frac{\partial \underline{u}(q)}{\partial n_t(q)} dS_q = 0,$$

где n_t – вектор нормали к S_t , совпадающий на S_c с вектором n_c .

Обозначим как \underline{u}_t приближенные значения \underline{u} , вычисленные по формуле (23). Для них справедливо

$$\int_{S_t} \frac{\partial \underline{u}_t(q)}{\partial n_t(q)} dS_q \approx 0.$$

Решим уравнение [22], (33) для области Θ_t (то есть при $\Theta = \Theta_t$ в [22], (33)) с правой частью:

$$\Psi(p) = - \left(\underline{u}_t(p) - \underline{c} \right), \quad p \in \Theta_t, \quad \underline{c} = \int_{\Theta_t} \underline{u}_t(q) d\Theta_q / \int_{\Theta_t} d\Theta_q$$

(условие [22], (32) выполнено), тогда для решения этого уравнения \underline{m} справедливо

$$\Upsilon_{\Theta_t}(p, \underline{m} - \underline{m}(p)) \approx \underline{u}(p) - \underline{c}, \quad p \in \Theta_t, \quad (30)$$

$$\frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\Upsilon_{\Theta_t}(p_t, \underline{m} - \underline{m}(p_t)) \right) \approx D(p_t), \quad p_t \in S_c \cap S_t. \quad (31)$$

Константа \underline{c} исчезает при дифференцировании и на величину нормальной производной не влияет. (Если бы аппроксимация (23) была не приближенной, а точной, константа \underline{c} равнялась бы нулю (9)).

Производная в левой части (31) непрерывна в точках $S_c \cap S_t$:

$$\left[\frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\Upsilon_{\Theta_t}(p_t, \underline{m} - \underline{m}(p_t)) \right) \right]^+ = \left[\frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\Upsilon_{\Theta_t}(p_t, \underline{m}) \right) \right]^-, \quad p_t \in S_c \cap S_t, \quad (32)$$

где индекс «+» соответствует стремлению из Θ , индекс «-» – стремлению из $R^3 \setminus \Theta$. Действительно, по причине аналогичной описанной в [22] решение \underline{m} должно удовлетворять условию [22], (36):

$$\underline{m}(q) = 0, \quad q \in S_t. \quad (33)$$

Значения \underline{u} , D в (28), (27) удовлетворяют предельному случаю формулы (20), то есть (30), (31) (с точностью до слагаемого-константы) соответствуют аппроксимации некоторой функции, гармонической в области Θ_0 , для которой поверхность S_c является срединной поверхностью. Откуда следует непрерывность первой и второй производных от (30) в точках $S_c \cap S_t$, что соответствует условиям:

$$\left[\frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\underline{m}(p_t) \right) \right]^+ = 0, \quad \left[\frac{\partial^2}{\partial^2 n_c(p_t)} \left(\underline{m}(p_t) \right) \right]^+ = 0, \quad p_t \in S_c \cap S_t. \quad (34)$$

(Строго говоря, аналогичные (34) условия должны выполняться на всей границе S_t , то есть функция \underline{m} должна иметь равные нулю предельные из Θ_t значения первой и второй нормальной производной в каждой точке S_t .) При выполнении (33), (34) выполняется (32).

Следовательно, результатом расчета являются величины уточненных значений масс m_t в области Θ_t :

$$m_t(p) = \underline{m}(p) + \xi(p) + \xi_0(p)K/K_0, \quad p \in \Theta_t, \quad (35)$$

для которых выполняется:

$$\Omega_c(p_t) = \frac{\partial}{\partial n_c(p_t)} \left(\Upsilon_{\Theta_t}(p_t, m_t) + \Upsilon_{\Theta_v \setminus \Theta_t}(p_t, m) \right) + \sum_{i=1}^3 c_i n_{c_i}(p_t), \quad p_t \in S_c \cap S_t.$$

Заключение

Описанный в статье алгоритм позволяет обобщить предложенный в [22] способ определения масс составляющих Землю компонентов в пространстве дифференцируемых функций с глобального на региональный уровень. По результатам глобального расчета [22] с помощью предельного соотношения (20) и аппроксимации (23) можно получить исходные данные для решения уравнения [22], (33), что позволяет вычислить уточненные значения масс составляющих Землю компонентов (35) в приповерхностном слое, глубина которого определяется площадью полевых измерений. Увеличение площади полевых измерений позволяет использовать аппроксимацию (23) на большей глубине и определить с заданной точностью величины масс. Точность расчета известна до его проведения. Решение уравнения [22], (33) является корректно поставленной задачей, имеющей единственное решение. Корректность постановки математической задачи является преимуществом предлагаемого алгоритма по сравнению с большинством известных. Результаты расчета можно использовать при поиске полезных ископаемых и уточнении параметров геоида.

Не претендуя на полноту обзора, рассмотрим сравнение предлагаемого алгоритма с некоторыми реализованными подходами оценки гравиметрических данных [7], [3], [19], [14].

Основным преимуществом предлагаемого алгоритма является сведение решения к корректно поставленной задаче, имеющей единственное решение, «центральная вычислительная задача гравиметрии» [15] решена. Нет необходимости проводить регуляризацию, устойчивость решения к ошибкам округления в процессе численного счета «обеспечивается» наличием первого слагаемого в [22], (33)]. То есть, не рассматривается интегральное уравнение Фредгольма первого рода, являющееся некорректно поставленной задачей, решение сводится к рассмотрению интегрального уравнения Фредгольма второго рода – корректно поставленной задаче. Поэтому единственное решение может быть получено устойчиво к ошибкам округления. Проводить «фильтрацию помех правой части» [3], [16], [17] нет необходимости. При этом Земля численно рассматривается как объемное трехмерное тело с гладкой поверхностью [22], «сведение» к какому-либо телу вращения не производится. При переходе на региональный уровень используется аппроксимация (23), глубина применения которой ограничивается только точностью измерительной аппаратуры, если плоскую поверхность S_c продолжить от заштрихованной области Θ_t (рис. 2) далеко от поверхности Земли, используя данные спутниковой гравиметрии. Нет необходимости априорных оценок [7], [2], [19], [14], рассматривается единственное в пределах Земли решение, точность которого определяется полнотой натуральных измерений и известна до проведения расчета.

Это единственное в пределах Земли решение обратной задачи гравиметрии при представлении величин масс составляющих Землю компонентов дифференцируемой функцией можно постоянно уточнять, используя полевые измерения величин этой функции на поверхности Земли и поверхностных и надповерхностных измерений силы тяжести, в чем заключается основная новизна и практическая ценность предлагаемого алгоритма.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Алексидзе М. А. Приближенные методы решения прямых и обратных задач гравиметрии / М. А. Алексидзе. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
2. Балк П. И. Аддитивные технологии количественной интерпретации гравитационных аномалий. / П. И. Балк, А. С. Долгаль // Геофизика. – 2016. – № 1. – С. 43-47.
3. Блох Ю. И. Интерпретация магнитных и гравитационных аномалий / Ю. И. Блох. - 2009. – [Электронный ресурс]. URL: <http://sigma3d.com/index.php/en/publications/books> (дата обращения: 12.11.2021)
4. Бровар В. В. Гравиметрия и геодезия / В. В. Бровар. – М.: Научный мир, 2010. – 560 с.

5. Бычков С. Г. Объемное моделирование геологических объектов по гравитационному полю на основе синтеза качественных и количественных методов интерпретации. / С. Г. Бычков, А. С. Долгаль, В. И. Костицын и др. // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 47-54.
6. Гюнтер Н. М. Теория потенциала и ее применение к основным задачам математической физики / Н. М. Гюнтер. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953. – 416 с.
7. Долгаль А. С. Размышления о структуре нового учебника по курсу “Гравиразведка” для студентов ВУЗов. / А. С. Долгаль, В. И. Костицын // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 88-93.
8. Заварзина Г. А. Результаты комплексного анализа аэрогравимангнитных и сейсморазведочных данных восточной части Восточно-Сибирского моря. / Г. А. Заварзина, Р. Р. Мурзин, О. А. Захарова и др. // Геофизика. – 2017. – № 4. – С. 69-75.
9. Каленицкий А. И. Еще раз о редуционных проблемах гравиметрии / А. И. Каленицкий // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2006. – Т. 3. – № 2. – С. 130-143.
10. Кашеев Р. А. Современные методы спутниковой гравиметрии / Р. А. Кашеев. – Казань: Казанский университет, 2015. – 45 с.
11. Кочнев В. А. Технология расчета плотностной и скоростной моделей и статических поправок по гравиметрическим данным. / В. А. Кочнев, И. В. Гоз, В. С. Поляков // Геофизика. – 2014. – № 1. – С. 2-7.
12. Михайлов А. А. Курс гравиметрии и теории фигуры Земли. – М.: РЕДБЮРО ГУГК при СНК СССР, 1939. – 432 с.
13. Молоденский М. С. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Земли / М. С. Молоденский. – М.: Наука, 2001. – 569 с.
14. Петрищевский А. М. Одно практическое следствие теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала. / А. М. Петрищевский // Геофизика. – 2020. – № 4. – С. 98-111.
15. Страхов В. Н. О центральной вычислительной задаче гравиметрии, магнитометрии, геодезии и геоинформатики. / В. Н. Страхов // Физика Земли. – 2008. – № 2. – С. 63-79.
16. Страхов В. Н. Как следует решать системы линейных алгебраических уравнений с симметрическими положительно полуопределенными матрицами, возникающие в задачах гравиметрии и магнитометрии. / В. Н. Страхов // Физика Земли. – 2012. – № 9-10. – С. 13-16.
17. Страхов В. Н. Будущее теории интерпретации гравитационных аномалий. / В. Н. Страхов // Физика Земли. – 2013. – № 6. – С. 151-168.
18. Трубаев Н. А. Применения теории ньютоновского потенциала / Трубаев Н. А. // Материалы XXIX Международной научно-практической конференции “Инновационные исследования как локомотив развития современной науки: от теоретических парадигм к практике”. 20 октября 2020 г., Москва: НИЦ МИСИ. – С. 163-185.
19. Чадаев М. С. Гравиметрическое изучение зоны арктического шельфа и континента. / М. С. Чадаев, В. И. Костицын, Р. Г. Ибламинов и др. // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 17-24.
20. Sjöberg L. E. Gravity inversion and integration. Theory and applications in geodesy and geophysics / L. E. Sjöberg, M. Bagherbandi. – New York: Springer, 2017. – 391 p.
21. Strakhov V. N. Change of epochs in Earth sciences / V. N. Strakhov // Russian journal of Earth sciences. – 2007. – Vol. 9. – No 1. – P. ES1001-19. DOI:10.2205/2007ES000217
22. Trubaev N. A. The numerical solving of one inverse problem of the theory of the Newtonian potential / N. A. Trubaev // Modern Science. – 2021. № 1-1, pp. 335-344.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Aleksidze M. A. Priblizhennyye metody resheniya priamykh i obratnykh zadach gravimetrii [Approximate methods for solving direct and inverse problems of gravimetry] / M. A. Aleksidze. – Moscow: Nauka, 1987. – 336 p. [in Russian]
2. Balk P. I. Additivnye tekhnologii kolichestvennoi interpretatsii gravitatsionnykh anomalii [The additive technologies of quantitative interpretation of the gravitational anomalies] / P. I. Balk, A. S. Dolgal' // Geofizika. – 2016. – №1. – P. 43-47. [in Russian]
3. Blokh Yu.I. Interpretatsiya magnitnykh i gravitatsionnykh anomalii [The interpretation of the magnetic and gravitational anomalies] / Yu.I. Blokh. - 2009. – [Electronic resource]. URL: <http://sigma3d.com/index.php/en/publications/books> (accessed: 12.11.2021) [in Russian]
4. Brovar B. V. Gravimetriia i geodeziia [Gravimetry and geodesy] / B. V. Brovar. – Moscow: Nauchnyi mir, 2010. – 560 p. [in Russian]
5. Bychkov S. G. Ob"emnoe modelirovanie geologicheskikh ob"ektov po gravitatsionnomu polyu na osnove sinteza kachestvennykh i kolichestvennykh metodov interpretatsii [3D modeling of geological objects based on the synthesis of qualitative and quantitative interpretation methods of the gravitational field] / S. G. Bychkov, A. S. Dolgal', V. I. Kostitsyn et al. // Geofizika. – 2015. – №5. – P. 47-54. [in Russian]
6. Gyunter N. M. Teoriya potentsiala i ee primenenie k osnovnym zadacham matematicheskoi fiziki [Potential theory and its application for basic problems of mathematical physics] / N. M. Gyunter. – Moscow: State Publishing house of tekhn and theoretical literature, 1953. – 416 p. [in Russian]
7. Dolgal' A. S. Razmyshleniya o strukture novogo uchebnika po kursu “Gravirazvedka” dlya studentov VUZov [Some ideas of the structure of the new textbook for the course "Gravimetric prospecting" for university students] / A. S. Dolgal', V. I. Kostitsyn // Geofizika. – 2014. – №5. – P. 88-93. [in Russian]
8. Zavarzina G. A. Rezul'taty kompleksnogo analiza aerogravimagnitnykh i seismorazvedochnykh dannykh vostochnoi chasti Vostochno-Sibirskogo moray [The results of the complex analysis of the aerogravimagnetic and seismic researches of the eastern part of East-Siberian sea] / G. A. Zavarzina, R.R. Murzin, O. A. Zakharova et al. // Geofizika. – 2017. – №4. – P. 69-75. [in Russian]
9. Kalenitskii A. I. Eshche raz o reduktsionnykh problemakh gravimetrii [Once again about the reduction problems of gravimetry] / A. I. Kalenitskii // Interekspos Geo-Sibir'. – 2006. № 3, 4, – P. 130-143 [in Russian]

10. Kashcheev R. A. *Sovremennye metody sputnikovoi gravimetrii* [The modern methods of satellite gravimetry] / R. A. Kashcheev. – Kazan: Kazanskii universitet, 2015. – 45 p. [in Russian]
11. Kochnev V. A. *Tekhnologiya rascheta plotnostnoi i skorostnoi modelei i staticheskikh popravok po gravimetricheskim dannym* [The technology of calculation of the density and velocity models and static corrections of the gravimetric data] / V. A. Kochnev, I. V. Goz, V. S. Polyakov // *Geofizika*. – 2014. – №1. – P. 2-7. [in Russian]
12. Mikhailov A.A. *Kurs gravimetrii i teorii figury Zemli* [Theoretical course of gravimetry and Earth shape]. – Moscow: REDBYuRO GUGK pri SNK SSSR, 1939. – 432 p. [in Russian]
13. Molodenskii M. S. *Gravitatsionnoe pole, figura i vnutrennee stroenie Zemli* [Gravitational field, figure and internal structure of the Earth] / M. S. Molodenskii. – Moscow: Nauka, 2001. – 569 p. [in Russian]
14. Petrishchevskii A. M. *Oдно практическое следствие теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала* [One practical consequence of the uniqueness and equivalence theorems of the inverse problems of gravitational potential] / A. M. Petrishchevskii // *Geofizika*. – 2020. – №4. – P. 98-111. [in Russian]
15. Strakhov V. N. *O tsentral'noi vychislitel'noi zadache gravimetrii, magnetometrii, geodezii i geoinformatiki* [The central computational problem of gravimetry, magnetometry, geodesy and geoinformation system] / V. N. Strakhov // *Fizika Zemli*. – 2008. – №2. – P. 63-79. [in Russian]
16. Strakhov V. N. *Kak sleduet reshat' sistemy lineinykh algebraicheskikh uravnenii s simmetricheskimi polozhitel'no poluopredelennymi matritsami, vznikayushchie v zadachakh gravimetrii i magnetometrii* [The way of solving of the systems of linear algebraic equations with symmetric positive semidefinite matrices in the problems of gravimetry and magnetometry] / V. N. Strakhov // *Fizika Zemli*. – 2012. – №9-10. – P. 13-16. [in Russian]
17. Strakhov V. N. *Budushchee teorii interpretatsii gravitatsionnykh anomalii* [The future of the theory of interpretation of the gravitational anomalies] / V. N. Strakhov // *Fizika Zemli*. – 2013. – №6. – P. 151-168. [in Russian]
18. Trubaev N. A. *The applications of the theory of the Newtonian potential* / Trubaev N. A. // *Materialy XXIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsionnye issledovaniya kak lokomotiv razvitiya sovremennoi nauki: ot teoreticheskikh paradig k praktike"*. 20 oktyabrya 2020 g., – Moscow: NITs MISI, 2020. – pp. 163-185.
19. Chadaev M. S. *Gravimetricheskoe izuchenie zony arkticheskogo shel'fa i kontinenta* [The gravimetric analysis of the Arctic shelf zone and the continent] / M. S. Chadaev, V. I. Kostitsyn, R. G. Iblaminov et al. // *Geofizika*. – 2017. – №5. – P. 17-24. [in Russian]
20. Sjoberg L. E. *Gravity inversion and integration. Theory and applications in geodesy and geophysics* / L. E. Sjoberg, M. Bagherbandi. – New York: Springer, 2017. – 391 p.
21. Strakhov V. N. *Change of epochs in Earth sciences* / V. N. Strakhov // *Russian journal of Earth sciences*. – 2007. – Vol. 9. – No 1. – P. ES1001-19. DOI:10.2205/2007ES000217
22. Trubaev N. A. *The numerical solving of one inverse problem of the theory of the Newtonian potential* / N. A. Trubaev // *Modern Science*. – 2021. № 1-1, – P. 335-344.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.004>

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛА TlGaSe_2

Научная статья

Хамхоев Б.М.¹, Торшхоева З.С.^{2,*}, Арчакова Р.³, Ужахова Л.Я.⁴, Евлов А.В.⁵, Ажигогова А.А.⁶¹⁻⁶ Ингушский государственный университет, Магас, Россия

* Корреспондирующий автор (torshhoeva.zina[at]yandex.ru)

Аннотация

С целью определения характера оптических переходов, авторами были проведены исследования в области края собственного поглощения TlGaSe_2 , измерялось пропускание и отражение при 300 К и 77 К, вычислен коэффициент поглощения. Результаты хорошо согласуются с расчетами зоны Бриллюэна. Показано, что длинноволновой край собственной полосы поглощения формируется непрямыми переходами ($Y \rightarrow \Gamma$). При 4,2 К в спектре в спектре поглощения наблюдается интенсивная линия поглощения $\lambda = 579,5$ нм (2,138 эВ). Можно сделать вывод, что в TlGaSe_2 край полосы собственного поглощения формируется прямым экситонным переходом, которому предшествует непрямо оптический переход. Исследования переходов, соответствующих краю собственной полосы поглощения TlGaSe_2 , показывают, что край формируется переходом между экстремальными точками зоны Бриллюэна, имеющими поляризационные особенности. Переходы происходят из близко расположенных нескольких уровней. TlGaSe_2 кристаллизуется в моноклинной структуре с пространственной группой C_c , то есть данные кристаллы обладают единственным элементом симметрии – плоскостью отражения σ , перпендикулярной слоям. Однако полученные нами экспериментальные результаты не объясняются данной симметрией кристалла.

Ключевые слова: поляризация, экситон, спектр, псевдобинарное, фонон, монокристалл, зона, моноклинная, симметрия.

AN INVESTIGATION OF OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF THE TlGaSe_2 SINGLE CRYSTAL

Research article

Khamkhoev B.M.¹, Torshkoeva Z.S.^{2,*}, Archakova R.³, Uzhakhova L.Ya.⁴, Evloev A.V.⁵, Azhigogova A.A.⁶¹⁻⁶ Ingush State University, Magas, Russia

* Corresponding author (torshhoeva.zina[at]yandex.ru)

Abstract

In order to determine the nature of optical transitions, the authors conducted studies in the self-absorption edge of TlGaSe_2 ; transmission and reflection were measured at 300 K and 77 K, the authors also calculated the absorption coefficient. The results are in good agreement with the calculations of the Brillouin zone. It is shown that the long-wave edge of the proper absorption band is formed by indirect transitions ($Y \rightarrow D$). At 4.2 K in the spectrum, an intense absorption line $\lambda = 579.5$ nm (2,138 eV) is observed in the absorption spectrum. It can be concluded that in TlGaSe_2 , the self-absorption edge is formed by a direct exciton transition, which is preceded by an indirect optical transition. Studies of transitions corresponding to the TlGaSe_2 self-absorption edge show that the edge is formed by a transition between extreme points of the Brillouin zone that have polarization features. Transitions occur from several levels located in close proximity to each other. TlGaSe_2 crystallizes in a monoclinic structure with the C_c space-group, which indicates that these crystals have a single element of symmetry – the reflection plane σ perpendicular to the layers. However, the experimental results obtained are not explained by this symmetry of the crystal.

Keywords: polarization, exciton, spectrum, pseudobinary, phonon, single crystal, zone, monoclinic, symmetry.

Введение

Соединение TlGaSe_2 относится к псевдобинарным соединениям класса $A^1B^3C_2^6$, обладающих различными физическими свойствами (фотоэлектрические, тензо свойствами, солнечные элементы...).

Особенностью развития современной физики твердого тела и твердотельной электроники является тенденция к использованию принципиально новых физических явлений, основанных на свойствах этих материалов, связанных с неупорядоченным характером структуры.

Среди соединений, которые можно объединить общей формулой $A^1B^3C_2^6$, особое место занимают кристаллы с цепочечной и слоистой структурой. Эти соединения проявляют высокую чувствительность в инфракрасной, видимой и рентгеновских областях спектра [1], [2], [3].

Благодаря этим свойствам соединения используются (и могут быть использованы) как функциональные элементы в системах оптоэлектроники в качестве фоторезисторов, фотоприемников, рентген-детекторов, детекторов ядерного излучения и др. [4], [5].

И они могут применяться в форме монокристаллов как источники возобновляемой энергии. Синтез и выращивание монокристаллов вышеуказанного соединения осуществляется методом Бриджмена-Стокбаргера, в графитизированных кварцевых ампулах специальной формы, покрытых спектрально чистым графитом. Выращенные кристаллы TlGaSe_2 имеют слоистую структуру, легко скалывающиеся до размеров 10-15 мкм. Это дает возможность изготавливать датчики, поверхности которых не требуют какой-либо обработки. Их поверхность имеет зеркальный характер.

Для получения монокристаллов TlGaSe_2 нами предварительно были синтезированы псевдобинарные соединения TlGaSe_2 , которые были получены прямым сплавлением исходных компонентов (Ga, Se, Tl). Чистота вышеперечисленных химических элементов была в пределах не менее 99,999% содержания основного компонента. Выращивание монокристаллов TlGaSe_2 производилось вертикальным методом Бриджмена-Стокбаргера. Полученные кристаллы были слоистыми с зеркальными поверхностями и легко скалывались до толщин 5-15 мкм. Естественно для их исследования

при подготовке образцов не требовалось никакой обработки. Контакты наносились на поверхность образцов изготовленные из индия и галлия, которые обладали хорошей омичностью.

При исследовании пропускания и многократного отражения одного и того же образца при 300 К и 77 К вычислен коэффициент поглощения с помощью формул. При этом учитывали, что когда свет падает на образец, имеющий форму плоскопараллельной пластинки, то может иметь место многократное отражение и если не наблюдается интерференция, и образец окружен средой, показатель преломления которой равен единице, то для коэффициента многократного отражения (r) и пропускания (T) легко можно получить следующие выражения [6]

$$r = R + \sum_{i=1}^{\infty} R^{(2i-1)} (1-R)^2 \exp(-2i\alpha K) \quad (1)$$

и

$$T = \sum_i R^{2(i-1)} (1-R)^2 \exp[-(2i-1)\alpha K] \quad (2)$$

где R - коэффициент отражения поверхности; α - коэффициент поглощения и K - толщина образца.

Как известно, для полупроводников $\chi^2 \ll n$ [7] (где n - показатель преломления, χ - показатель поглощения), поэтому просуммировав бесконечный ряд, стоящий в правой части выражений (1) и (2) и решая полученные уравнения относительно α и (T), находим:

$$\alpha = \frac{1}{2K} \ln \frac{R[R(r+2)+1]}{r-R} \quad (4)$$

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha K)}{1-R^2 \exp(-2\alpha K)} \quad (5)$$

Пользуясь (1) и (3), можно показать, что коэффициент многократного отражения связан с коэффициентом пропускания соотношением:

$$r = R[1 + T \exp(-\alpha K)] \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) и решая получившееся уравнение относительно R , получим

$$R = \frac{(T^2 - r^2 + 2r + 1) \pm \sqrt{T^2 - r^2 + 2r + 1^2 - 4r(2-r)}}{2(2-r)} \quad (6)$$

Так как R имеет одно значение, то следует выяснить, какой из двух знаков, стоящих перед корнем в выражении (6), имеет физический смысл. Оба знака дают для R положительное значение. Поэтому, чтобы выбрать нужный знак, приходится рассматривать дополнительные условия.

Мы остановимся на вопросе о знаке, который должен стоять перед корнем, поскольку в работах [8] не было проанализировано выражение (6) и перед корнем стоял знак «плюс». Учтем, что r и R являются величинами положительными, причем r всегда больше, чем R . При указанных условиях имеет место неравенство

$$\frac{R-r}{r} < 0 \quad (7)$$

Подставим вместо R выражение (6) и, приняв обозначения

$$\begin{aligned} t &= T^2 + 1 \\ S &= r(2-r) \end{aligned} \quad (8)$$

для $(R-r)/r$ получим

$$\frac{R-r}{r} = \frac{(t-S) \pm \sqrt{(t+S)^2 - 4S}}{2S} \quad (9)$$

Как следует из (8), t всегда больше единицы, а S положительно и не превышает единицу. Легко убедиться, что для выполнения условия (7) в выражении (9) или (6) перед корнем следует взять знак «минус», т. е.

$$R = R_- = \frac{(t - S) - \sqrt{(t + S)^2 - 4S}}{2S} \quad (10)$$

Если не наблюдается интерференция и $n^2 \gg \chi^2$, то, как и следует из выражений (4) и (10), определив экспериментальные значения r и T , можно найти R и α [7].

При вычислении коэффициента поглощения уравнения (4) и (10) решаются совместно на ПК с помощью специальных программ. При $T = 0,1$, $\alpha K > 1$, поэтому $\exp(-2\alpha K) \ll 1$. Тогда уравнение (4) приобретает вид:

$$\left| \alpha = \frac{1}{K} \ln \frac{(1-R)^2}{T} \right| \quad (11)$$

При $\alpha K > 1$ коэффициент поглощения можно определить из выражения (11) с ошибкой, не превышающей экспериментальную максимальную погрешность в определении коэффициента отражения и пропускания (2%) [8].

В результате всех этих преобразований приходим к зависимости:

$$\alpha = \frac{c}{h\nu} \left[\frac{h\nu - E'_g - h\nu_\phi}{1 - \exp\left(\frac{h\nu_\phi}{kT}\right)} + \frac{h\nu - E'_g + h\nu_\phi}{\exp\left(\frac{h\nu_\phi}{kT}\right) - 1} \right] \quad (12)$$

Согласно зависимости (12) полученные результаты проанализированы для разрешенных непрямых межзонных переходов и представлены на рис.1 в координатах $\sqrt{\alpha}$, $h\nu$ (кривые 1,2). Из рис. 1 б видно, что при 300 К спектр поглощения характеризуется двумя прямолинейными участками с несколькими различными наклонами (кривая 1). При 77 К длинноволновый прямолинейный участок исчезает (кривая 2), а при 4,2 К исчезает следующая ступенька поглощения и спектр начинается с интенсивной линии поглощения $\lambda = 579,5$ нм (кривая 3). На рис 1 б можно видеть, что зависимость $\sqrt{\alpha} = f(h\nu)$ хорошо аппроксимируется прямыми линиями согласно формуле (12). Экстраполяцией прямых к нулевым значениям коэффициента поглощения определены пороговая энергия непрямых переходов, равная 2,03 эВ и энергия фононов, участвующих в этих переходах, которая равна $0,024 \pm 0,002$ эВ. Характеристическая температура фотонов в монокристаллах TlGaSe_2 оказалась 278 К. Это значение хорошо согласуется со значением

193 см^{-1} , полученным для фононов методом комбинационного рассеяния света [8]. Эти экспериментальные результаты согласуются с расчетами зоны Бриллюэна, проведенными в [9], где показано, что длинноволновой край собственной полосы поглощения формируется непрямими переходами ($\text{Y} \rightarrow \Gamma$). Оптическое поглощение при 90 К на образцах толщиной 70 мкм при нормальном падении света на плоскость спайности в координатах $\alpha^2, h\nu$ представлено на рис.1 а, откуда видно, что при 90 К в длинноволновой области спектр поглощения имеет крутой подъем с ростом энергии падающих квантов (2,1 – 2,2) эВ и относительно слабо изменяется, начиная с энергии 2,12 эВ. С уменьшением температуры в длинноволновой области (2,12 – 2,2) эВ наблюдается некоторая структура. Максимум (2,13 эВ) спектров поглощения имеет хорошую воспроизводимость для всех образцов и согласуется с микроспектрограммами, полученными при 77 и 4,2 К (рис.1, кривые 2,3). Как следует из рис. 1 а (кривая 1), пороговая энергия прямых переходов при 90 К равна 2,22 эВ, а средний температурный коэффициент в интервале 77- 300 К равен $-2,7 \times 10^{-4}$ эВ/К. В образцах толщиной 25 мкм были наблюдаемы прямые переходы с пороговой энергией 2,34 эВ (рис. 1 а, кривая 2), что указывает на сложную структуру валентной зоны TlGaSe_2 . При 4,2 К в спектре поглощения наблюдается интенсивная линия поглощения $\lambda = 579,5$ нм (2,138 эВ) рис. 1 б). Структура длинноволнового края собственного поглощения монокристаллов TlGaSe_2 толщиной 200 и 20 мкм при 77 и 4,2 К представлена на рис.2. Из микрофотограммы спектров поглощения (кривая 1) видно, что при 77 К наблюдается полоса поглощения с $\lambda = 576,2$ нм (2,150 эВ). Полоса поляризована с электрическим вектором $\vec{E} // \text{Cл}$ ($\vec{E} \perp \text{C}$). При понижении температуры до 4,2 К эта полоса смещается в сторону меньших энергий до $\lambda = 579,5$ нм (2,138 эВ). Аналогичный температурный сдвиг наблюдался в монокристаллах TlGaS_2 [1] и в работе [4]. Мы согласны с мнением авторов работы [8], что положительный температурный коэффициент энергетического положения экситонных линий в температурном интервале 4,2 – 77 К связан с деформацией решетки. Кроме того, при 4,2 К появляется новая линия поглощения с $\lambda = 563,5$ нм (2,198 эВ). Обе линии поляризованы с электрическим вектором $\vec{E} \perp \text{Cл}$ ($\vec{E} // \text{C}$) (рис.1, кривая 2). При поляризации $\vec{E} \perp \text{Cл}$ видна еще слабая линия с $\lambda = 574,7$ нм (2,156 эВ) (рис. 1, кривая 3). На образцах толщиной 20 мкм при 77К оказалось возможным обнаружить в глубине собственного поглощения линию с $\lambda = 520,1$ нм (2,382 эВ) (рис.2, кривая 4). Для наблюдения длинноволновой части спектра кристалл оказался слишком тонким. Можно прийти к заключению, что в TlGaSe_2 край полосы собственного поглощения формируется прямым экситонным переходом, которому предшествует непрямой оптический переход.

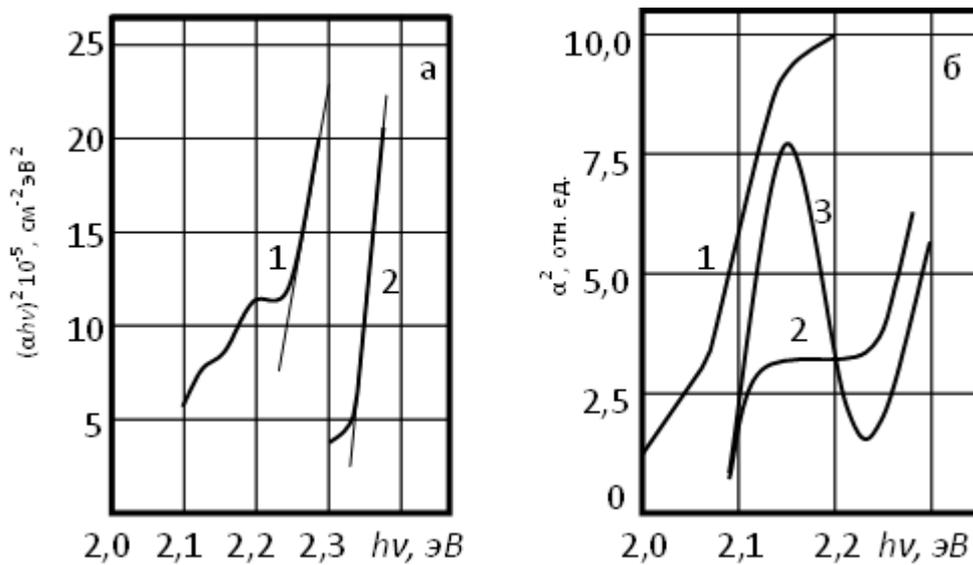


Рис. 1 – Спектральные зависимости коэффициента поглощения кристаллов TiGaSe₂: а) 1-K=70мкм; 2-K=25мкм; б) K=200мкм; 1-T=300К

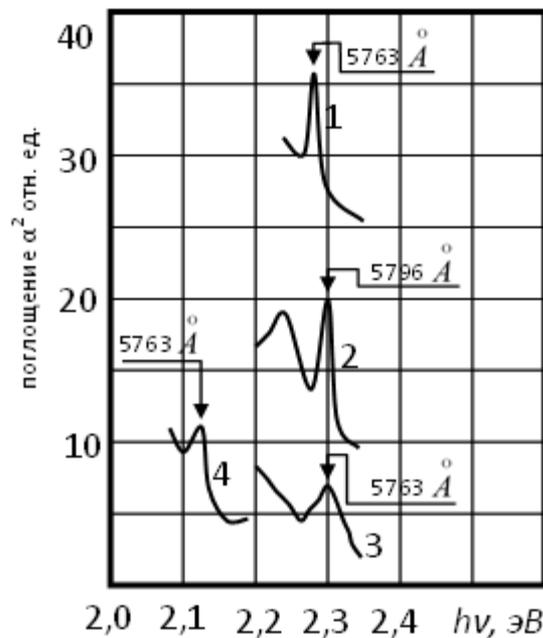


Рис. 2 – Микрофотограммы спектров поглощения кристаллов TiGaSe₂ толщиной 20мкм

В работе [2] в интервале температур 6 -100 К в монокристаллах TiGaSe₂ в области края собственной полосы поглощения зарегистрирована энергия для $\lambda = 579,5$ нм (2,138 эВ) структура, связанная с экситонным переходом. Эта структура при 6 К идентифицирована как прямой оптический переход в экситонное состояние с $n = 1$ и энергиями $E_{\text{экс.}} = 2,128$ эВ ($\vec{E} // \sigma$), $E_{\text{экс.}} = 2,154$ эВ ($\vec{E} \perp \sigma$).

При ориентации $\vec{E} // \sigma$ обнаружен еще один слабый пик поглощения с энергией $E = 2,160$ эВ. Предполагается, что он связан с переходом в первое возбужденное состояние экситона (здесь σ – плоскость симметрии). Как было указано выше, исследования проводились при $\vec{E} // \sigma$ и $\vec{E} \perp \sigma$. Неодинаковые условия эксперимента (различные ориентации вектора напряженности электрического поля света и температуры) затрудняют сопоставление наших результатов с результатами работы [2]. Если приблизительно считать $\vec{E} \perp \sigma$, что соответствует $\vec{E} \perp C$, то сравнение наших результатов при 4,2эВ с результатами авторов работы [2] при 6 К показывает, что они отличаются в пределах 0,001 – 0,002 эВ. Некоторые различия могут быть связаны с неодинаковыми деформациями исследуемых образцов. Отметим, что авторам работы [2] впервые удалось обнаружить линию поглощения при условии $\vec{E} // \sigma$ и не прямые переходы у длинноволнового края собственной полосы поглощения. Линии поглощения 579,5, 574,7, 563,5, 520,1 нм, как нам представляется, следует отнести к экситонным переходам. Можно полагать, что линия поглощения $\lambda = 520,1$ нм в монокристаллах TiGaSe₂ связана с прямыми переходами в экситонное состояние второй валентной подзоны. В нашем случае расстояние между подзонами равно 0,25 эВ (для GaS–0,3 эВ) [3]. Результаты экспериментальных исследований переходов, соответствующих краю собственной полосы поглощения TiGaSe₂, показывают, что край формируется переходом между экстремальными точками зоны Бриллюэна, имеющими поляризационные особенности. Переходы происходят из близко расположенных нескольких уровней. Согласно экспериментальным данным расстояние между

этим уровнями составляет 20, 200 и 250 мэВ. В работе [10] показано, что TlGaSe_2 кристаллизуется в моноклинной структуре с пространственной группой C_s , то есть данные кристаллы обладают единственным элементом симметрии – плоскостью отражения σ , перпендикулярной слоям. Однако полученные нами экспериментальные результаты не объясняются данной симметрией кристалла [10], [11], [12].

Выводы

В результате исследований установлено, что в монокристаллах TlGaSe_2 край полосы собственного поглощения формируется прямым экситонным переходом, ему предшествует не прямой оптический переход. Пороговые энергии прямых оптических переходов (при 300 К равна 2,17 эВ) и энергии образования экситонных состояний (при 77 К равны 2,150, 2,382 эВ ($\vec{E} \perp C$) и при 4,2 К 2,138, 2,198 эВ ($\vec{E} \perp C$) и 2,155 эВ ($\vec{E} // C$)).

В TlGaSe_2 край собственной полосы поглощения формируется переходами между экстремальными точками зоны Бриллюэна, имеющими поляризационные особенности. Это показывает, что кроме симметрии кристалла необходимо учитывать позиционную симметрию, например, симметрию слоя. Переходы происходят из близко расположенных уровней, расстояние между которыми составляет 20, 200, 250 мэВ.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Panich A.M. Physical Properties of the Low Dimensional A3B6 and A3B3C62 / A.M. Panich, R.M. Sardarly. Compounds (Nova Science Publishers, N.Y., 2010).
2. Sardarly R.M. Superionic conductivity in one-dimensional nanofibrous Tlgate2 crystals / R.M. Sardarly, O.A. Samedov, A.P. Abdullaev et al. // Jpn. J. Appl. Phys., 50, 1. 2011.
3. Sardarly R.M. Dielectric properties of Tlgate₂ crystals irradiated by γ -quants / P.M. Sardarly, O.A. Samedov, A. Sardarli et al. // Int. J. Theor. Appl. Nanotechnol., 1, 20. 2012.
4. Сардарлы Р.М. Импедансные характеристики облученных твердых растворов $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x} (\text{TlInS}_2)_x$ / Р.М. Сардарлы, Ф.Т. Салманов, Н.А. Алиева и др. // Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, вып. 6
5. Алексеев И.В. Патент № 80070 / И.В. Алексеев, С.В. Розов. 2009.
6. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / Ж. Панков. - М.: Мир.- 1973. – 451 с.
7. Мосс Т. Полупроводниковая оптоэлектроника / Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. – М.: Мир. - 1976. – 2428 с.
8. Кааби С. А. Д. Оптическое поглощение и комбинационное рассеяние света в легированных кристаллах TlGaSe_2 и TlInS_2 / С. А. Д. Кааби, Н. А. Дроздов, О. В. Королик // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2.
9. Abdullaeva S.G. Bond structure of TlGaSe_2 . / S.G. Abdullaeva, N.T. Mamedov, G.S. Orudzhev // Phys. St. Sol. (b). - 1983. - V.119. - №1. - P.41-43;
10. Хамхоев Б.М. Диаграммы состояния систем $\text{CuInS}_2\text{-TlInS}_2$, $\text{AgInS}_2\text{-TlInS}_2$ и твердых растворов на основе $\text{TlV}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ / Б.М. Хамхоев, З.С. Торшхоева, А.А. Ажигова и др. // Естественные и технические науки, Москва, №7(158), 2021 г.-С. 25-31;
11. Хамхоев Б.М. Термостимулированная проводимость и деполяризация монокристалла $\beta\text{-TlInS}_2$ / Б.М. Хамхоев, З.С. Торшхоева, А.А. Ажигова и др. // Естественные и технические науки, Москва, №7(158), 2021 г.-С. 18-24;
12. Матиев А.Х. Электропроводность одноосно-деформированных кристаллов $\text{Tl}_{1-x}\text{Ag}_x\text{InSe}_2 (0 \leq x \leq 0,03)$ / А.Х. Матиев, Р. Успажиев, Б.М. Хамхоев и др. // Прикладные и фундаментальные исследования. Посвящается 75-летию профессора Абдул-Хамида Махмудовича Бислиева. Сер. "3-й Международный симпозиум по инженерным наукам и наукам о Земле. Грозный, 2020 г.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Panich A.M. Physical Properties of the Low Dimensional A3B6 and A3B3C62 / A.M. Panich, R.M. Sardarly. Compounds (Nova Science Publishers, N.Y., 2010).
2. Sardarly R.M. Superionic conductivity in one-dimensional nanofibrous Tlgate2 crystals / R.M. Sardarly, O.A. Samedov, A.P. Abdullaev et al. // Jpn. J. Appl. Phys., 50, 1. 2011.
3. Sardarly R.M. Dielectric properties of Tlgate₂ crystals irradiated by γ -quants / P.M. Sardarly, O.A. Samedov, A. Sardarli et al. // Int. J. Theor. Appl. Nanotechnol., 1, 20. 2012.
4. Sardarly R.M. Impedansnye kharakteristiki obluchennykh tverdykh rastvorov $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x} (\text{TlInS}_2)_x$ [Impedance characteristics of irradiated solid solutions $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x} (\text{TlInS}_2)_x$] / R. M. Sardarly, F. T. Salmanov, N. A. Alieva, et al. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and Technology of Semiconductors], 2020, volume 54, issue 6 [in Russian]
5. Alekseev I.V. Patent No. 80070 / I.V. Alekseev, S.V. Rozov. 2009. [in Russian]
6. Pankov Zh . Opticheskie processy v poluprovodnikakh [Optical processes in semiconductors] / Zh. Pankov. - M.: Mir.- 1973. - 451 p. [in Russian]
7. Moss T. Poluprovodnikovaja optoelektronika [Semiconductor optoelectronics] / T. Moss, G. Burrell, B. Ellis. - M.: Mir. - 1976. - 2428 p. [in Russian]
8. Kaabi S. A. D. Opticheskoe pogloshhenie i kombinacionnoe rassejanie sveta v legirovannykh kristallakh TlGaSe_2 I TlInS_2 [Optical absorption and raman scattering of light in doped TlGaSe_2 and TlInS_2 crystals] / S. A. D. Kaabi, N. A. Drozdov, O. V. Korolik // Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Fizika [Bulletin of the Saratov University]. 2018. Vol. 18, issue 2; [in Russian]
9. Abdullaeva S.G. Bond structure of TlGaSe_2 . / S.G. Abdullaeva, N.T. Mamedov, G.S. Orudzhev // Phys. St. Sol. (b). - 1983. - V.119. - №1. - P.41-43;

10. Khamkoev B.M. Diagrammy sostojanija sistem CuInS₂-TlInS₂, AgInS₂-TlInS₂ i tverdykh rastvorov na osnove TIBIIIC₂VI [Diagrams of the state of CuInS₂-TlInS₂, AgInS₂-TlInS₂ systems and solid solutions based on TIB C C₂VI] / B. M. Khamkoev, Z. S. Torshkoeva, A. A. Azhigova, et al. // Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences], Moscow, No.7(158), 2021-pp. 25-31; [in Russian]

11. Khamkoev B.M. Termostimulirovannaja provodimost' i depoljarizacija monokristalla β-TlInS₂ [Thermally stimulated conductivity and depolarization of the β-TlInS₂ single crystal] / B. M. Khamkoev, Z. S. Torshkoev, A. A. Azhigova, et al. // Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences], Moscow, No.7(158), 2021-pp. 18-24; [in Russian]

12. Matiev A.H. Jelektroprovodnost' odnoosno-deformirovannyh kristallov Tl_{1-x}Ag_xInSe₂(0≤x≤0,03) [Electrical conductivity of uniaxially deformed crystals Tl_{1-x}Ag_xInSe₂(0≤x≤0.03)] / A. Kh. Matiev, R. Uspazhiev, B. M. Khamkoev, et al. // Prikladnye i fundamental'nye issledovanija [Applied and fundamental research]. Dedicated to the 75th anniversary of Professor Abdul-Hamid Makhmudovich Bisliev. "3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences. Grozny, 2020 [in Russian]

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.005>

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Научная статья

Аббасов И.Б.^{1,*}, Дешмух Р.Р.²

¹ ORCID: 0000-0003-4805-8714;

¹ Южный федеральный университет, Инженерно-технологическая академия, Таганрог, Россия;

² Университет Маратвады им. доктор Бабасахейб Амбекара, Аурангабад, Индия

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

Аннотация

Работа посвящена обзору современных исследований в области медицинской визуализации с использованием искусственного интеллекта, в частности для диагностики сердечно-сосудистой системы. Отмечена актуальность исследования, рассмотрены работы по существующим методам визуализации сердечно-сосудистой системы с использованием искусственного интеллекта. Проанализирована тематика современных исследований, подчеркивается возрастающее влияние современных мобильных технологий, позволяющих снять, передать данные удаленному эксперту для диагноза. Описаны работы, посвященные внедрению искусственной нейронной сети в медицинскую визуализацию, этапы глубокого обучения в области рентгенологии. Приведены работы по техническим аспектам применения трехмерной печати при лечении болезней сердца, также отмечены работы, посвященные применению виртуальной реальности при изучении анатомии сердца.

Ключевые слова: искусственный интеллект, медицинская визуализация, сердечно-сосудистая система, методы визуализации, компьютерная томография, 3d модель сердца, 3d печать сердца, виртуальная реальность.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR MEDICAL IMAGING

Research article

Abbasov I.B.^{1,*}, Deshmukh R.R.²

¹ ORCID: 0000-0003-4805-8714;

¹ Southern Federal University, Academy of Engineering and Technology, Taganrog, Russia;

² Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, Aurangabad, India

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

Abstract

The article reviews modern research in the field of medical imaging using artificial intelligence, in particular for the diagnosis of the cardiovascular system. The article notes the relevance of the research and examines research on existing methods of visualization of the cardiovascular system using artificial intelligence. The authors analyze the subject of modern research and emphasize the increasing influence of modern mobile technologies that allow for removing and transferring data to a remote expert for diagnosis. The study describes research works on the introduction of an artificial neural network in medical imaging, the stages of deep learning in the field of radiology. Also, the authors present research on the technical aspects of the use of three-dimensional printing in the treatment of heart diseases, as well as on the use of virtual reality in the study of the anatomy of the heart.

Keywords: artificial intelligence, medical imaging, cardiovascular system, imaging methods, computed tomography, 3d model of the heart, 3d printing of the heart, virtual reality.

Введение

Искусственный интеллект базируется на когнитивных свойствах, которые характерны для человеческого интеллекта. Для этого необходимо обучить систему мыслить разумно, как человек. Этот процесс зависит от базы предоставленных данных, их качества, а также используемого обучающего программного обеспечения. Искусственный интеллект может ускорить процесс сбора, анализа данных, повысить его качество, сократить время исследования и проведения оперативной диагностики. Это в свою очередь может улучшить процесс диагностики, повысить эффективность ухода за пациентами.

Искусственный интеллект помогает диагностировать болезни, сердечно-сосудистые заболевания и онкологические болезни. Значение искусственного интеллекта повысилось особенно в настоящее время борьбы с пандемией. Искусственный интеллект применяется для анализа рентгеновских снимков, ускоряя выявление признаков пневмонии у пациентов с COVID-19. Также системы распознавания и обеспечения общественной безопасности на основе искусственного интеллекта помогают выявлять в потоке людей с температурой. Это снижает нагрузку на врачей и количество потенциально опасных взаимодействий между пациентами.

В условиях пандемии процесс автоматической обработки огромного количества снимков осуществляется искусственным интеллектом, анализируется им, а потом уже данные верифицируются врачом-рентгенологом. При этом процесс может происходить не только на месте осуществления диагностики, как обычно, но также дистанционно, за сотни километров, или с использованием облачных технологий.

Разработка приложений искусственного интеллекта с большими базами изображений может упростить, ускорить процесс постановки диагноза. Однако искусственный интеллект не рекомендуется использовать для автоматической генерации управленческих решений, так как врач руководствуется клиническими, личными, и социальными аспектами каждого отдельного пациента. Поэтому итоговый диагноз должен проверяться, верифицироваться лечащим врачом.

В данной работе представлен обзор некоторых современных публикаций по применению искусственного интеллекта в области медицинской визуализации, конкретно в визуализации сердечно-сосудистой системы, так как эти болезни остаются в списке основных проблем здравоохранения современной человеческой цивилизации. Мы рассмотрим применяемые высокотехнологичные методы диагностики, роль искусственного интеллекта в данных методах, значимость трёхмерного моделирования, печати и виртуальной реальности в исследованиях сердечно-сосудистой визуализации. Данный обзор может помочь дополнить информацию по современным исследованиям с применением искусственного интеллекта для целей медицинской визуализации сердечно-сосудистой системы.

Методы визуализации сердечно-сосудистой системы

Рассмотрим сначала работы, посвященные современным методам медицинской кардиологической визуализации. В работе [1] представлены результаты исследования о применении различных видов эхокардиографии, магнитно-резонансной томографии сердечно-сосудистой системы, компьютерной, ядерной томографии сердца, ультразвуковых исследований сосудов европейскими организациями здравоохранения.

Статья [2] посвящена обзору существующих методов сердечно-сосудистой визуализации для диагностики ишемической болезни сердца. Методы ядерной кардиологии, стресс-эхокардиография, мультиспиральная компьютерная томография и магнитно-резонансная томография обладают высокими показателями чувствительности в верификации коронарной патологии. Одной из важных проблем современной медицины является ишемическая болезнь сердца вследствие высокой заболеваемости и смертности. Прогресс медицинской диагностики способствовал развитию методов сердечно-сосудистой визуализации, основанных на разных физических принципах (рентгеновское излучение, ультразвук, ядерно-магнитный резонанс) [3]. Обзор методов коронарной компьютерной томографии при изучении структуры и функции коронарных артерий представлен также в работе [4].

Искусственный интеллект в визуализации сердечно-сосудистой системы

В последние годы искусственный интеллект и, в частности, применение алгоритмов машинного обучения стали более продвинутыми в компьютерной томографии сердечно-сосудистой системы, позволив сделать процесс принятия решений более объективным, рациональным [5]. Искусственный интеллект базируется на использовании банка данных медицинской визуализации, на высокопроизводительной вычислительной инфраструктуре и прикладных алгоритмах [6].

В обзоре [7] представлена тематика наиболее актуальных статей международного журнала сердечно-сосудистой визуализации (The International Journal of Cardiovascular Imaging, за 2017) год по применению различных методов обследования (рис.1).

РЕНТГЕНОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	ЯДЕРНАЯ КАРДИОЛОГИЯ	ЭХО КАРДИОГРАФИЯ	МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ	КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ
<ul style="list-style-type: none"> • Внутрисосудистая визуализация • Биорезорбируемые сосудистые каркасы • Металлические стенты • Характеристика бляшек и тканей • Диагностика поражения сосудов 	<ul style="list-style-type: none"> • Кадмиево-цинковые теллуридные камеры для миокарда • Однофотонная эмиссионная компьютерная томография • Позитронно-эмиссионная томография • Визуализация при фибрилляции предсердий • Визуализация при инфекционном эндокардите 	<ul style="list-style-type: none"> • Сократительная функция миокарда левого желудочка • Диагностика размеров правого желудочка • 3D чреспищеводная эхокардиография • Машинное обучение для классификации инфаркта • Смартфон для снятия и передачи эхокардиографии 	<ul style="list-style-type: none"> • Заболевания аорты • Ишемическая болезнь сердца • Кардиомиопатия • Болезни перикарда • Врожденные пороки сердца • Приобретенные пороки сердца • Объемные образования сердца • Исследование легочных артерий 	<ul style="list-style-type: none"> • Визуализация перфузии миокарда с контрастным усилением • 3D-реконструкция, 3D-печать • Диагностика структурных изменений • Послеоперационная оценка коронарных стентов • Диагностика коронарных сосудов

Рис. 1 – Тематика актуальных статей по данным журнала The International Journal of Cardiovascular Imaging [7]

Как видно из рис.1, основными темами исследований в области сердечно-сосудистой визуализации остаются: рентгеновские исследования для диагностики стентов (каркасов), ядерная кардиология, эхокардиография, магнитно-резонансная и компьютерная томография. Эти методы позволяют не только диагностировать болезни сердечно-сосудистой системы, но создавать её трехмерную модель, для более точного диагностирования и планирования дальнейших хирургических вмешательств. Применению биорезорбируемых внутрисосудистых каркасов при лечении ишемической болезни сердца посвящен обзор [8].

Этапы применения искусственного интеллекта в кардиологии и визуализации сердца описываются в обзоре [9] (рис.2). При медицинской диагностике часто возникают проблемы со сроками, эффективностью, и своевременными диагнозами. Для применения искусственного интеллекта надо учитывать надежность данных, соответствующие вычислительные подходы и инструменты. Это подтверждается его клиническим применением для сегментации изображений, автоматизации измерений и, в конечном итоге, для автоматической выработки рекомендаций по диагнозу [10], [11].

На рис.2 представлены этапы применения искусственного интеллекта при проведении сердечно-сосудистой визуализации. Первый этап включает в себя сбор данных: по медицинским изображениям, записям, историям болезней, базам биоресурсов и генных исследований. Второй этап состоит из выбора вычислительных методов машинного обучения с учителем (контролируемые) и без учителя (неконтролируемые), также их комбинации. На третьем этапе используются приложения, компьютерные программы для визуализации с проведением оценки, уведомления, диагностики и прогнозирования.



Рис. 2 – Этапы применения искусственного интеллекта при сердечно-сосудистой визуализации [9]

Искусственный интеллект может снизить стоимость и повысить ценность на этапах получения изображений, их интерпретацию и принятия решений. Точность визуализации сердечно-сосудистой системы в сочетании с «большими данными» из электронной истории болезни позволит лучше охарактеризовать заболевание и персонализировать терапию.

В обзорной статье [12] представлены данные об истории развития и применения искусственной нейронной сети в медицинской визуализации. Благодаря развитию вычислительной мощности с помощью графических процессоров и доступности сбора больших объемов данных глубокая нейронная сеть превосходит возможности человеческого мозга, например, в задачах распознавания речи и компьютерного зрения [13], [14]. Эти возможности искусственного интеллекта всё чаще стали применяться в области медицины, включая компьютерную диагностику, прогнозирование заболеваний, сегментацию изображений, выработку рекомендаций (рис.3).



Рис. 3 – Этапы глубокого обучения в рентгенологии [12]

Работа [15] посвящена применению искусственного интеллекта, машинного обучения при компьютерной томографии сердца. Компьютерная томография-ангиография обеспечивает превосходную оценку ишемической болезни сердца, сочетая анатомическую и морфологическую оценку болезни для определения сердечно-сосудистого риска и принятия терапевтических решений [16]. Далее рассмотрим применение современных высокотехнологичных средств для исследования, диагностики сердечно-сосудистой системы: трехмерной печати и виртуальной реальности.

Трехмерная печать моделей сердца

В последнее время всё чаще в медицинской практике начали использовать возможности трехмерной печати органов и приспособлений для человека. Целью статьи [17] является обсуждение технических аспектов и текущие применения трехмерной печати при врожденных пороках сердца. Эта тема представляет собой привлекательную область для применения 3D-печатных моделей, и в последнее десятилетие наблюдается стабильный прогресс [18]. Современные 3D-модели могут воспроизводить сложную сердечную и внесердечную анатомию, включая мелкие детали с очень ограниченным диапазоном ошибок, поэтому этот инструмент может оказаться полезным при планировании хирургического или чрескожного лечения отдельных случаев ишемической болезни сердца [19].

Однако этапы построения 3D-моделей, состоящие из получения и выбора изображений, сегментации и печати, сильно зависят от квалификации оператора. На рис.4 представлены этапы трехмерной печати, начиная от рентгеновской визуализации для создания объемной модели до окончательной печати. Современные трехмерные модели могут быть жесткими или гибкими, но неспособными воспроизводить физиологические изменения во время сердечного цикла. Кроме того, высокая стоимость и длительное время сегментации и печати (до 24 часов) ограничивают более широкое его использование [20], [21]. В настоящее время опыт применения этих моделей ограничен незначительными случаями использования. Необходимы дополнительные данные для оценки диагностической точности и экономической эффективности 3D-печатных моделей при лечении заболеваний сердца.

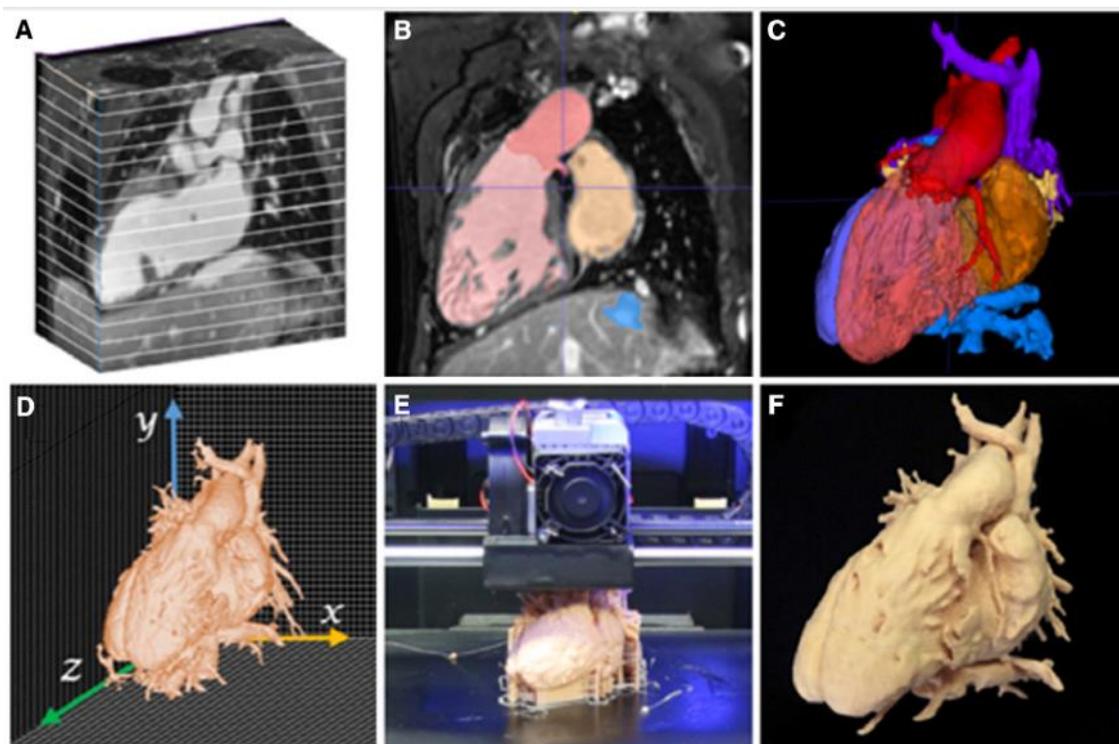


Рис. 4 – Этапы трехмерной печати:

А) рентгеновское изображение; В) сегментация; С) трехмерный объемный рендеринг; D) компьютерное проектирование; E) 3D-печать методом наплавленного моделирования; F) окончательная печатная модель [17]

Виртуальная реальность в изучении сердечно-сосудистой системы

Достижения в области виртуальной реальности позволяют врачам взаимодействовать с трехмерными визуализациями сердца при трехмерном стереоскопическом зрении [20], [22]. Применению виртуальной реальности при изучении анатомии врожденных пороков сердца посвящена работа [23]. На сегодняшний день не существует точная оценка применения этих технологий по сравнению со стандартными 2D-интерфейсами. В проведенном эксперименте одна группа обучающихся использовала 3D-гарнитуру виртуальной реальности для визуализации лекции с 3D-моделями сердца, другая контрольная группа использовала интерфейс настольного компьютера с теми же моделями [24].

У испытуемых с применением виртуальной реальности впечатление о своем понимании предмета было выше, чем у испытуемых на компьютере, следовательно, виртуальная реальность может повысить заинтересованность учащихся в освоении знаний об анатомии сердца (рис.5).

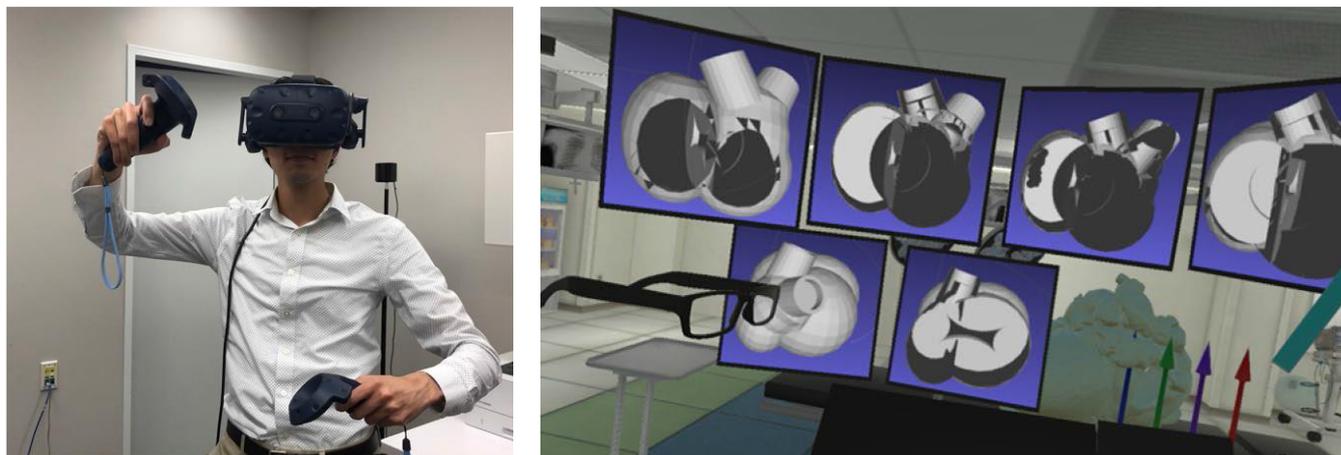


Рис. 5 – Испытуемый с головным дисплеем и ручными контроллерами для интерактивного взаимодействия (слева) и стереоскопическая виртуальная реальность (справа) позволяет пользователям вращать, перемещать, разрезать 3D-модели [23]

Отметим ещё некоторые работы по компьютерной томографии с применением описанных технологий. Работа [25] посвящена методам виртуального вскрытия наборов компьютерных томографических изображений для подробного изучения анатомии сердца. Результаты компьютерной томографии сердца пациентов с различными врожденными пороками описываются в работе [26]. Компьютерная томография предоставляет точные морфологические и функциональные данные, что позволяет повышать точность диагностики.

Анализ исследований

На современном этапе значимость применения искусственного интеллекта в медицинской визуализации растёт, особенно области изучения сердечно-сосудистой системы. Искусственный интеллект позволяет воссоздать трехмерную модель на основе послойного сканирования, что упрощает процесс диагностики и прогнозирования медицинских вмешательств. Всё чаще для оперативности начинают использовать привычные смартфоны для снятия, передачи информации, и получения заключения врача-эксперта, помогая лечащему врачу верифицировать конечный диагноз и последующий процесс лечения.

Ожидается, что потребность в визуализации сердечно-сосудистой системы возрастёт в ближайшие годы из-за изменений в эпидемиологии сердечно-сосудистых заболеваний и старения населения [27]. Таким образом, потенциал искусственного интеллекта в ближайшем будущем всё чаще будет использоваться врачом в качестве консультанта при принятии решения.

Заключение

В данной работе был сделан обзор современного состояния исследований в области визуализации сердечно-сосудистой системы. Были выделены работы, посвященные методам визуализации, особенности применения искусственного интеллекта в процессе подготовки, анализа данных для помощи лечащему врачу, что может ускорить постановку диагноза и повысить эффективность лечения. Системы виртуальной реальности, трёхмерной визуализации и печати позволяют врачу предварительно проверить будущие медицинские вмешательства, помогая ему своевременно выбрать методику лечения, подготовить дальнейшие рекомендации.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Lancellotti P. Cardiovascular imaging practice in Europe: a report from the European Association of Cardiovascular Imaging / P. Lancellotti, E. Płońska-Gościniak, M. Garbi et al. //European Heart Journal – Cardiovascular Imaging, 2015. V.16, Issue 7, P.697–702. DOI: 10.1093/ehjci/jev116
2. Никифоров В.С. Методы сердечно-сосудистой визуализации в диагностике ишемической болезни сердца / В.С. Никифоров // Consilium Medicum. 2017. Т.19. №1. С.18-24.
3. Achenbach S. The year in coronary artery disease / S. Achenbach, V. Dilsizian, C.M. Kramer et al. // JACC Cardiovascular Imaging, 2009. V.2 (6). P.774–86 DOI: 10.1016/j.jcmg.2009.01.017
4. Hennessey B. Contemporary use of coronary computed tomography angiography in the planning of percutaneous coronary intervention / B. Hennessey, R. Vera-Urquiza, H. Mejía-Rentería et al. //The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2020. V.36. P.2441–2459 DOI: 10.1007/s10554-020-02052-8
5. Obermeyer Z. Predicting the future - big data, machine learning, and clinical medicine / Z. Obermeyer, E.J. Emanuel //New England Journal of Medicine, 2016. V.375. P.1216–9. DOI: 10.1056/NEJMp1606181
6. Lee J.G. Deep learning in medical imaging: general overview/ J.G.Lee, S. Jun, Y.W. Cho, et al //Korean Journal of Radiology, 2017. V.18. P.570–584. DOI: 10.3348/kjr.2017.18.4.570
7. Reiber J.H. Cardiovascular imaging 2017 in the International Journal of Cardiovascular Imaging / J.H. Reiber, A. Alaiti, H.G. Bezerra et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2018. V.34. P. 833–848 DOI: 10.1007/s10554-018-1349-6

8. Плечев В.В. Биорезорбируемые внутрисосудистые каркасы. Обзорная статья / В.В. Плечев, И.Е. Николаева, И.В. Бузаев и др. // Креативная хирургия и онкология. 2017. №7 (4). С.53-62. DOI: 10.24060/2076-3093-2017-7-4-53-62
9. Dey D. Artificial Intelligence in Cardiovascular Imaging / D. Dey, P.J. Slomka, P. Leeson et al. // Journal of the American College of Cardiology, 2019, V.73, Issue 11, P.1317-1335 DOI: 10.1016/j.jacc.2018.12.054
10. Slomka P.J. Cardiac imaging: working towards fully-automated machine analysis & interpretation / P.J. Slomka, D. Dey, A. Sitek et al. // Expert Rev Med Devices, 2017. V.14. P.197–212 DOI: 10.1080/17434440.2017.1300057
11. Johnson K.M. Scoring of coronary artery disease characteristics on coronary CT angiograms by using machine learning / K.M. Johnson, H.E. Johnson, Y. Zhao et al. // Radiology, 2019. V.292. P.354–362 DOI: 10.1148/radiol.2019182061
12. Mingyu Kim. Deep Learning in Medical Imaging / Mingyu Kim, Jihye Yun, Yongwon Cho et al. // Neurospine, 2019, V.16 (4). P.657-668 DOI: 10.14245/ns.1938396.198
13. Gore R.W. LULC-Analysis of land-use with the help of unsupervised classification / R.W. Gore, A.D. Mishra, R.R. Deshmukh et al. // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2020. №3 (213). P.184-192 DOI: 10.18522/2311-3103-2020-3-184-192
14. Abbasov I.B. «Recognition and Perception of Images, Fundamentals and Applications» / I.B. Abbasov // Edited by Iftikhar B. Abbasov, Wiley-Scrivener, 2021, 464 p. ISBN: 9781119750550, DOI:10.1002/9781119751991
15. Brandt V. Ischemia and outcome prediction by cardiac CT based machine learning / V. Brandt, T. Emrich, U.J. Schoepf et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2020. V.36. P.2429–2439 DOI: 10.1007/s10554-020-01929-y
16. Singh G. Machine learning in cardiac CT: basic concepts and contemporary data / G. Singh, S.J. Al'Aref, M. Van et al. // Journal of Cardiovascular Computed Tomography, 2018. V.12. P.192–201 DOI: 10.1016/j.jcct.2018.04.010
17. Cantinotti M. Three-dimensional printed models in congenital heart disease / M. Cantinotti, I. Valverde, Sh. Kutty // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2017. V.33. P.137–144 DOI: 10.1007/s10554-016-0981-2
18. Farooqui K.M. Echocardiography and threedimensional printing: sound ideas to touch a heart / K.M. Farooqui, P. Sengputa // Journal American Society Echocardiography. 2015. V.28. P.398–403 DOI: 10.1016/j.echo.2015.02.005
19. Schmauss D. Three-dimensional printing in cardiac surgery and interventional cardiology: a single-centre experience / D. Schmauss, S. Haeberle, C. Hagl et al. // European Journal of Cardio-thoracic Surgery, 2015. V.47. P.1044–1052 DOI: 10.1093/ejcts/ezu310
20. Suárez-Mejías C. New technologies applied to surgical processes: virtual reality and rapid prototyping / C. Suárez-Mejías, G. Gomez-Ciriza, I. Valverde et al. // Studies Health Technology Inform, 2015. V.210. P.669–671
21. Vukicevic M. Cardiac 3D printing and its future directions / M. Vukicevic, B. Mosadegh, J.K. Min et al. // JACC Cardiovascular Imaging, 2017. V.10 (2) P.171–184 DOI: 10.1016/j.jcmg.2016.12.001
22. Ong C.S. Role of virtual reality in congenital heart disease / C.S. Ong, A. Krishnan, C.Y. Huang et al. // Congenital Heart Disease, 2018. V.13 (3). P.357-361 DOI: 10.1111/chd.12587
23. Patel N. Stereoscopic virtual reality does not improve knowledge acquisition of congenital heart disease / N. Patel, A. Costa, S.P. Sanders et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging. 07 Mar 2021, DOI: 10.1007/s10554-021-02191-6
24. Maresky H.S. Virtual reality and cardiac anatomy: exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education / H.S. Maresky, A. Oikonomou, I. Ali et al. // Clinical Anatomy, 2019. V.32 (2). P.238–243 DOI: 10.1002/ca.23292
25. Mori Sh. What Is the Real Cardiac Anatomy? / Sh. Mori, J.T. Tretter, D.E. Spicer et al. // Clinical Anatomy, 2019. V.32. P.288–309 DOI: 10.1002/ca.23340
26. Hyun Woo Goo. Computed tomography for the diagnosis of congenital heart disease in pediatric and adult patients / Hyun Woo Goo, In-Sook Park, Jae Kon Ko et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2005. V.21. P.347–365 DOI: 10.1007/s10554-004-4015-0
27. Fischer A.M. Accuracy of an artificial intelligence deep learning algorithm implementing a recurrent neural network with long short-term memory for the automated detection of calcified plaques from coronary computed tomography angiography / A.M. Fischer, M. Eid, C.N. De Cecco et al. // Journal of Thoracic Imaging, 2020. V.35. P. 49–57 DOI: 10.1097/RTI.0000000000000491

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lancellotti P. Cardiovascular imaging practice in Europe: a report from the European Association of Cardiovascular Imaging / P. Lancellotti, E. Płóńska-Gościńskiak, M. Garbi et al. // European Heart Journal – Cardiovascular Imaging, 2015. V.16, Issue 7, P.697–702. DOI: 10.1093/ehjci/jev116
2. Nikiforov V.S. Metody serdechno-sosudistojj vizualizacii v diagnostike ishemicheskojj bolezni serdca [Methods of cardiovascular imaging in the diagnosis of coronary heart disease] / V.S. Nikiforov // Consilium Medicum. 2017. Vol. 19. No. 1, pp.18-24 [in Russian]
3. Achenbach S. The year in coronary artery disease / S. Achenbach, V. Dilsizian, C.M. Kramer et al. // JACC Cardiovascular Imaging, 2009. V.2 (6). P.774–86 DOI: 10.1016/j.jcmg.2009.01.017
4. Hennessey B. Contemporary use of coronary computed tomography angiography in the planning of percutaneous coronary intervention / B. Hennessey, R. Vera-Urquiza, H. Mejía-Rentería et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2020. V.36. P.2441–2459 DOI: 10.1007/s10554-020-02052-8
5. Obermeyer Z. Predicting the future - big data, machine learning, and clinical medicine / Z. Obermeyer, E.J. Emanuel // New England Journal of Medicine, 2016. V.375. P.1216–9. DOI: 10.1056/NEJMp1606181
6. Lee J.G. Deep learning in medical imaging: general overview/ J.G.Lee, S. Jun, Y.W. Cho, et al // Korean Journal of Radiology, 2017. V.18. P.570–584. DOI: 10.3348/kjr.2017.18.4.570
7. Reiber J.H. Cardiovascular imaging 2017 in the International Journal of Cardiovascular Imaging / J.H. Reiber, A. Alaiti, H.G. Bezerra et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2018. V.34. P. 833–848 DOI: 10.1007/s10554-018-1349-6

8. Plechev V.V. Biorezorbiruemye vnutrisosudistye karkasy. Obzornaja stat'ja [Bioresorbable intravascular frameworks. Review article] / V.V. Plechev, I.E. Nikolaeva, I.V. Buzaev, et al. // Kreativnaja khirurgija i onkologija [Creative surgery and oncology]. 2017. №7 (4), pp.53-62. [in Russian]
9. Dey D. Artificial Intelligence in Cardiovascular Imaging / D. Dey, P.J. Slomka, P. Leeson et al. // Journal of the American College of Cardiology, 2019, V.73, Issue 11, P.1317-1335 DOI: 10.1016/j.jacc.2018.12.054
10. Slomka P.J. Cardiac imaging: working towards fully-automated machine analysis & interpretation / P.J. Slomka, D. Dey, A. Sitek et al. // Expert Rev Med Devices, 2017. V.14. P.197–212 DOI: 10.1080/17434440.2017.1300057
11. Johnson K.M. Scoring of coronary artery disease characteristics on coronary CT angiograms by using machine learning / K.M. Johnson, H.E. Johnson, Y. Zhao et al. // Radiology, 2019. V.292. P.354–362 DOI: 10.1148/radiol.2019182061
12. Mingyu Kim. Deep Learning in Medical Imaging / Mingyu Kim, Jihye Yun, Yongwon Cho et al. // Neurospine, 2019, V.16 (4). P.657-668 DOI: 10.14245/ns.1938396.198
13. Gore R.W. LULC-Analysis of land-use with the help of unsupervised classification / R.W. Gore, A.D. Mishra, R.R. Deshmukh et al. // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2020. №3 (213). P.184-192 DOI: 10.18522/2311-3103-2020-3-184-192
14. Abbasov I.B. «Recognition and Perception of Images, Fundamentals and Applications» / I.B. Abbasov // Edited by Iftikhar B. Abbasov, Wiley-Scrivener, 2021, 464 p. ISBN: 9781119750550, DOI:10.1002/9781119751991
15. Brandt V. Ischemia and outcome prediction by cardiac CT based machine learning / V. Brandt, T. Emrich, U.J. Schoepf et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2020. V.36. P.2429–2439 DOI: 10.1007/s10554-020-01929-y
16. Singh G. Machine learning in cardiac CT: basic concepts and contemporary data / G. Singh, S.J. Al'Aref, M. Van et al. // Journal of Cardiovascular Computed Tomography, 2018. V.12. P.192–201 DOI: 10.1016/j.jcct.2018.04.010
17. Cantinotti M. Three-dimensional printed models in congenital heart disease / M. Cantinotti, I. Valverde, Sh. Kutty // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2017. V.33. P.137–144 DOI: 10.1007/s10554-016-0981-2
18. Farooqui K.M. Echocardiography and threedimensional printing: sound ideas to touch a heart / K.M. Farooqui, P. Sengputa // Journal American Society Echocardiography. 2015. V.28. P.398–403 DOI: 10.1016/j.echo.2015.02.005
19. Schmauss D. Three-dimensional printing in cardiac surgery and interventional cardiology: a single-centre experience / D. Schmauss, S. Haerberle, C. Hagl et al. // European Journal of Cardio-thoracic Surgery, 2015. V.47. P.1044–1052 DOI: 10.1093/ejcts/ezu310
20. Suárez-Mejías C. New technologies applied to surgical processes: virtual reality and rapid prototyping / C. Suárez-Mejías, G. Gomez-Ciriza, I. Valverde et al. // Studies Health Technology Inform, 2015. V.210. P.669–671
21. Vukicevic M. Cardiac 3D printing and its future directions / M. Vukicevic, B. Mosadegh, J.K. Min et al. // JACC Cardiovascular Imaging, 2017. V.10 (2) P.171–184 DOI: 10.1016/j.jcmg.2016.12.001
22. Ong C.S. Role of virtual reality in congenital heart disease / C.S. Ong, A. Krishnan, C.Y. Huang et al. // Congenital Heart Disease, 2018. V.13 (3). P.357-361 DOI: 10.1111/chd.12587
23. Patel N. Stereoscopic virtual reality does not improve knowledge acquisition of congenital heart disease / N. Patel, A. Costa, S.P. Sanders et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging. 07 Mar 2021, DOI: 10.1007/s10554-021-02191-6
24. Maresky H.S. Virtual reality and cardiac anatomy: exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education / H.S. Maresky, A. Oikonomou, I. Ali et al. // Clinical Anatomy, 2019. V.32 (2). P.238–243 DOI: 10.1002/ca.23292
25. Mori Sh. What Is the Real Cardiac Anatomy? / Sh. Mori, J.T. Tretter, D.E. Spicer et al. // Clinical Anatomy, 2019. V.32. P.288–309 DOI: 10.1002/ca.23340
26. Hyun Woo Goo. Computed tomography for the diagnosis of congenital heart disease in pediatric and adult patients / Hyun Woo Goo, In-Sook Park, Jae Kon Ko et al. // The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2005. V.21. P.347–365 DOI: 10.1007/s10554-004-4015-0
27. Fischer A.M. Accuracy of an artificial intelligence deep learning algorithm implementing a recurrent neural network with long short-term memory for the automated detection of calcified plaques from coronary computed tomography angiography / A.M. Fischer, M. Eid, C.N. De Cecco et al. // Journal of Thoracic Imaging, 2020. V.35. P. 49–57 DOI: 10.1097/RTI.0000000000000491

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.006>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО УРОВНЯ РИСКА АВАРИИ ДАМБЫ ЗОЛОШЛАКООТВАЛА ПО УСЛОВИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И ПОДХОД К НАЗНАЧЕНИЮ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ

Научная статья

Желанкин В.Г.*

ORCID: 0000-0001-6352-5689,

Научно-исследовательский университет Московский энергетический институт, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (niies1[at]mail.ru)

Аннотация

В статье приводятся краткие основы вероятностной методики определения уровня риска возможных аварий гидротехнических сооружений (ГТС) с использованием метода статистического моделирования (Монте-Карло). Представленная методика была применена к оценке риска возможных аварий одного из многоярусных золошлакоотвалов Экспериментальной ТЭС, находящейся в Ростовской области РФ. На основе результатов изысканий, выполненных в процессе проектирования и последующей эксплуатации золоотвала, а также данных натурных наблюдений за положением депрессионной поверхности сточных вод, были выполнены оценки риска возможного обрушения откоса дамбы золоотвала для различных случаев сочетаний нагрузок и проведено сравнение полученных значений уровня риска аварий с допустимыми нормативными значениями риска и коэффициентами надежности метода предельных состояний, полученных в соответствии с действующими нормами.

Ключевые слова: уровень риска аварии, критерии безопасности, золошлакоотвал, предельные состояния, допустимый риск.

IDENTIFYING THE PROBABILISTIC LEVEL OF THE RISK OF AN ASH AND SLAG DUMP DAM ACCIDENT ACCORDING TO THE CONDITION OF SLOPE STABILITY AND AN APPROACH TO ASSIGNING SAFETY CRITERIA

Research article

Zhelankin V.G.*

ORCID: 0000-0001-6352-5689,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

* Corresponding author (niies1[at]mail.ru)

Abstract

The article provides a brief basis of a probabilistic methodology for determining the level of risk of possible accidents of hydraulic structures using the method of statistical modeling (Monte Carlo). The presented methodology was applied to the assessment of the risk of possible accidents of one of the multi-layered ash and slag dumps of an Experimental thermal power plant located in Rostov Oblast, Russian Federation. Based on the results of surveys carried out during the design and subsequent operation of the ash dump, as well as data from field observations of the position of the depression surface of wastewater, the study conducts risk assessments of a possible collapse of the slope of the ash dump dam for various cases of load combinations and compares the obtained values of the accident risk level with permissible regulatory risk values and reliability coefficients of the limit state method obtained in accordance with current standards.

Keywords: accident risk level, safety criteria, ash and slag dump, limit conditions, permissible risk.

Введение

Согласно данным последнего доклада опубликованного на официальном сайте Российского Регистра гидротехнических сооружений (ФГБУ «Центр регистра ГТС») на 2019-й год в Центре Регистра ГТС РФ зарегистрировано 5 514 комплексов ГТС, в состав которых входят чуть более 13 тысяч гидротехнических сооружений, из них более 400 имеют опасный уровень безопасности. Снижение безопасности сооружений III и IV происходит из-за уменьшения объемов ремонтных работ, сокращения штатов эксплуатационного персонала и ряда других причин. Кроме того, в отличие от сооружений I и II классов, гидротехнические сооружения III и IV классов имеют значительно меньшее количество контрольно-измерительной аппаратуры или не имеют ее вообще, и эксплуатируются менее квалифицированными кадрами. В этой связи в настоящее время в рамках обеспечения требований ФЗ №117 [1] особую актуальность приобретает оперативное определение уровня риска возможных аварий водоподпорных гидротехнических сооружений, характеристики материалов и геометрический профиль которых меняется в процессе эксплуатации. К таким сооружениям, согласно СП 58.13330.2019 [2] относятся дамбы золошлакоотвалов (ЗШО) тепловых станций.

В ряде последних работ [3], [4], посвященных обеспечению безопасности ГТС, отмечается актуальность и востребованность применения вероятностных методов расчета риска возможных аварий, как наиболее точных по сравнению с экспертными методами, или методами, основанными на принципах «доверительных интервалов».

Основной текст статьи

В качестве примера проведена вероятностная оценка уровня риска и назначения на этой основе критериев безопасности многоярусной дамбы золошлакоотвала высотой 24 м на суглинистом основании на основе расчета устойчивости по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения. Конструкция дамбы представляет собой первичную дамбу из суглинка и 3 яруса наращивания, также выполненные из суглинка. Последний, четвертый ярус, выполнен из золошлакового материала с заложением откоса 1:1, что ниже принятого в проекте (Рис. 1). Первоначально,

по проекту, дамба ЗШО относилась к четвертому классу ответственности. Впоследствии, в связи с увеличением строительной высоты, ее класс был повышен до третьего, без конструктивных изменений профиля. Исходные данные для расчета по характеристикам грунтов и золошлаков, залегающих в основании и теле дамбы, определены на основе статистической обработки достаточно представительных данных о свойствах грунтов, приведенных в материалах РотЭП [5] и изысканий, проводившихся в последующие годы эксплуатации посредством колонкового бурения и взятия кернов из нижележащих золошлаковых материалов и суглинков различных ярусов наращивания дамбы ЗШО.

При обработке данных и последующей оценке риска применялась новая, изложенная ниже методика, использующая обратную функцию распределения вероятностей с целью получения исходных данных для статистического моделирования характеристик грунтов и материалов, а также принципы и подходы, частично ранее изложенные автором в [6], [7], [8].

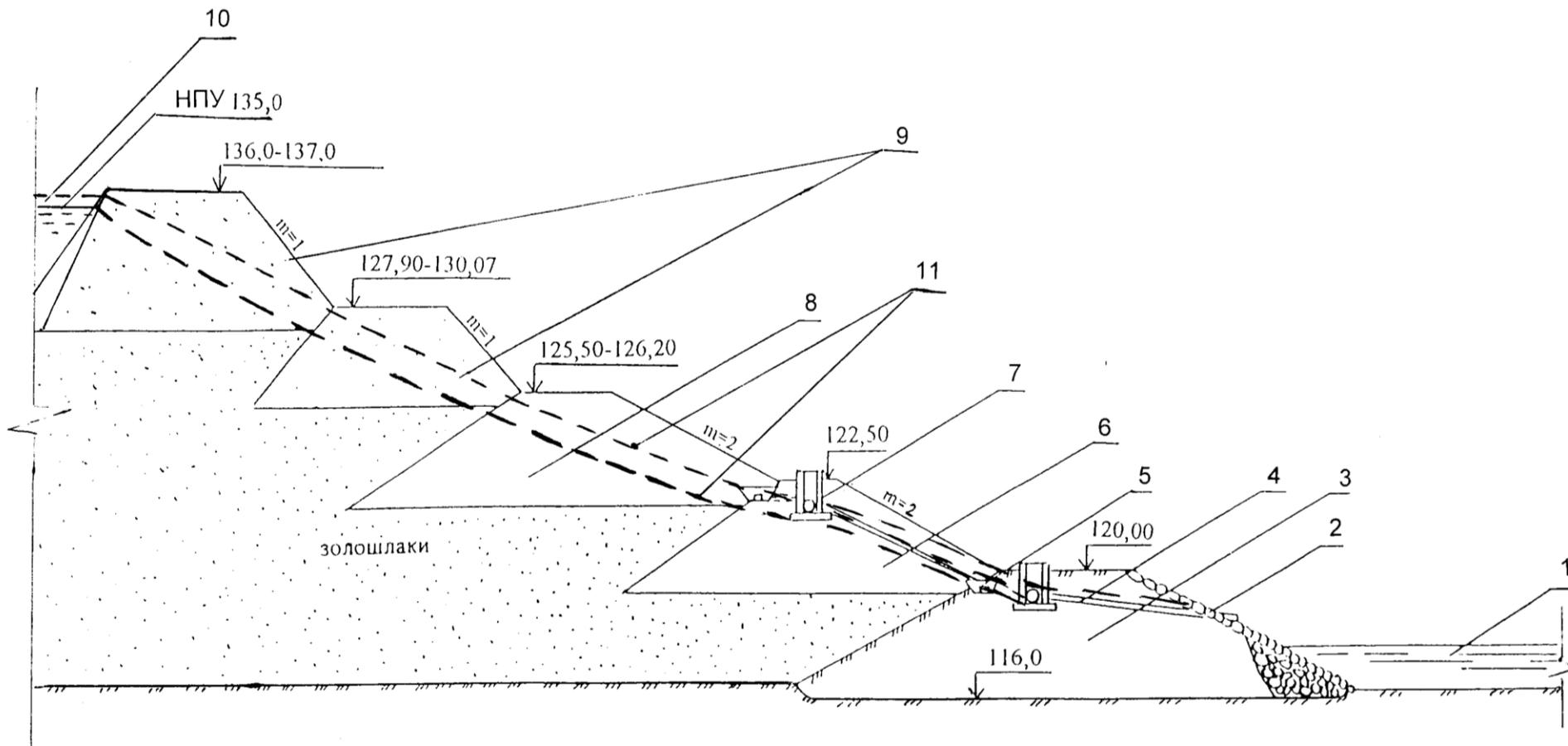


Рис. 1 – Поперечное сечение ограждающей дамбы золошлакоотвала (схема):

1 – русло реки; 2 – каменное мощение; 3 – первичная дамба из суглинка; 4 – стальной водовод; 5 – трубчатый дренаж; 6 – дамба 1-го яруса из суглинка; 7 – смотровой колодец со стальным водоводом; 8 – дамба 2-го яруса из суглинка; 9 – дамбы 3 и 4 ярусов золошлаков с пригрузкой суглинком; 10 – прудок-отстойник; 11 – нормальное положение кривой депрессии и повышенное положение кривой депрессии при уровне воды в прудке-отстойнике выше нормального подпорного уровня (НПУ) и выходе из строя дренажа

Величины характеристик грунтов оказались распределены по закону близкому к нормальному и расчетные параметры этих законов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные характеристики грунтов и золошлаков

№ грунта	Характеристики грунтов	Удельный вес скелета грунта $\gamma_{ск}$, тс/м ³			Угол внутреннего трения грунта φ , град			Удельное сцепление грунта c , тс/м ²		
		Статистические параметры								
		$M(\gamma_{ск})$	$\sigma(\gamma_{ск})$	$C(\gamma_{ск})$	$M(\varphi)$	$\sigma(\varphi)$	$C(\varphi)$	$M(c)$	$\sigma(c)$	$C(c)$
1	Суглинок основания	1,58	0,0873	0,055	18,36	1,494	0,081	2,785	0,752	0,270
2	Суглинок дамбы	1,64	0,015	0,009	19,92	1,32	0,066	3,850	0,739	0,192
3	Золошлаковый материал	1,46	0,005	0,003	29,38	2,644	0,090	1,932	0,276	0,143

Примечание: M - математическое ожидание; σ - среднеквадратическое отклонение; C - коэффициент вариации

На основе этих данных были смоделированы выборки одинаковой длины статистического ряда по каждой характеристике и проведены расчеты устойчивости по методу статистического моделирования (Монте-Карло) с использованием программного комплекса SAFE.

Каждая из характеристик грунтов формируется в виде матрицы $[E_{ij}]$, где: E – наименование характеристики грунта; i – номер грунта; j – номер ряда статистического моделирования. Формирование матрицы осуществлялось с помощью генератора случайных чисел для равномерного закона распределения вероятностей по следующей схеме. Генерируется случайная величина x , принимающая значения от 0 до 1, каждому значению которой приравнивается функция распределения моделируемой случайной величины E (характеристики грунта) в виде (1):

$$x = P_E(E) = \int_{-\infty}^E p_E(E) dE \quad (1)$$

где $P(E)$ – функция распределения вероятностей величины E ; $p(E)$ – функция плотности вероятностей величины E .

Беря обратную функцию от $P(E)$ с заданными параметрами моделируемого закона распределения вероятностей, получим выражение для выборочных значений E_j соответствующих этому закону:

$$E_j = \{ P_E(x_j) \}^{-1}$$

где x_j – сгенерированные выборочные значения случайной величины x ;

$\{ P_E(x_j) \}^{-1}$ – обратная функция распределения величины E .

Для расчетов по методу статистического моделирования были сформированы ряды длиной в 36 чисел для каждой характеристики грунтов. Значения некоторых характеристик и параметры законов распределения вероятностей приведены в таблице 1.

Для статистического моделирования устойчивости откосов в программный комплекс SAFE, встроена программа расчета устойчивости откосов по круглоцилиндрическим поверхностям обрушения с учетом фильтрационных сил методом Терцаги – Флорина. Показателями состояния V_j служат коэффициенты устойчивости откосов плотности K , а предельными значениями показателей состояния являются нормативные значения коэффициентов надежности γ_n для основного и особого сочетаний.

При проведении расчетов ставилась задача определить положение кривой депрессии для следующих случаев:

- 1) Нормальной эксплуатации ($V_1 = \gamma_n = 1,15$);
- 2) Возможной аварийной ситуации при особом сочетании нагрузок (нарушении работы дренажа) ($V_2 = \gamma_n = 1,035$);
- 3) Возможного первого предельного состояния – оползания откоса также при особом сочетании нагрузок (при выходе из строя дренажа, повышении уровня прудка-отстойника ЗШО) ($V_3 = \gamma_n = 1,035$);.

Расчеты устойчивости проводились при трех статистически осредненных возможных положениях кривой депрессии, соответствующих каждому случаю в соответствии с методологией, изложенной в [9] и [10]. Зона положений кривых депрессии приведена на Рис. 2.

В результате вероятностных расчетов методом статистического моделирования установлено, что величина коэффициента вариации коэффициента устойчивости составила $C_k = 0,095$. Величины математических ожиданий коэффициентов устойчивости, а также значения этих коэффициентов, рассчитанных по нормативной методике и соответствующие им вероятностные уровни надежности, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов устойчивости и риска аварий

№	Расчетные случаи	Коэффициенты устойчивости, M_k		Вероятностный уровень риска	Допустимый уровень риска
		коэффициенты устойчивости	по нормативной методике		
1	Нормальная эксплуатация	1,35	1,12	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
2	Нарушение работы дренажа	1,30	1,06	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
3	Выход из строя дренажа, повышение уровня прудка-отстойника ЗШО выше НПУ на 1 м.	1,27	0,98	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$

Полученные кривые скольжения и изолинии коэффициентов устойчивости для 1 и 2 расчетных случаев приведены на рис.2.

Из таблицы 2 видно, что первый расчетный случай по уровню надежности достаточно близко соответствует допустимому уровню риска для ГТС третьего класса, хотя коэффициент устойчивости (1,12) оказался ниже требуемого нормативного значения (1,15) коэффициента надежности. Это объясняется высокими значениями коэффициентов вариации удельного сцепления грунтов, что привело к снижению расчетных значений сцепления, определяемых в соответствии с нормами при 95% обеспеченности.

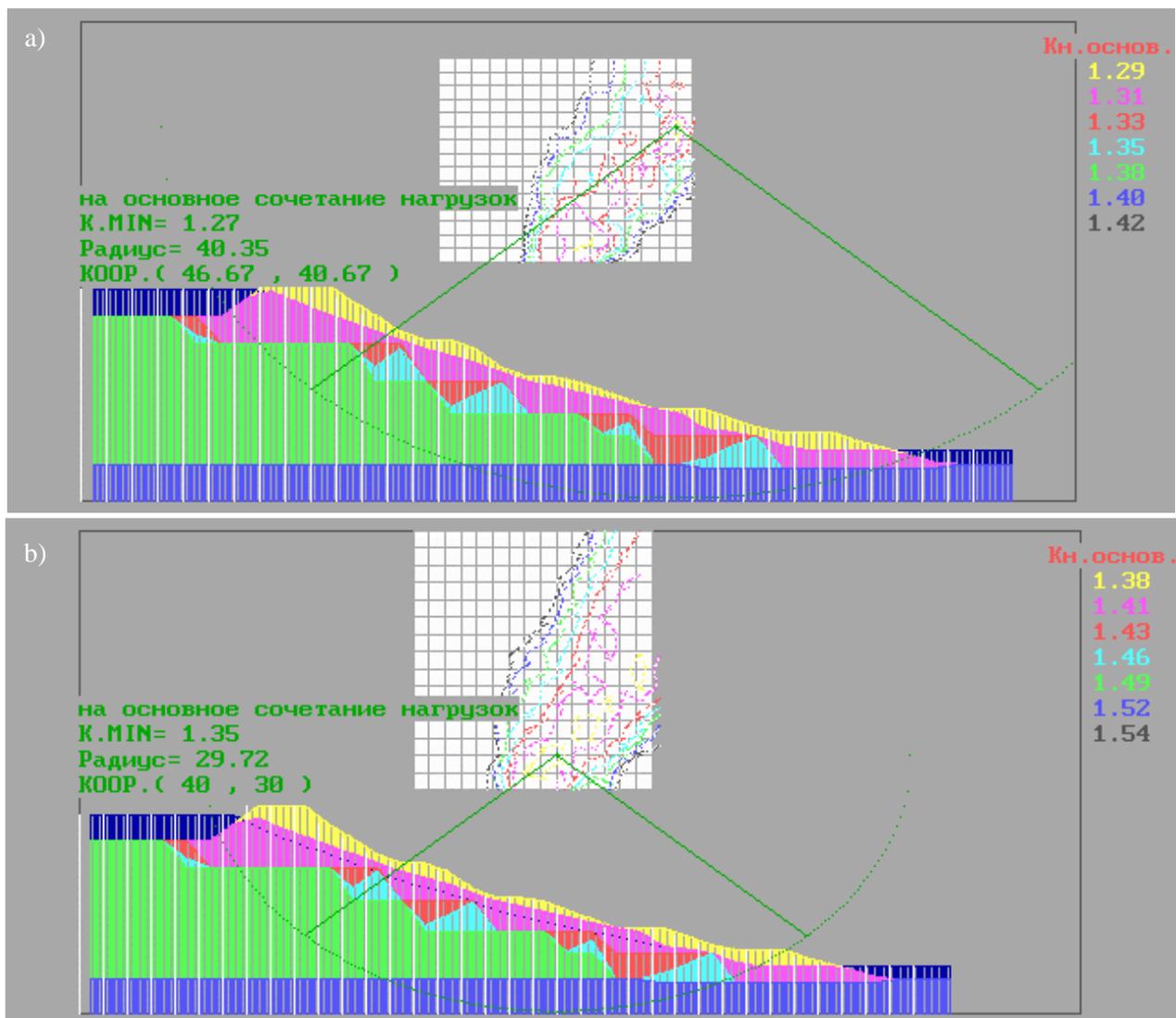


Рис. 2 – Расчеты устойчивости низового откоса дамбы золошлакоотвала:

а) при нормальном положении кривой депрессии: уровень риска возможной аварии составил $P = 3,2 \cdot 10^{-3}$, что допустимо для сооружений 3 класса; б) при повышенном положении кривой депрессии (расчетный случай 3): уровень риска составил $P = 1,25 \cdot 10^{-2}$, что недопустимо для сооружений 3 класса

Для 2-го расчетного случая уровень риска аварии оказался существенно ниже допустимого уровня риска для дамбы ЗШО, относящейся к 3-му классу, но коэффициент устойчивости откоса (1,06) оказался выше, чем требуют нормы (1,035).

В 3-м расчетном случае вероятностный уровень риска аварии и коэффициент устойчивости (0,98) оказались значительно ниже нормативных значений. Таким образом, третий расчетный случай является недопустимым для сооружения данного класса.

В качестве критериальных значений диагностических показателей в соответствии с требованиями [11], [12], [13] следует принять положение уровня кривой депрессии, контролируемое по имеющимся пьезометрам:

K1 – первый критерий безопасности - (предупреждающий) уровень значений диагностических показателей для первого расчетного случая;

K2 – второй критерий безопасности - (предельный) уровень значений диагностических показателей для второго расчетного случая.

Заключение

Научным результатом данной работы является демонстрация новой методики, использующей обратную функцию распределения вероятностей с целью получения исходных данных для статистического моделирования характеристик грунтов и материалов в расчетах устойчивости. Научная новизна работы заключается в применении результатов расчетов устойчивости и прочности, выполненных по новой методике, для назначения критериальных значений диагностических показателей безопасности работы каждой конструкции на основе уровня риска (уровня надежности) сооружения в целом для принятого сценария аварийной ситуации или расчетного случая, а не назначать эти показатели, основываясь на общепринятых обеспеченностях отклонений от средних значений на определенный доверительный интервал (например, 2σ или 3σ), как регламентируется нормами при определении расчетных величин нагрузок и характеристик материалов. В статье проиллюстрировано, что имеющиеся средства для вероятностных расчетов и анализа риска позволяют провести исследование аварийных ситуаций, оценить риск возможной аварии на грунтовых сооружениях и назначить критерии безопасности даже при отсутствии значительного объема статистических данных, что, несомненно, увеличит возможности обеспечения безопасности гидротехнических сооружений.

Благодарности

Автор благодарит
Экспериментальной ТЭЦ.

руководство

Acknowledgement

I thank the management of the Experimental Thermal Power Plant.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Федеральный закон РФ от 21.07.1997 № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений».
2. СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. Основные положения. – М.: Минрегион России. – 2019.
3. Беллендир Е. Н. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е. Н. Беллендир Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин и др. – Т.1 - СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева». – 2003 – 556 с.
4. Иващенко И. Н. Вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований / И. Н. Иващенко, Д. Б. Радкевич, К. И. Иващенко // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 7. – С. 22—28.
5. Ростовское отделение «Теплоэлектропроект». Существующий и проектируемый золовалы Несветай ГРЭС. Рабочие чертежи. Материалы изысканий. Ростов-на-Дону. – 1969. – 196 с.
6. Желанкин В. Г. К нормированию уровня надежности и коэффициентов безопасности грунтовых плотин / В. Г. Желанкин // Сборник научных трудов МИСИ им. В.В.Куйбышева «Надежность работы элементов гидротехнических и гидроэнергетических комплексов». – М.: Издательство МИСИ, 1990. – С. 138 – 143.
7. Рассказов Л. Н. Подход к нормированию критериев надежности грунтовых плотин в увязке с нормативными коэффициентами метода предельных состояний / Л. Н. Рассказов, В. Г. Желанкин // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1993. – №9. – С. 68 – 73.
8. Желанкин В.Г. Совершенствование методов определения критериев безопасности гидротехнических сооружений на примере водосливной плотины с анкерным понуром / В.Г. Желанкин // Материалы 11-й научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии». – Санкт-Петербург: Издательство АО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева». – 2018. – С. 203 – 208.
9. Желанкин В.Г. Грунтовые плотины малых ГЭС: методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию / В.Г. Желанкин. – М.: Издательство МЭИ (ТУ). – 1997. – 47 с.
10. Желанкин В.Г. Определение устойчивости откосов грунтовых плотин на ЭВМ с использованием расчетного программного комплекса: методические указания к лабораторной работе №1 по курсу «Энергетические сооружения» / В.Г. Желанкин. – М.: Издательство МЭИ (ТУ). – 1997. – 25с.
11. ГОСТ Р 55260.1.4-2012. Часть 1-4. Гидроэлектростанции. Сооружения ГЭС гидротехнические. Общие требования по организации и проведения мониторинга.
12. СТО РусГидро 02.03.131-2015 Гидроэлектростанции. Методика определения критериев безопасности для декларируемых гидротехнических сооружений. – М.: Издательство 2015. – 25 с.
13. ГОСТ Р 55260.1.9-2013 Часть 1-9. Гидроэлектростанции. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования безопасности при эксплуатации.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Federal'nyj zakon RF ot 21.07.1997 № 117-FZ «O bezopasnosti gidrotehniceskikh sooruzhenij» [Federal Law of the Russian Federation No. 117-FZ Dated 21.07.1997 “On the Safety of Hydraulic Structures”]. [in Russian]
2. SP 58.13330.2019 Gidrotehniceskije sooruzhenija. Osnovnyje polozhenija. [Hydraulic Structures. The Main Provisions.] – М.: Minregion Rossii. – 2019. [in Russian]

3. Bellendir E. N. Veroyatnostnye metody ocenki nadezhnosti gruntovyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Probabilistic Methods for Assessing the Reliability of Ground Hydraulic Structures] / E. N. Bellendir, D. A. Ivashincov, D. V. Stefanishin et al. // – Vol. 1 - SPb.: Publishing house OAO «VNIIG im. B.E.Vedeneeva». – 2003– p. 556 [in Russian]
4. Ivashhenko I. N. Veroyatnostnaya ocenka riska avarij plotin po rezul'tatam ih monitoringa i obsledovaniy [Probabilistic Assessment of the Risk of Dam Accidents Based on the Results of Their Monitoring and Surveys] / I. N. Ivashhenko, D. B. Radkevich, K. I. Ivashhenko // *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. – 2012. – № 7. – pp. 22–28. [in Russian]
5. Rostovskoe otdelenie «Teplojelektroproekt». Sushhestvujushhij i proektiruemyj zolotovaly Nesvetaj GRJeS. Rabochie chertezhi. Materialy izyskanij. [Rostov Branch “Teplojelektroproekt”. The Existing and Projected Zolotovaly Nesvetaj Gres. Working Drawings. Research Materials] Rostov-na-Donu. – 1969. – p. 196 [in Russian]
6. Zhelankin V. G. K normirovaniyu urovnja nadezhnosti i koefitsientov bezopasnosti gruntovyh plotin [On Rationing the Level of Reliability and Safety Coefficients of Ground Dams] / V. G. Zhelankin // *Sbornik nauchnyh trudov MISI im. V.V.Kujbysheva «Nadezhnost' raboty jelementov gidrotehnicheskikh i gidrojenergeticheskikh kompleksov»* [Collection of Scientific Papers of the v.v.kuibyshev Misi “Reliability of the Elements of Hydraulic Engineering and Hydropower Complexes”]. – M.: Publishing house MISI, 1990. – pp. 138 – 143. [in Russian]
7. Rasskazov L. N. Podhod k normirovaniyu kriteriev nadezhnosti gruntovyh plotin v uvjazke s normativnymi koefitsientami metoda predel'nyh sostojanij [Approach to the Rationing of Criteria for the Reliability of Ground Dams in Conjunction With the Normative Coefficients of the Method of Limit States] / L. N. Rasskazov, V. G. Zhelankin // *Izvestija VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura*. [Bulletin of Universities. Construction and Architecture.] – 1993. – №9. – pp. 68 – 73. [in Russian]
8. Zhelankin V.G. Sovershenstvovanie metodov opredelenija kriteriev bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenij na primere vodoslivnoj plotiny s ankernym ponurom [Improvement of Methods for Determining the Safety Criteria of Hydraulic Structures on the Example of a Spillway Dam With an Anchor Ponur] / V.G. Zhelankin // *Materialy 11-j nauchno-tehnicheskoi konferencii «Gidrojenergetika. Gidrotehnika. Novye razrabotki i tehnologii»* [Proceedings of the 11th Scientific and Technical Conference “Hydropower. Hydraulic Engineering. New Developments and Technologies”]. – 2018. – pp. 203 – 208. [in Russian]
9. Zhelankin V.G. Gruntovye plotiny malyh GJeS: metodicheskoe posobie po kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu [Soil Dams of Small Hydroelectric Power Plants: A Methodological Guide for Course and Diploma Design] / V.G. Zhelankin // – M.: Publishing house MJEI (TU). – 1997. – p. 47 [in Russian]
10. Zhelankin V.G. Opredelenie ustojchivosti otkosov gruntovyh plotin na JeVM s ispol'zovaniem raschetnogo programmnoogo kompleksa: metodicheskie ukazaniya k laboratornoj rabote №1 po kursu «Jenergeticheskie sooruzhenija» [Determination of Stability of Slopes of Soil Dams on a Computer Using a Computational Software Package: Guidelines for Laboratory Work No. 1 on the Course “Power Structures”] / V.G. Zhelankin // – M.: Publishing house MJEI (TU). – 1997. – p. 25 [in Russian]
11. GOST R 55260.1.4-2012. Chast' 1-4. Gidrojelektrostantsii. Sooruzhenija GJeS gidrotehnicheskije. Obshhie trebovanija po organizacii i provedenija monitoringa. [GOST R 55260.1.4-2012. Part 1-4. Hydroelectric Power Plants. Hydroelectric Power Plant Structures Are Hydrotechnical. General Requirements for the Organization and Conduct of Monitoring.] [in Russian]
12. STO RusGidro 02.03.131-2015 Gidrojelektrostantsii. Metodika opredelenija kriteriev bezopasnosti dlja deklariruemyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij. [STO RusHydro 02.03.131-2015 Hydroelectric Power Plants. Methodology for Determining Safety Criteria for Declared Hydraulic Structures.] – M.: Publishing house 2015. – p. 25 [in Russian]
13. GOST R 55260.1.9-2013 Chast' 1-9. Gidrojelektrostantsii. Sooruzhenija GJeS gidrotehnicheskije. Trebovanija bezopasnosti pri jekspluatacii. [GOST R 55260.1.9-2013 Part 1-9. Hydroelectric Power Plants. Hydroelectric Power Plant Structures Are Hydrotechnical. Safety Requirements During Operation.] [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.007>

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ЦЕЛЬНОКАТАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА

Научная статья

Зеньков Е.В.*

ORCID: 0000-0003-4414-0307,

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

* Корреспондирующий автор (jovanny1[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье описывается один из этапов реализации расчетно-экспериментальной методики оценки конструкционной прочности материала на примере материала колеса железнодорожного вагона. Рассматриваются особенности численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) колёса железнодорожного вагона с плоскоконической формой диска. Граничные условия закрепления и нагружения колеса соответствуют движению вагона в криволинейном участке пути. Результаты анализа конечно-элементного моделирования деформирования колеса показали, что в приободной зоне с внешней стороны колеса достаточно высокий уровень интенсивности напряжений и вид НДС более «жесткий», чем в приступичной зоне, что влияет на ресурс статической и усталостной прочности. Дается анализ конструкционной прочности материала колеса в приободной зоне на основе испытаний специального лабораторного образца. Результаты анализа показали, что предельное значение интенсивности напряжений в приободной зоне колеса примерно на четверть выше значения предела прочности исследуемой стали, определенного в условиях одноосного растяжения.

Ключевые слова: конструкционная прочность, колесо железнодорожного вагона, вид напряженно-деформированного состояния, метод конечных элементов.

THE METHOD OF MODELING THE STRUCTURAL STRENGTH OF A MATERIAL USING A SOLID-ROLLED RAILWAY WHEEL

Research article

Zenkov E.V.*

ORCID: 0000-0003-4414-0307,

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

* Corresponding author (jovanny1[at]yandex.ru)

Abstract

The article describes one of the stages of the implementation of a computational and experimental methodology for assessing the structural strength of a material using a railway wagon wheel as an example. The author examines the features of numerical simulation of the stress-strain state of a railway car wheel with a pan-head disk shape. The boundary conditions for fixing and loading the wheel correspond to the movement of the car in a curved section of the track. The results of the analysis of finite element modeling of wheel deformation show a sufficiently high level of stress intensity in the rim zone from the outside of the wheel, while the type of stress-strain state is more "rigid" than in the elastic zone, which affects the resource of static and fatigue strength. The structural strength of the wheel material in the rim zone is analyzed on the basis of tests of a special laboratory sample. The results of the analysis show that the limiting value of the stress intensity in the rim zone of the wheel is about a quarter higher than the value of the tensile strength of the steel under study, determined under uniaxial tension.

Keywords: structural strength, railway car wheel, type of stress-strain state, finite element method.

Введение

Расчётная оценка надёжности узлов и деталей оборудования может быть обеспечена при наличии достоверных экспериментальных сведений об усталостной прочности элементов конструкций. Существенно, что ресурс работы элемента зависит от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) в возможном очаге его разрушения [1], [2], [3]. Характерной особенностью вида НДС цельнокатаных колёс железнодорожных вагонов является высокий уровень напряжений сжатия. В процессе эксплуатации в ряде случаев возникают усталостные трещины, располагающиеся в зоне стыка массивных элементов колеса (обода, ступицы) с его относительно тонкой дисковой частью (рис. 1).

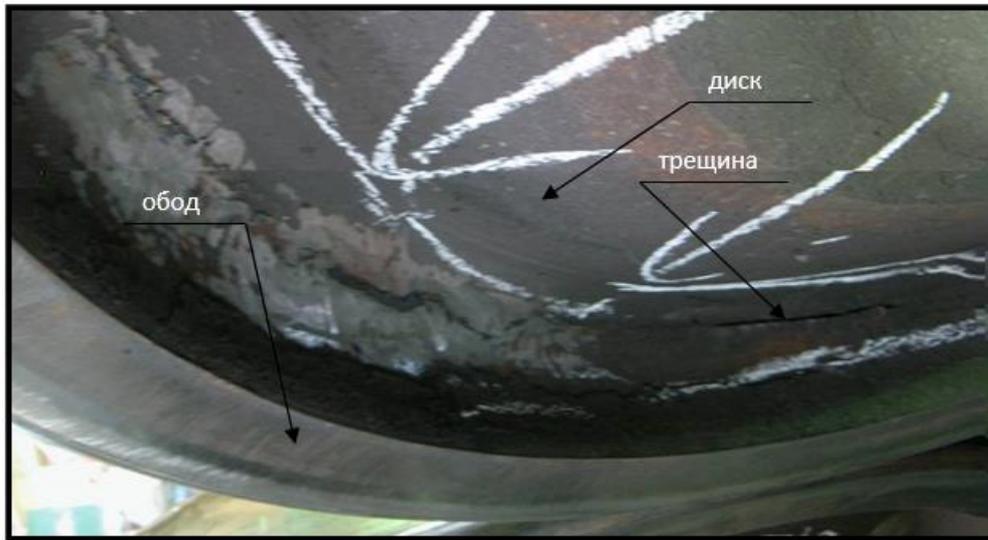


Рис. 1 – Усталостные трещины в приободной зоне колеса

Расчётная оценка ресурса работоспособности колёс опирается на экспериментально определяемые усталостные характеристики (кривую усталости) материала колеса, определяемые при повторно-переменном нагружении стандартных лабораторных образцов на изгиб. Целью данной работы является повышение точности в определении усталостных характеристик материала конструкции за счет проведения испытаний специальных лабораторных образцов, позволяющих моделировать необходимый вид НДС зоны исследуемой конструкции. Предложенная в связи с этим расчетно-экспериментальная методика [4], [5], [6], позволяет реализовать механизм определения у рассматриваемой конструкции уточненные прочностные характеристики, определяемых путём разрушения в лабораторных условиях специальных образцов, имеющих в очаге их разрушения тот же вид НДС, что и в очаге возможного разрушения рассматриваемой конструкции, с помощью типовой одноприводной испытательной машины.

Постановка задачи исследования конструкционной прочности материала

В работе описывается методика расчёта НДС и оценка статической конструкционной прочности материала, на примере материала колеса железнодорожного вагона, как базового этапа реализации расчетно-экспериментальной методики оценки конструкционной прочности [4], [5], [6]. Этот этап включает решение следующих обязательных задач:

- расчёт НДС рассматриваемой конструкции в условиях, реально приближенных к эксплуатационным;
- определение инвариантов НДС в возможном очаге разрушения рассматриваемой конструкции по результатам расчета её НДС;
- выбор лабораторных образцов для механических испытаний до разрушения с заданным (выбранным по результатам расчета НДС) значением инвариантов НДС, определяющих прочность конструкции, для проведения механических испытаний до разрушения (экспериментальная часть предложенной методики).

Методика и результаты расчета напряженно-деформированного состояния объекта исследования

Основной вклад в деформирование колеса в процессе эксплуатации, вносит вес вагона. По этой причине рассматриваются вертикальные статические усилия, определяемые допускаемой осевой нагрузкой на колёсную пару вагона. Для полноты моделирования нагрузок на колесо были приняты и горизонтальные поперечные для направления движения силы реакции, возникающие в кривом участке пути, характерного для Иркутского полигона железной дороги. Для определённости рассматривается колесо, соответствующее ГОСТ 10791-2011 (см. Приложение А, рис. А.1 ГОСТ 10791-2011). Геометрическая модель колеса разрабатывалась на основе размеров профиля колеса с плоскоконической формой диска. Колесо является телом вращения, но имеет сложный профиль осевого сечения. По этой причине его геометрическая модель создавалась в САД-программе, а затем импортировалась в форме твердотельной модели в виде универсального файла обмена данными в формате «Parasolid» в программу конечно-элементного (КЭ) анализа (рис. 2).

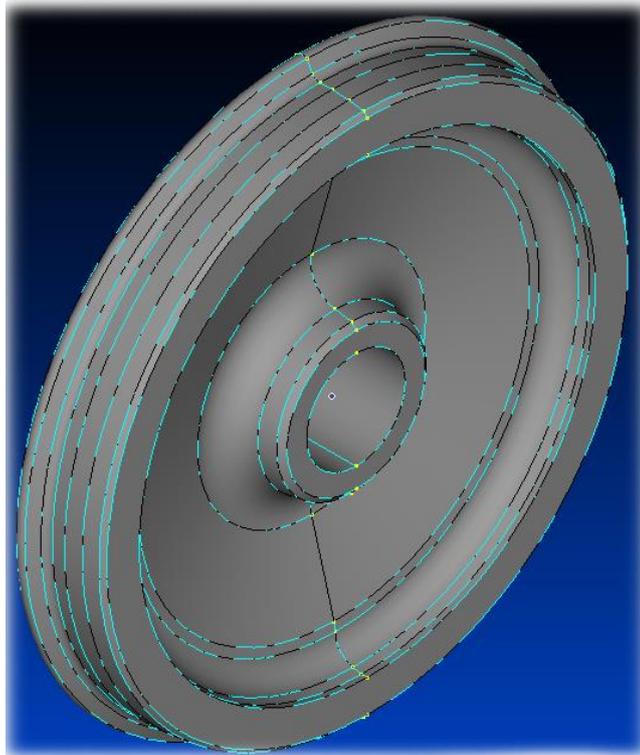


Рис. 2 – Геометрическая модель колеса по ГОСТ 10791-2011

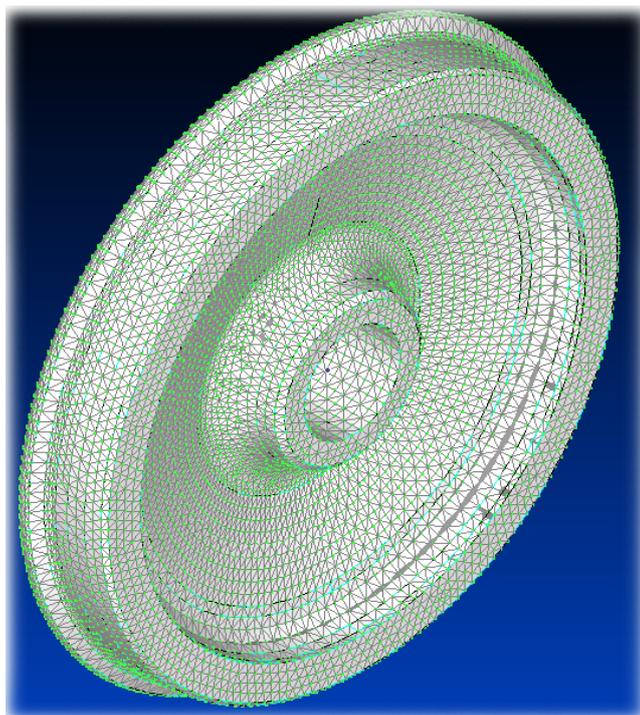


Рис. 3 – Дискретная модель колеса по ГОСТ 10791-2011

Анализ вида НДС рассматриваемого колеса по ГОСТ 10791-2011 осуществлён численно путем использования уравнений теории упругости, решение которых определялось с помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в программном комплексе Femap with NX NASTRAN. Для создания объемной конечно-элементной модели колеса предварительно была создана разметка с параметрами КЭ-сетки, необходимыми для достижения приемлемой инженерной точности расчёта критериальных характеристик, прежде всего, интенсивности напряжений в очагах возможного разрушения. Дискретизация модели колеса осуществлялась по методике [7], обеспечивая при этом необходимую точность – относительная погрешность моделирования максимальных эквивалентных напряжений не превышала 5 %. Параметры материала для конечно-элементной модели колеса принимались близкими по свойствам к механическим характеристикам колесной стали Марки 2 по ГОСТ 10791-2011. При этом при расчете принимались следующие значения физических характеристик: модуль упругости (E) – $2,06 \cdot 10^5$ МПа; модуль сдвига (G) – $0,79 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент поперечной деформации (ν) – 0,3; коэффициент линейного расширения (α) – $0,12 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹; плотность (ρ) – 7850 кг/м³. Трехмерная конечно-элементная модель колеса представлена на рис. 3.

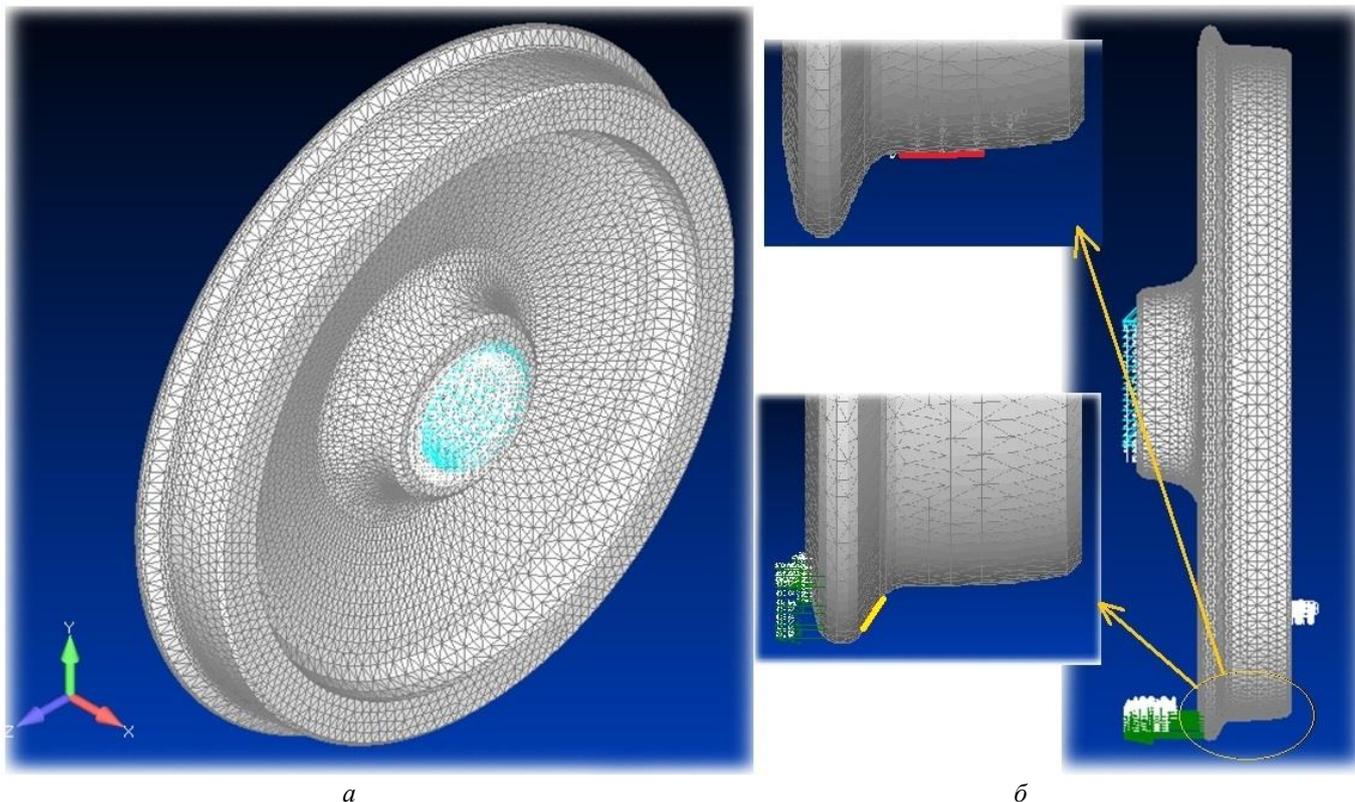


Рис. 4 – Граничные условия для расчета НДС цельнокатаного колеса:
 а – условия закрепления; б – условия нагружения

Граничные условия закрепления были наложены на внутреннюю поверхность ступицы колеса. Ограничения накладываются на степени свободы в координатных направлениях используемой декартовой системы координат. Ширина зоны закрепления подступичной поверхности оси соответствовала при этом размеру ступицы колеса в продольном для рассматриваемой оси направлении (рис. 4,а).

В качестве нагрузок на колесо были приняты горизонтальные поперечные для направления движения силы реакции, возникающие в кривом участке пути, схематически представленные на рис. 4б. Указанные силы приложены к внутренней поверхности гребня колеса в его нижней части (см. желтая линия в проекции на виде сбоку рис. 4б). К поверхности катания колеса (см. красная линия в проекции на виде сбоку рис. 4б) приложено вертикальное статическое усилие, определяемое допускаемой осевой нагрузкой на колёсную пару вагона [8], [9]. Принятые значения нагрузок на колесо приложены в виде сил, определенных по формулам вероятностного метода расчета прочности оси колесной пары [10].

Результаты анализа конечно-элементного моделирования деформирования колеса от расчетной нагрузки представлены на рис. 5 в виде распределения полей эквивалентных напряжений.

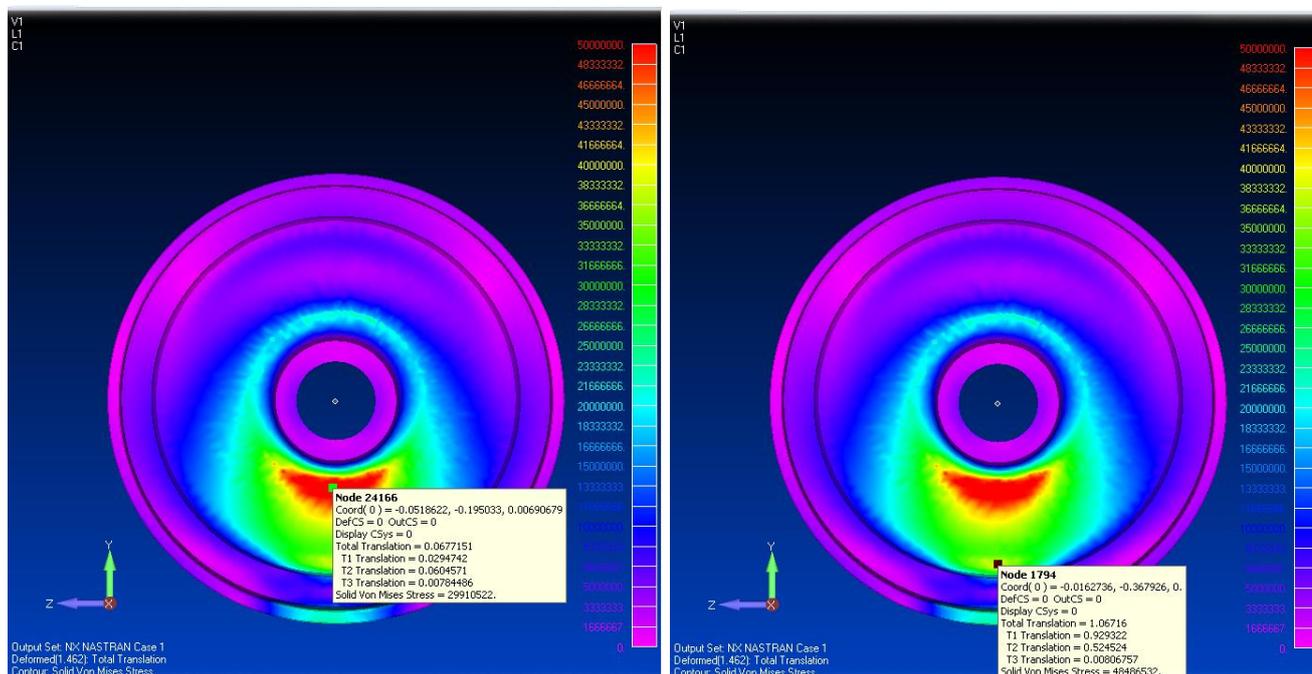


Рис. 5.1 – Результаты НДС цельнокатаного колеса – внешняя сторона

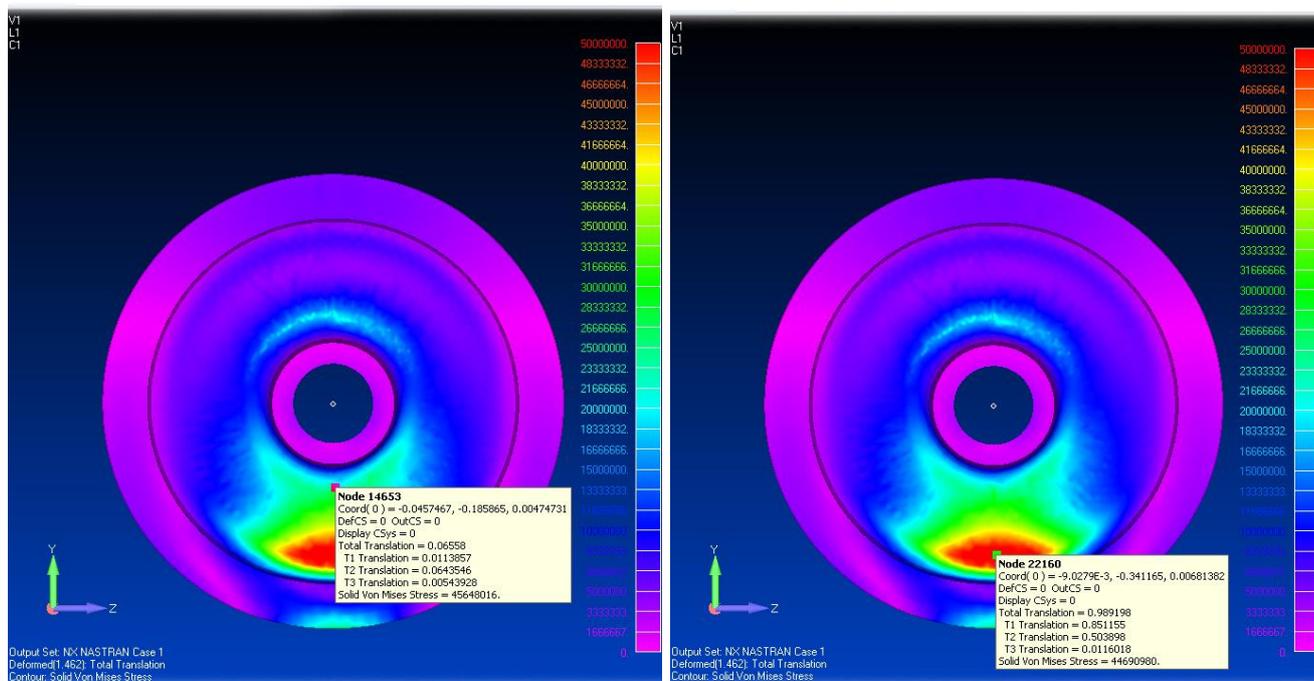


Рис. 5.2 – Результаты НДС цельнокатаного колеса – внутренняя сторона

Необходимо отметить, что максимальная интенсивность эквивалентных напряжений (для колеса в целом) располагается в приободной зоне с внешней стороны (в зоне образования в процессе эксплуатации кольцевых трещин). Оказалось, что в рассмотренном случае вид НДС, характеризуемый коэффициентом Π , равного отношению первого инварианта тензора напряжений ко второму [11], равен $\Pi = -0,7$. В свою очередь, в приступичной зоне на внутренней поверхности колеса уровень интенсивности напряжений на 30 МПа ниже (рис. 5.2). При этом расчетная величина Π в этой зоне имеет значение, равное $\Pi = -0,9$. В приступичной зоне на внешней поверхности (рис. 5.1) и в приободной зоне с внутренней стороны (рис. 5.2) колеса вид НДС примерно одинаковый и характеризуется величиной Π , равной $\Pi = -1,2$.

Величина коэффициента Π является инвариантной характеристикой вида НДС – её большим значениям соответствует (по терминологии Г.А. Смирнова-Аляева [11]) более «жесткий» вид НДС, а её меньшим значениям – более «мягкий» вид НДС. Помимо физической инвариантности, особенностью и, одновременно, преимуществом критерия Π , является его зависимость от всех трех главных напряжений в очаге возможного разрушения. По данным работ [3], [11], [12] параметр Π существенно влияет на появление и развитие дефектов в материале конструкций, причём с уменьшением величины Π в условиях циклического нагружения пластичность и ресурс циклической работы материала конструкции увеличивается.

Полученные значения Π показывают, что в приободной зоне (рис. 5.1) вид НДС более «жестко» [12], чем в приступичной, а ресурс усталостной работы материала, как показывает опыт эксплуатации колес рассмотренного типа (см. рис. 1), более низкий.

Исследование конструкционной прочности материала объекта исследования

В соответствии с реализацией расчетно-экспериментальной методики [4], [5], [6] для определения значений прочностных характеристик материала колеса при выявленных значениях коэффициента Π , необходимо осуществить подбор соответствующих экспериментальных лабораторных образцов так, чтобы вид их НДС совпадал с видом НДС конструкции, прочность материала которой оценивается. Была изготовлена серии дисковых лабораторных образцов [13] в количестве трех штук. Их размеры [14] подбирались так, чтобы в их рабочей зоне вид НДС характеризовался значением Π , близким к $\Pi = -0,7$, что характерно НДС зоны колеса, где происходит образование в процессе эксплуатации кольцевых трещин. Материал экспериментальных образцов подбирался близким к свойствам стали, используемой при изготовлении цельнокатаных железнодорожных колес. Таким материалом, близким по своим физико-механическим характеристикам к колесной стали, стала сталь марки 50ХФА.

Предварительно было осуществлено испытание на растяжение стандартных круглых образцов из стали 50ХФА. Результаты показали, что выбранная сталь характеризуется значениями предела текучести $\sigma_T = 1050$ МПа, предела прочности $\sigma_B = 1300$ МПа и относительным удлинением $\delta = 7,5$ %.

Экспериментальное разрушение дисковых образцов осуществлялось на типовой одноприводной испытательной машине Instron 5989. Оно показало, что усилия в момент разрушения (момент появления трещины в рабочей зоне образцов) соответствовали усилию $65,5 \pm 1$ кН (по результатам усреднения экспериментальных данных для трех разрушенных образцов). Полученное значение усилия использовано как исходная величина для численного по МКЭ анализа НДС конструктивного варианта образца в момент его разрушения. При этом использовались заранее разработанные расчетные модели деформирования, подтвержденные вычислительными тестами. В качестве математической модели процесса развития упругопластических деформаций использованы уравнения пластического течения с изотропным упрочнением (уравнения Прандтля-Рейсса [15]). Результаты анализа упругопластического деформирования показали, что для испытанных лабораторных образцов предельное значение интенсивности напряжений в их рабочей зоне, соответствующее моменту их разрушения, равно 1650 МПа, что существенно больше значения предела прочности исследуемой стали, определенного в условиях одноосного растяжения и равного 1300

МПа. Это обстоятельство позволяет утверждать, что НДС материала, по свойствам близкого к свойствам материала колеса, в приободной зоне колеса с внешней стороны (в зоне образования кольцевых трещин), характеризуется относительно «жестким» видом НДС [11] и достаточно высоким уровнем напряжений сжатия.

Заключение

Выполнены теоретические исследования с использованием МКЭ НДС колеса железнодорожного вагона с плоскоконической формой диска при движении вагона в криволинейном участке пути. Анализ конечно-элементного моделирования показал, что в приободной зоне вид НДС существенно более «жестко», чем в приступичной зоне, что влияет на ресурс статической и усталостной прочности, он становится более низкий.

Разработка расчётной методики оценки статической и усталостной прочности деталей, характеризуемых, как и колесо железнодорожного вагона, относительно мягким видом НДС, требует разработки критериев их конструкционной прочности, зависящих от величины вида НДС (коэффициента Π). В тоже время, достоверность и точность указанных критериев может быть оценена на основе использования специальных лабораторных образцов, позволяющих моделировать необходимый вид НДС, аналогичного тому виду, который возникает в материале оцениваемой конструкции.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Изд-во Дельта, 2008. – 816 с.
2. Лебедев А.А. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук [и др.]. – Киев: Изд-во Дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
3. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Зеньков Е.В. Уточнение уравнений предельного состояния материала конструкций с учетом реального вида их деформирования / Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – №2. – С. 28–34.
5. Zenkov E.V. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Vol. 40. – pp. 124-132 DOI: 10.18720/МПМ.4012018_15.
6. Зеньков Е.В. Методика расчета на прочность деталей машин с учетом вида напряженного состояния / Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик, А.А. Пыхалов // Механика XXI века, – 2015. – № 14. – С. 57-61.
7. Зеньков Е.В. Дискретное моделирование напряженно-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок / Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик, А.А. Пыхалов // Вестник ИрГТУ. – 2011. – №7(54). – С. 6 – 12.
8. ГОСТ 33783-2016 Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности. – М.: Стандартинформ, 2016. – 61 с.
9. Цвик Л.Б. Вычислительная механика деформирования деталей вагонов : монография / Л.Б. Цвик, Е.В. Зеньков, И.С. Бочаров. – Иркутск : ИрГУПС, 2020. – 164 с.
10. Кулешов А.В. Оценка прочности несущих элементов железнодорожных вагонов: метод. пособие по лабораторному курсу дисциплины «Конструирование и расчет вагонов» / А.В. Кулешов, Л.Б. Цвик. – Иркутск : ИрГУПС, 2015. – 208 с.
11. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
12. Гагарин Ю.А. Исследование поведения дефектов в полях растягивающих и сжимающих напряжений / Ю.А. Гагарин, С.Н. Пичков // Проблемы прочности и пластичности. Межвузовский сборник. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. – С. 11-116.
13. Патент на изобретение №2734276 РФ, МПК G01N3/08. Дисковый образец для оценки конструкционной прочности материала / Л.Б. Цвик, Е.В. Зеньков, И.С. Бочаров, Д.А. Еловенко. – №2019133638; заявл. 22.10.2019; опубл. 14.10.2020 г. Бюл. № 29.
14. Зеньков Е.В. Способ исследования конструкционной прочности материалов на стандартном испытательном оборудовании / Е.В. Зеньков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2021. – № 10. – С. 31-34.
15. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Малинин Н.Н. – М.: Машиностроение, 1975. 398 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pisarenko G. S. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Reference book on resistance of materials] / G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. V. Matveev. - Kiev: Publishing house Delta, 2008. -- 816 p [in Russian]
2. Lebedev A.A. Mekhanicheskiye svoystva konstruktсионnykh materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Mechanical properties of structural materials in a complex stress state] / Lebedev and B.I. Kovalchuk [and others]. - Kiev: Publishing house "In Yure", 2003. - 540 p [in Russian]
3. Kogaev V.P. Raschety detaley mashin i konstruktсий na prochnost' i dolgovechnost' [Calculations of machine parts and structures for strength and durability] / V.P. Kogaev, N.A. Makhutov, A.P. Gusenkov. - M. : Mashinostroenie, 1985. -- 224 p. [in Russian]

4. Zenkov E.V. Utochneniye uravneniy predel'nogo sostoyaniya materiala konstruktсий s uchetom real'nogo vida ikh deformirovaniya [Refinement of the equations of the limiting state of the material of structures taking into account the real type of their deformation] / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. - 2017. - No. 2. - P. 28–34. [in Russian]
5. Zenkov E.V. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // *Materials Physics and Mechanics*. – 2018. – Vol. 40. – pp. 124-132 DOI: 10.18720/MIIM.4012018_15.
6. Zenkov E.V. Metodika rascheta na prochnost' detaley mashin s uchetom vida napryazhennogo sostoyaniya [Method of calculating the strength of machine parts taking into account the type of stress state] / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik, A.A. Pykhalov // *Mekhaniki XXI veku* [Mechanics of the XXI century], - 2015. - No. 14. - P. 57-61. [in Russian]
7. Zenkov E.V. Diskretnoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ploskotsilindricheskikh obraztsov s kontsentratorami napryazheniy v vide kanavok [Discrete modeling of the stress-strain state of plane-cylindrical specimens with stress concentrators in the form of grooves] / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik, A.A. Pykhalov // *Vestnik IrGTU* [Bulletin of ISTU]. - 2011. - No. 7 (54). - P. 6 - 12. [in Russian]
8. GOST 33783-2016 Kolesnyye pary zhelezнодорожного подвижного состава. Metody opredeleniya pokazateley prochnosti [Wheelsets of railway rolling stock. Methods for determining strength indicators]. - М.: Standartinform, 2016. - 61 p. [in Russian]
9. Tsvik L.B. Vychislitel'naya mekhanika deformirovaniya detaley vagonov : monografiya [Computational mechanics of deformation of car parts: monograph] / L.B. Tsvik, E.V. Zenkov, I.S. Bocharov. - Irkutsk: IrGUPS, 2020. -- 164 p. [in Russian]
10. Kuleshov A.V. Otsenka prochnosti nesushchikh elementov zhelezнодорожных vagonov: metod. posobiye po laboratornomu kursu distsipliny «Konstruirovaniye i raschet vagonov [Strength assessment of load-bearing elements of railway cars: method. manual for the laboratory course of the discipline "Design and calculation of cars"] / A.V. Kuleshov, L.B. Zwick. - Irkutsk: IrGUPS, 2015. -- 208 p. [in Russian]
11. Smirnov-Alyayev G.A. Mekhanicheskiye osnovy plasticheskoy obrabotki metallov. Inzhenernyye metody [Mechanical foundations of plastic processing of metals. Engineering methods] / G.A. Smirnov-Alyayev. - L.: Mechanical engineering, 1968. -- 272 p. [in Russian]
12. Gagarin Yu.A. Issledovaniye povedeniya defektov v polyakh rastyagivayushchikh i szhimayushchikh napryazheniy [Investigation of the behavior of defects in tensile and compressive stress fields] / Yu.A. Gagarin, S.N. Pichkov // *Problemy prochnosti i plastichnosti. Mezhvuzovskiy sbornik* [Problems of Strength and Plasticity. Interuniversity collection]. - Nizhny Novgorod: Publishing house of NNSU, 2000. - P. 11-116. [in Russian]
13. Patent for invention No. 2734276 RF, IPC G01N3 / 08. Diskovyy obrazets dlya otsenki konstruktsionnoy prochnosti materiala [Disk sample for assessing the structural strength of the material] / L.B. Tsvik, E.V. Zenkov, I.S. Bocharov, D.A. Elovenko. - No. 2019133638; declared 10/22/2019; publ. 14.10.2020 Bul. No. 29. [in Russian]
14. Zenkov E.V. Sposob issledovaniya konstruktsionnoy prochnosti materialov na standartnom ispytatel'nom oborudovanii [Method of researching the structural strength of materials on standard testing equipment] / E.V. Zenkov // *Transportnoye, gornoye i stroitel'noye mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production]. - 2021. - No. 10. - P. 31-34. [in Russian]
15. Malinin N.N. Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep] / Malinin N.N. - М.: Mashinostroyeniye, 1975. 398 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.008>

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РОТАЦИОННОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА И СЕМЯН

Научная статья

Ильичева Ю.В.¹, Лизункова О.В.², Холоденкина Т.С.^{3,*}

^{1, 2, 3} Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия

* Корреспондирующий автор (servis20172017[at]yandex.ru)

Аннотация

На территории России имеется огромный опыт разработки и эксплуатации пылеулавливающего оборудования. Базируясь на фундаментальных научных исследованиях учёных научно-исследовательского института сельского хозяйства Северо-востока им. Н. В. Рудницкого, Вятской государственной сельскохозяйственной академии и множества других учебных заведений разработаны и запущены в производство множество пылеулавливающих устройств, применяемых в послеуборочной обработке зерна и семян. Несмотря на вышесказанное данная отрасль требует более детального рассмотрения и совершенствования. Целью данной работы является разработка высокоэффективного ротационного пылеуловителя для очистки воздуха в процессах обработки зерна и семян.

Ключевые слова: очистка воздуха, пылеотделение, пылеуловитель, ротационный пылеуловитель, технологическая схема, устройства для улавливания пыли.

JUSTIFICATION AND DEVELOPMENT OF A ROTARY DUST COLLECTOR FOR AIR PURIFICATION DURING POST-HARVEST PROCESSING OF GRAIN AND SEEDS

Research article

Ilyicheva Yu.V.¹, Lizunkova O.V.², Kholodenina T.S.^{3,*}

^{1, 2, 3} Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russia

* Corresponding author (servis20172017[at]yandex.ru)

Abstract

Russia has a huge experience in the development and operation of dust-collecting equipment. The Scientific Research Institute of Agriculture N. V. Rudnitsky North-East, Vyatka State Agricultural Academy and many other educational institutions have developed and put into production many dust-collecting devices used in post-harvest processing of grain and seeds. Despite the aforementioned results, this industry requires more detailed consideration and improvement. The purpose of this study is to develop a highly efficient rotary dust collector for air purification in grain and seed processing processes.

Keywords: air purification, dust separation, dust collector, rotary dust collector, technological scheme, devices for dust capture.

Введение

Загрязнение воздуха рабочей зоны, внутри и снаружи производственных помещений является следствием послеуборочных процессов при обработке зерна. В роли «загрязнителей» воздуха выступает сельскохозяйственная техника, предназначенная для обработки, транспортировки и перемещения зерновых культур (зерноочистительные машины, сушильные установки, зернопроводы и т.д.), установки для вентилирования и др [1], [2].

Для предотвращения загрязнения воздуха в помещениях до предельно-допустимых концентраций предназначена вентиляционная и пылеулавливающая техника. Требования к воздуху в производственных помещениях изложены в СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» и в ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [3], [4].

В настоящее время на рынке существует огромное множество пылеулавливающей техники различных типов. На основании проведённого анализа и классификации конструкций существующих типов пылеуловителей, используемых в агропромышленном комплексе, предпочтение было отдано ротационному пылеуловителю. Основанием для этого послужило то, что ротационные пылеуловители компактны, потребляют мало электроэнергии (до 1000 Вт/(м³/с)), обладают высокой степенью очистки воздуха от пыли и лёгких примесей (эффективность очистки до 0,1 мм), отличаются высокой компоновкой [5], [6], [10], [11]. Несмотря на вышесказанное, данные устройства всё-таки нуждаются в более детальном рассмотрении и совершенствовании.

Цель работы – разработать высокоэффективный ротационный пылеуловитель для очистки воздуха в процессах обработки зерна и семян.

Методы и принципы исследования

При разработке технологической схемы ротационного пылеуловителя проводился анализ существующих конструкций, определение степени влияния отдельных факторов на функционирование установки и как следствие, обоснование конструкции самой установки [6], [8], [12], [13]. Теоретические исследования выполнены с использованием положений и законов классической механики и основ математического анализа.

Экспериментальные исследования проводились по стандартным и разработанным методикам. При проведении исследований применена методика планирования эксперимента.

Основные результаты

Основываясь на данных, полученных в результате рассмотрения ротационного поперечно-поточного пылеуловителя [2], принятого за прототип, была предложена усовершенствованная схема ротационного пылеуловителя и разработана патентная схема (см. рисунок 1).

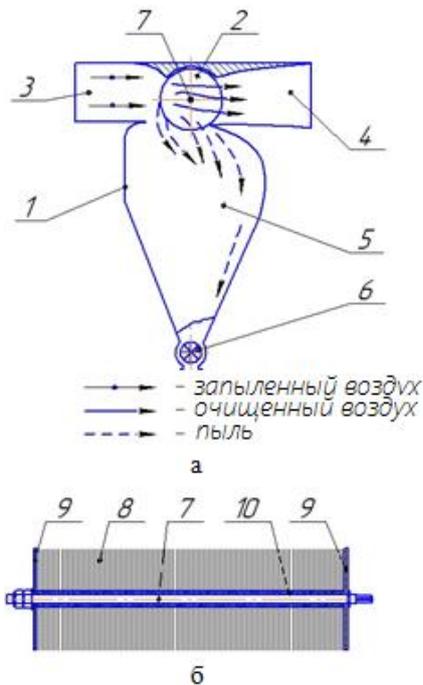


Рис. 1 – Схема ротационного пылеуловителя:

- а) 1 – корпус; 2 – ротор; 3, 4 – входной и выходной патрубки; 5 – пылесборник; 6 – устройство для вывода пыли;
 б) 7 – вал; 8 – тонкие гибкие диски; 9 – сплошные диски; 10 – шайбы

Предлагаемый ротационный пылеуловитель, содержит корпус 1, установленный в нём вращающийся ротор 2, входной 3 и выходной 4 патрубки, пылесборник 5 с устройством 6 вывода уловленной пыли. Выходной патрубком 4 расположен на корпусе 1 напротив входного патрубка 3 и сообщён с ним посредством каналов ротора 2, причём осевые линии входного 3 и выходного 4 патрубков расположены перпендикулярно оси вращения ротора 2, а ширина патрубков 3, 4 и пылесборника 5 равна ширине корпуса. Ротор 2 выполнен в виде вала 7 с расположенными с боковых сторон сплошными дисками 8, между которыми с зазорами установлены тонкие гибкие диски 9. Зазор между тонкими гибкими дисками 9 обеспечивается с помощью шайб 10.

Ротационный пылеуловитель работает следующим образом.

Вращаясь, тонкие гибкие диски 9 ротора 2 под действием центробежных сил выпрямляются, благодаря чему зазор между ними, образованный за счёт толщины шайб 10, становится одинаковым.

Запылённый воздух, удаляемый, например, из пневмосистемы зерноочистительной машины, нагнетается во входной патрубок 3 пылеуловителя, перемещается к ротору 2 и поступает в каналы для перемещения воздуха между дисками 9, образованные за счёт зазоров между ними.

На частицы пыли в каналах между дисками 9 действуют две основные силы: аэродинамическая сила, направленная по траектории движения потока воздуха, т.е. от периферии ротора 2 к его центру, и центробежная сила, направленная от его центра к периферии и возникающая из-за того, что в пограничном слое частота вращения пылевоздушной смеси достигает частоты вращения дисков 9. Когда значение центробежной силы преобладает над аэродинамической, частицы пыли отбрасываются за пределы ротора 2 и поступают в пылесборник 5, откуда устройством 6 выводятся наружу.

Очищенный воздух из центральной части ротора продолжает движение в поперечном направлении и вновь перемещается по каналам между дисками 9, но уже от центра к периферии – в сторону выходного патрубка 4.

Повышение эффективности пылеулавливания достигается за счёт применения ротора, выполненного в виде тонких гибких дисков, выпрямляющихся под действием центробежных сил при его вращении и установленных с зазорами, причём для повышения эффективности улавливания пыли зазоры между дисками можно уменьшать.

Также были проведены исследования, позволяющие определить зависимость эффективности пылевыделения E_o (%), от концентрации лёгких примесей μ ($\text{г}/\text{м}^3$) и зависимость эффективности выделения пыли E_o (%), от скорости воздуха V ($\text{м}/\text{с}$). Исследования проводились на лабораторной установке, изготовленной по предложенной схеме ротационного пылеотделителя.

С целью определения зависимости эффективности пылевыделения E_o (%), от концентрации лёгких примесей μ ($\text{г}/\text{м}^3$) применялся однофакторный метод планирования эксперимента. Исследование заключалось в изменении концентрации лёгких примесей μ ($\text{г}/\text{м}^3$). Диапазон концентрации лёгких примесей в воздушном потоке μ ($\text{г}/\text{м}^3$) задавался от $10 \text{ г}/\text{м}^3$ до $40 \text{ г}/\text{м}^3$ при скорости воздушного потока $V=11,15 \text{ м}/\text{с}$. Концентрация лёгких примесей регулировалась скоростью вращения рукоятки, расположенной на устройстве для ввода пыли. При вращении рукоятки со скоростью 1 об/с концентрация запылённости μ составляла $10 \text{ г}/\text{м}^3$, 2 об/с – $20 \text{ г}/\text{м}^3$, 3 об/с – $30 \text{ г}/\text{м}^3$ и 4 об/с – $40 \text{ г}/\text{м}^3$. При заданных условиях эффективность пылеулавливания E_o (%) варьировалась от 42,17 % до 43,8 %.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что с увеличением скорости V ($\text{м}/\text{с}$) на входе в пылеуловитель эффективность выделения пыли E_o (%) снижается. С увеличением скорости воздушного потока на входе в ротационный пылеуловитель частицы лёгких примесей перемещаются в воздухоподводящем канале с возросшей скоростью, поэтому успевают переместиться на большее расстояние от наружного диаметра к центру ротора, на них позднее начинают оказывать преобладающее влияние центробежная сила, сила Кориолиса и сила тяжести,

способствующие отводу частиц в пылеулавливатель. Поэтому с увеличением скорости воздуха на входе в ротационный пылеуловитель уменьшается эффективность пылевыделения.

Для определения зависимости эффективности выделения пыли $E_o(\%)$, от скорости воздуха V (м/с) применяли однофакторный метод планирования эксперимента. Суть эксперимента заключалась в измерении скорости воздуха V , м/с в зависимости от различных положений регулятора скорости воздушного потока. Значения скорости воздуха V (м/с) варьировали в диапазоне 1,68 ... 2,25 м/с. Для каждого из положений регулятора скорости воздушного потока показания прибора фиксировались 10 раз. Затем алгебраически вычисляли среднее значение скорости воздушного потока, для каждого положения регулятора скорости воздуха. С целью дальнейшего исследования были выбраны 1, 2, 3, 4 и 7 положения регулятора скорости воздуха. Для каждого из положений регулятора скорости воздуха с трёхкратной повторностью фиксировалось значение эффективности выделения пыли $E_o(\%)$, для получения более точного результата.

Зависимость эффективности выделения $E_o(\%)$ лёгких примесей от их концентрации μ (г/м³) описывается уравнением второго порядка:

$$y = -0,002x^2 + 0,140x + 40,92 \quad (1)$$

Коэффициент аппроксимации R^2 в данном случае составляет 0,373, а корреляционное отношение $\eta=0,61$. Линейная зависимость описывается уравнением, где $R^2 = 0,248$, а коэффициент корреляции $r = 0,49$:

$$y=0,028x+42,05, \quad (2)$$

Таким образом, корреляция между экспериментальными данными и полученными уравнениями статистически значимой не является [11], поэтому можно сделать вывод, что концентрация запылённости в изученных пределах $\mu=10 \dots 40$ г/м³ не влияет на эффективность выделения примесей.

Заключение

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований была разработана технологическая схема, а также обоснованы параметры ротационного пылеуловителя. Изготовлена лабораторная установка. На основании разработанной схемы ротационного пылеуловителя была сформирована и отправлена заявка на патент РФ. В ходе проведенных экспериментальных исследований были изучены влияние концентрации лёгких примесей на эффективность пылевыделения, а также влияние скорости воздуха в канале на эффективность пылеулавливания. По полученным данным построены графики, описывающие вышеуказанные зависимости. Исследования показали, что с увеличением скорости V (м/с) на входе эффективность выделения пыли $E_o(\%)$ снижается, а концентрация запылённости воздуха в изученных пределах $\mu=10 \dots 40$ г/м³ не влияет на эффективность пылеулавливания $E_o(\%)$.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Справочное издание / Г.М.-А. Алиев. – М.: Металлургия, 1986. – С.129-130.
2. Бурков А.И. Патент РФ, № 2122462 МПК6 В 01 D45/14. Поперечно-поточный ротационный пылеуловитель / А.И. Бурков, В.Л. Андреев, В.А. Казаков. Заявлено 21.04.97 Опубликовано -19.02. 1998. Бюллетень № 33
3. ГОСТ 10921-2017. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний – Введ. 30. 11.2017. – М.: Стандартиформ,2017. - 45 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» - М.: Изд-во стандартов, 1988.- 8 с.
5. ГОСТ 122043-90. Оборудование пылеулавливающее. Классификация. -Введ. 01. 01.80. - М.: Изд-во стандартов,1980. - 8 с.
6. Ильичёв В.В. Выбор устройств для улавливания пыли в зависимости от условий их функционирования / В.В. Ильичёв // Вестник НГИЭИ. -2014. - №10. – С. 73-81
7. Казаков В.А. Обоснование технологической схемы и параметров ротационного поперечно-поточного пылеуловителя для очистки воздуха в процессах обработки зерна и семян / В.А. Казаков: Дис. ... канд. техн. наук. – Киров, 1999.155 с.
8. Лянденбургский В.В. Основы научных исследований / В.В. Лянденбургский, В.В. Коновалов, А.В. Баженов. Учебное пособие. Пенза, 2013.
9. Овчинников Д.Н. Повышение эффективности зерноочистительных систем / Д.Н. Овчинников, Ю.И. Овчинникова // Вестник Курганской ГСХА.2018. № 4. С. 68 – 71.
10. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 188-189.
11. Понамарев А.Б. Методология научных исследований / А.Б. Понамарев, Э.А. Пикулева. Учебное пособие. Пермь, 2014.
12. Попов И.П. Решетный стан зерноочистительной машины / И.П. Попов, В.Г. Чумаков, Д.П. Попов и др. // Сельский механизатор. 2015. № 4. С.8-9.

13. Холоденина Т.С. Анализ и классификация пылеуловителей, используемых в агропромышленном комплексе / Т.С. Холоденина // Современная наука: актуальные проблемы и перспективы развития: материалы и доклады Международной научно-практической конференции, 8–14 мая 2019 г. Том 2. С. 204-215.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Aliev G.M.-A. Tekhnika pyleulavlivaniya i ochestki promyshlennykh gazov. Spravochnoe izdanie [The technique of dust extraction and purification of industrial gases. Reference edition] / G. M.-A. Aliev. - M.: Metallurgiya, 1986. - p.129-130 [in Russian]
2. Burkov A.I. Patent of the Russian Federation, No. 2122462 MPK6 B 01 D45/14. Poperechno-potochnyy rotatsionnyy pyleulovitel' [Cross-flow rotary dust collector] / A. I. Burkov, V. L. Andreev, V. A. Kazakov. Date of application: 21.04.97 Published: 19.02.1998. Bulletin No. 33 [in Russian]
3. GOST 10921-2017. Ventilatory radial'nye i osevye. Metody aerodinamicheskikh ispytaniy [Radial and axial fans. Methods of aerodynamic tests]. Introduced 30. 11.2017. - Moscow: Standartinform, 2017. - 45 p. [in Russian]
4. GOST 12.1.005-88 Obshhie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozdukhу rabochey zony [General sanitary and hygienic requirements for the air of the working area] - Moscow: Publishing house standartov, 1988.- 8 p. [in Russian]
5. GOST 122043-90. Oborudovanie pyleulavlivajushhee. Klassifikacija [Dust-collecting equipment. Classification]. - Introduced 01. 01.80. - Moscow: Publishing House of Standards, 1980. - 8 p. [in Russian]
6. Ilyichev V.V. Vybór ustrojstv dlja ulavlivaniya pyli v zavisimosti ot uslovijj ikh funkcionirovaniya [Selection of devices for dust collection depending on the conditions of their operation] / V.V. Ilyichev // Vestnik NGIEI [Bulletin NGIEI]. -2014. - No. 10. - pp. 73-81 [in Russian]
7. Kazakov V.A. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy i parametrov rotatsionnogo poperechno-potochnogo pyleulovitelja dlja ochestki vozdukhа v processakh obrabotki zerna i semjan [Substantiation of the technological scheme and parameters of a rotary cross-flow dust collector for air purification in grain and seed processing] / V. A. Kazakov: Candidate's thesis. Engineering. - Kirov, 1999.155 p. [in Russian]
8. Lyandenbursky V.V. Osnovy nauchnykh issledovaniy. Uchebnoe posobie [Fundamentals of scientific research. A Manual] / V. V. Lyandenbursky, V. V. Kononov, A. V. Bazhenov. Penza, 2013 [in Russian]
9. Ovchinnikov D.N. Povyshenie ehffektivnosti zernoochestitel'nykh sistem [Improving the efficiency of grain cleaning systems] / D. N. Ovchinnikov, Yu. I. Ovchinnikova // Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy.2018. No. 4, pp. 68-71 [in Russian]
10. Pirumov A.I. Obespylivanie vozdukhа [Dedusting of air] / A. I. Pirumov. - 2nd edition., Revised and Expanded - M.: Stroyizdat, 1981. - pp. 188-189 [in Russian]
11. Ponamarev A.B. Metodologija nauchnykh issledovaniy. Uchebnoe posobie [Methodology of scientific research. A Manual] / A. B. Ponamarev, E. A. Pukuleva. Perm, 2014 [in Russian]
12. Popov I.P. Reshetnyy stan zernoochestitel'noy mashiny [The sieve mill of a grain cleaning machine] / I. P. Popov, V. G. Chmakov, D. P. Popov, et al. // Selsky mekhanizator [Rural mechanizer]. 2015. No. 4, pp.8-9 [in Russian]
13. Kholodenina T.S. Analiz i klassifikacija pyleulovitelej, ispol'zuemykh v agropromyshlennom komplekse [Analysis and classification of dust collectors used in the agro-industrial complex] / T. S. Kholodenina // Sovremennaja nauka: aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya: materialy i doklady Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Modern science: actual problems and prospects of development: materials and reports of the International Scientific and Practical Conference], May 8-14, 2019 Volume 2, pp. 204-215 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.009>

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА КОРОННЫЙ РАЗРЯД

Научная статья

Рахаев А.В.^{1,*}, Шишков Е.М.²

^{1,2} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

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

Аннотация

В статье показана необходимость снижения потерь на коронный разряд в электрических сетях. Для этого изучены статистические данные сетевых компаний, а также результаты научных исследований. В качестве мероприятия по снижению потерь рассматривается оптимизация режимов электрических сетей. Описаны существующие методы оптимизации, обозначен их недостаток – отсутствие учета управляющих воздействий, реализуемых устройствами FACTS. Предложена модификация методов оптимизации с целью устранения неучёта устройств FACTS в задаче оптимизации. Показана математическая модель модифицированного метода оптимизации. Внедряемый метод проверен на расчётной модели в программных комплексах «RastrWin3», «Matlab». По результатам успешной проверки установлена работоспособность предложенной модификации методов оптимизации.

Ключевые слова: коронный разряд, суммарные потери, методы оптимизации, FACTS, расчётная модель.

MODIFICATION OF METHODS FOR OPTIMIZING THE MODES OF ELECTRICAL NETWORKS IN ORDER TO REDUCE POWER LOSSES FOR CORONA DISCHARGE

Research article

Rakhaev A.V.^{1,*}, Shishkov E.M.²

^{1,2} Samara State Technical University, Samara, Russia

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

Abstract

The article demonstrates the need to reduce corona discharge losses in electrical networks. To achieve this goal, the authors examine the statistical data of network companies, as well as the results of scientific research on this topic. As means of reducing losses, the study considers optimization of the modes of electrical networks. The authors describe the existing optimization methods and highlight their disadvantage, which is the lack of consideration of control actions implemented by FACTS devices. The study presents a modification of optimization methods with the goal of eliminating the omission of FACTS devices in the optimization problem. A mathematical model of the modified optimization method is also shown. The implemented method was tested on a computational model in Rastrwin3 and Matlab. Based on the results of a successful check, the study establishes the operability of the proposed modification of optimization methods.

Keywords: corona discharge, total losses, optimization methods, FACTS, calculation model.

Введение

Анализ статистических данных сетевых компаний о режимах работы электрических сетей, а также изучение результатов исследований российских учёных [1] показывают значительный уровень потерь электроэнергии. В 2007 году потери электроэнергии составили 21401,11 млн.кВт*ч. Доля потерь на коронный разряд составила 20%, то есть более 4000 млн кВт*ч. Как отмечается в [2], стоимость электрической энергии, приобретенной в целях компенсации потерь, в 2010 году составила 14,2 млрд руб. (в том числе 3,5 млрд потери на коронный разряд). Проблема снижения потерь признана сетевыми компаниями актуальной, необходима реализация мероприятий, направленных на оптимизацию режимов работы электрических сетей. Согласно исследованиям [2], обеспечение оптимальных режимов при уровне потерь электроэнергии 2010 года позволит сэкономить 570 млн. рублей. В условиях перспективной интеллектуализации и цифровизации энергетики, проблема снижения потерь звучит особенно остро.

Говоря о необходимости снижения потерь на коронный разряд, стоит также отметить их зависимость от ряда факторов, такие как уровни напряжения, погодные условия [3]. На рисунке 1 наглядно представлена зависимость потерь на коронный разряд от погодных условий, что свидетельствует о необходимости оптимизации в режиме реального времени.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод, что оптимизация режимов электрической сети с целью снижения потерь мощности и электроэнергии на коронный разряд является сложной математической задачей.

Данная работа своей задачей ставит модификацию существующих аналитических методов оптимизации с целью учёта управляющих воздействий устройств FACTS. Актуальность работы обусловлена возрастающим применением устройств FACTS как в России, так и за рубежом. Учёт устройств FACTS в задачах оптимизации на текущий момент проработан недостаточно. Малое количество работ по данной тематике, а некоторые из устройств FACTS не рассмотрены вообще, что подтверждает значимость работы.

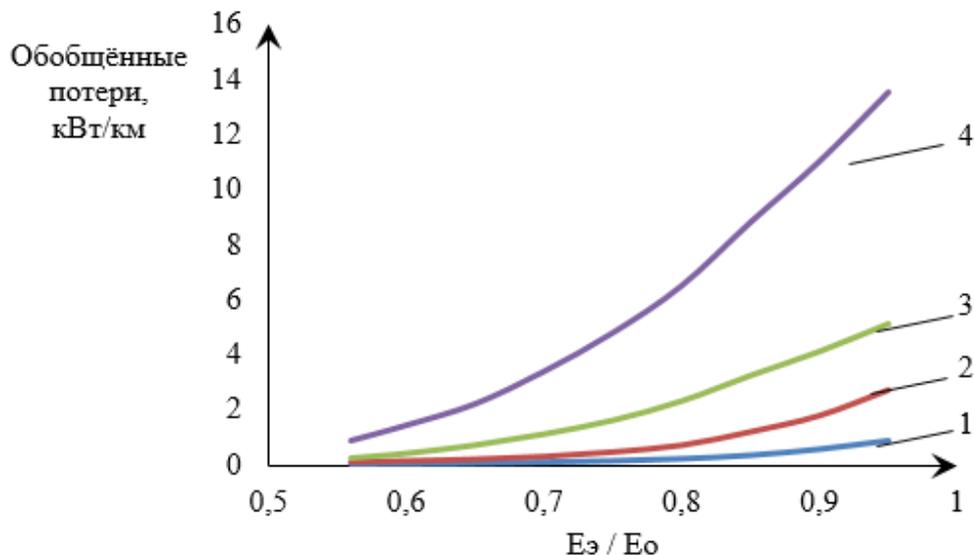


Рис. 1 – Зависимость потерь на коронный разряд от погодных условий:

$E_э$ – эквивалентная напряжённость электрического поля; E_0 – начальная напряжённость электрического поля;
 1 – «хорошая погода»; 2 – сухой снег; 3 – дождь; 4 – изморозь

Методы и принципы исследования

Проблема оптимизации электроэнергетических режимов возникла ещё на ранних этапах создания энергосистем. Изначально рассматривалась оптимизация по активной мощности, поскольку при укрупнении энергообъединений возникли вопросы оптимального распределения нагрузки между электростанциями, экономии топлива на тепловых электростанциях, рационального расходования гидроресурсов на гидроэлектростанциях. На текущий момент оптимизация по активной мощности осуществляется ежедневно в рамках краткосрочного и оперативного планирования электрических режимов.

Оптимизация по напряжению и реактивной мощности также нашла своё развитие. Её задачей является определение оптимального режима источников реактивной мощности в целях достижения минимума суммарных потерь активной мощности (представляющих собой сумму потерь на коронный разряд и потерь на нагрев проводов). Оптимизация по напряжению и реактивной мощности не используется так глобально, как оптимизация по активной мощности, и в составе краткосрочного и оперативного планирования электрических режимов не реализуется.

Тем не менее, методы оптимизации по напряжению и реактивной мощности разработаны ещё в 20 веке [4], [5]. Целевую функцию задачи оптимизации по напряжению и реактивной мощности можно представить в обобщённом виде как минимизацию суммарных потерь:

$$F = \Delta P \Rightarrow \min \quad (1)$$

где F – целевая функция, ΔP – суммарные потери мощности.

Результатом оптимизации является вектор независимых переменных X с оптимальными значениями x_i .

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (2)$$

В качестве решения такой задачи применяют итерационные методы. На каждой итерации значение переменных уточняется до тех пор, пока не будут найдены оптимальные значения.

Градиентные методы предполагают, что на каждой итерации k переменная изменяется на величину Δx_i , определяемую градиентом целевой функции [6]:

$$\Delta x_i = \text{grad } F(x_i) \quad (3)$$

$$x_i^k = x_i^{k-1} + \Delta x_i \quad (4)$$

Поиск оптимальных переменных выполняется, пока не будут достигнуты критерии окончания итерационного цикла:

1. Критерий, основанный на минимальном изменении целевой функции на соседних шагах (формула 5). Является наиболее простым критерием, однако не всегда даёт верный результат (как в случае с «овражной» функцией).

$$F^k - F^{k-1} \leq \varepsilon \quad (5)$$

где ε – заранее заданная точность оптимизации.

2. Критерий, основанный на проверке длины градиента (формула 6). Является более сложным в плане реализации, тем не менее является более строгим (позволяет избежать попадания решения в «овраг»).

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2} \leq \varepsilon \quad (6)$$

Градиентный метод может дополняться выбором оптимальной длины шага. На каждой итерации уточняется не только направление шага, но и его длина:

$$x_i^k = x_i^{k-1} + q \Delta x_i \quad (7)$$

где q – оптимальная длина шага. Определяется по выражению [15]:

$$\frac{\partial F}{\partial q} = 0 \quad (8)$$

Обобщённый метод Ньютона обладает более лучшей сходимостью в сравнении с обычным градиентным методом. Вектор приращений переменных ΔX определяется по формуле:

$$\Delta X = - G(x)^{-1} \cdot \text{grad } F(x) \quad (9)$$

где $[G(x)]^{-1}$ – матрица, обратная матрице вторых частных производных (матрице Гессе).

В задаче оптимизации электрических режимов необходимо учитывать ограничения в виде равенств (уравнения связи), например, уравнения узловых напряжений. Для этой цели подходит метод Лагранжа. Суть его заключается в замене целевой функции $F(x, y)$ функцией Лагранжа $L(x, y, \lambda)$:

$$L(x, y, \lambda) = F(x, y) + \sum_{j=1}^L \lambda_j \varphi_j(x, y) \quad (10)$$

где x и y – независимые и зависимые переменные в задаче оптимизации по напряжению и реактивной мощности; $\varphi_j(x, y)$ – уравнения связи размерности j . λ_j – множители Лагранжа.

Далее находятся градиенты функции Лагранжа по всем независимым и зависимым переменным, а также по множителям Лагранжа, аналогично формуле (3).

Метод штрафных функций позволяет учесть ограничения в виде неравенств. В задачах электроэнергетики такими ограничениями могут быть, например, регулировочные диапазоны генераторов электростанции по реактивной мощности, допустимые диапазоны изменения напряжения на распределительных устройствах электростанций и подстанций. Соблюдение данных ограничений необходимо в соответствии с [7], [8], [9], [10]. Для этих целей вводится новая целевая функция $F_{\text{нов}}$:

$$F_{\text{нов}} = F + III \quad (11)$$

где III – штрафная функция. Обычно задают в виде квадратичной функции [4]:

$$III = \sum_{i=1}^N (c_i \cdot (\delta x_i)^2) \quad (12)$$

где δx_i – отклонения независимых переменных от наибольшего или наименьшего значения в допустимом диапазоне; c_i – коэффициент приведения штрафа к размерности целевой функции.

В качестве независимых переменных, применяемых в задаче оптимизации по напряжению и реактивной мощности, рассматривают:

1. Напряжения на выводах генераторов, U_G ;
 2. Состояние (включенное / отключенное) средств компенсации реактивной мощности (батареи статических конденсаторов, шунтирующие реакторы), $B_{БСК}$, $B_{ШР}$;
 3. Коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, K_T .
- Таким образом, вектор независимых переменных можно представить в виде:

$$X = [U_G, B_{БСК}, B_{ШР}, K_T] \quad (13)$$

В последнее время всё большее распространение как за рубежом, так в России получают устройства FACTS. Данные устройства предназначены для плавного векторного регулирования параметров режима, компенсации реактивной

мощности, оптимального распределения потоков активной и реактивной мощности. Управляющие воздействия, осуществляемые данными устройствами, могут быть применены и в задаче оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности. Тем не менее, в существующих методах оптимизации отсутствует учёт управляющих воздействий устройств FACTS. Такой вопрос недостаточно проработан научной литературе. Поставлена задача модификации методов оптимизации с целью возможности учёта устройств FACTS. Рассмотрим управляющие воздействия, реализуемые устройствами FACTS.

1. УШР в моделях установившихся режимов представлен как источник реактивной мощности с заданным напряжением и контролем проводимости. Следовательно, в задаче оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности УШР может быть учтён независимой переменной, величиной напряжения на шинах УШР $U_{УШР}$, а также штрафной функцией, учитывающей ограничения по проводимости.

2. СТК моделируется аналогично УШР, вследствие этого аналогично учитывается в оптимизации. Независимой переменной является величина напряжения на шинах СТК $U_{СТК}$. Штрафная функция учитывает ограничения по проводимости.

3. ФПУ в моделях УР представляется как ветвь с мнимым коэффициентом трансформации $K_{ФПУ}$. Данный коэффициент будет являться независимой переменной в задаче оптимизации. Штрафная функция учитывает ограничения по $K_{ФПУ}$.

4. ТУПК можно представить как продольное ёмкостное сопротивление регулируемой величины $X_{ТУПК}$. Штрафная функция учитывает ограничения по $X_{ТУПК}$.

5. СТАТКОМ моделируется как источник реактивной мощности с заданным напряжением в точке подключения не только по модулю, но и по фазе, а также с контролем генерируемой или потребляемой реактивной мощности. Независимыми переменными являются модуль и фаза напряжения на шинах СТАТКОМ $U_{СТАТ}$ и $\delta_{СТАТ}$. Штрафная функция учитывает ограничения по генерируемой / потребляемой реактивной мощности.

6. АСГ моделируется как источник активной и реактивной мощности с заданным напряжением в точке подключения по модулю и по фазе, а также с контролем генерируемой или потребляемой реактивной мощности. Независимыми переменными являются модуль и фаза напряжения на шинах АСГ $U_{АСГ}$ и $\delta_{АСГ}$. Штрафная функция учитывает ограничения по генерируемой / потребляемой реактивной мощности.

7. ОРПМ в моделях УР учитывается в виде двух источников реактивной мощности – параллельного и последовательного с заданными напряжениями в точке подключения по модулю и по фазе, а также с контролем генерируемой или потребляемой реактивной мощности. Независимыми переменными являются модуль и фаза напряжения обоих источников напряжения $U_{ПАР}$, $\delta_{ПАР}$ и $U_{ПОС}$, $\delta_{ПОС}$. Штрафная функция учитывает ограничения по генерируемой / потребляемой реактивной мощности.

Вектор независимых переменных в задаче оптимизации при учёте FACTS дополняется новыми переменными. Значительно расширяется спектр возможных управляющих воздействий:

$$X = [U_G, B_{БСК}, B_{УШР}, K_T, U_{УШР}, U_{СТК}, K_{ФПУ}, X_{ТУПК}, U_{СТАТ}, \delta_{СТАТ}, U_{АСГ}, \delta_{АСГ}, U_{ПАР}, \delta_{ПАР}, U_{ПОС}, \delta_{ПОС}] \quad (14)$$

Целевая функция дополняется новыми штрафной функцией $Ш_{FACTS}$, учитывающей ограничения устройств FACTS:

$$F_{нов} = \Delta P + Ш + Ш_{FACTS} \quad (15)$$

Как видно, учёт устройств FACTS в задаче оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности приводит к расширению целевой функции и вектора независимых переменных новыми условиями и переменными

Основные результаты

Предложенный метод оптимизации, позволяющий учесть устройства FACTS, целесообразно проверить практически. Для этого в ПК «RastrWin3» [11] была создана расчётная модель установившихся режимов по формату 14-узловой модели IEEE (рис. 2).

В данной модели исследовалась возможность оптимизации режима с воздействием на УШР. В качестве программной среды для написания алгоритмов оптимизации созданной расчётной модели использовался программный комплекс Matlab. Оптимизация осуществлялась методом Лагранжа, поскольку требовался учёт ограничений равенств (уравнения узловых напряжений).

При использовании оптимизации по методу Лагранжа в соответствии с формулами (2, 3) получен режим с допустимыми параметрами. Нарушения нормального режима отсутствуют. При этом удалось достичь снижения потерь мощности на коронный разряд на 3% относительно исходного режима. Незначительное снижение относительно исходного режима обусловлено тем, что исходный режим уже был близок к оптимальному. При возникновении режимов с менее рациональным потокораспределением с точки зрения снижения потерь (например, ремонтные, послеаварийные режимы), эффект от оптимизации будет значительнее. В ходе эксперимента зафиксирована способность предложенного метода оптимизации к поиску оптимальных параметров режима.

5. Горнштейн В.М. Методы оптимизации режимов энергосистем / В.М. Горнштейн, Б.П. Мирошниченко, А.В. Пономарев и др. ; Под ред. В. М. Горнштейна – М. Энергия, 1981 – 336 с., ил.
6. Левитов В.И. Корона переменного тока. Вопросы теории, методов исследования и практических характеристик / В.И. Левитов. – М., «Энергия», 1975.
7. СТО 59012820.27.010.002-2014. Стандарт организации. Правила разработки графика напряжения в контрольных пунктах диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС»: стандарт ОАО «СО ЕЭС»: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом ОАО «СО ЕЭС» от 20.03.2014 № 85: введен впервые: дата введения 2014-03-20 / разработан Открытым акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы». - Москва: ОАО «СО ЕЭС», 2014. - 14 с.
8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
9. Российская Федерация. Приказы Минэнерго РФ. Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем»: приказ Минэнерго РФ от 03.08.2018 № 630: 2018. - 25 с.
10. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. № 229. - 145 с.
11. Программный комплекс «RastrWin3»: руководство пользователя / В.Г. Неуймин, Е.В. Машалов, А.С. Александров, А.А. Багрянцев. – 25.10.2016. – 314 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sharov Yu.V. Izmerenie poter' moshhnosti na koronu v linijah sverhвысокoгo naprjazhenija ОАО «FSK EJeS» [Measurement of power losses to the crown in ultrahigh voltage lines of JSC FGC UES] / Yu.V. Sharov, M.G. Gadzhiev // «JeLEKTRO. Jelektrotehnika. Jelektrojenergetika. Jelektrotehnicheskaja promyshlennost'» ["ELECTRO. Electrical engineering. Electric power industry. Electrical industry"]. 2010. No. 3. P. 19-23. [in Russian]
2. Gadzhiev M.G. Povыshenie tochnosti ucheta poter' moshhnosti na koronu pri operativnoj optimizacii rezhima JeJeS [Improving the accuracy of accounting for power losses on the crown during operational optimization of the EES regime] / M.G. Gadzhiev: Abstract. dis. ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 05.14.02. Moscow: NIU MEI, 2012. 20 p. [in Russian]
3. Rukovodjashhie ukazaniya po uchetu poter' na koronu i pomех ot korony pri vybore provodov vozdushnyh linij jelektroperedachi peremennogo toka 330-750 kV i postojannogo toka 800-1500 kV: Rukovodjashhie ukazaniya [Guidance on accounting for corona losses and interference from the crown when you select the wire of overhead transmission lines AC 330-750 kV and DC 800-1500 sq: Guidelines] / V. V. Burgdorf, N. P. Emelyanov, L. V. Timashev [and others]. - Moscow: Specialized center of research and technical information of the all-Union state trust on the organization and rationalization of regional electric stations and networks, 1975. - 74 p. [in Russian]
4. Arzamashev D.A. ASU i optimizacija rezhimov jenergosistem [Automated control systems and optimization of power systems modes]: Study guide for university students; / D.A. Arzamashev, P.I. Bartolomey, A.M. Kholyan; Ed. Arzamastseva D. A. - M.: Higher School, 1983. - 208 p. [in Russian]
5. Gornstein V.M. Methods of optimization of modes of power systems / V.M. Gornstein, B.P. Miroshnichenko, A.V. Ponomarev et al.; Edited by V. M. Gornstein - M. Energiya, 1981 - 336 p., ill. [in Russian]
6. Levitov V.I. Korona peremennogo toka. Voprosy teorii, metodov issledovaniya i prakticheskikh harakteristik [Crown of alternating current. Questions of theory, research methods and practical characteristics] / V.I. Levitov. - M., "Energy", 1975. [in Russian]
7. СТО 59012820.27.010.002-2014. Standart organizacii. Pravila razrabotki grafika naprjazhenija v kontrol'nyh punktah dispetcherskogo centra ОАО «SO EJeS» [The standard of the organization. Rules for the development of the voltage schedule at the control points of the control center of JSC "SO UES"]: standard of JSC "SO UES": official publication: approved and put into effect by Order of JSC "SO UES" dated 03/20/2014 No. 85: introduced for the first time: date of introduction 2014-03-20 / developed by Open Joint Stock Company "System Operator of the Unified Energy System". - Moscow: JSC "SO UES", 2014. - 14 p. [in Russian]
8. GOST 32144-2013. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija [GOST 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. [in Russian]
9. Rossijskaja Federacija. Prikazy Minjenergo RF. Ob utverzhdenii trebovanij k obespecheniju nadezhnosti jelektrojenergeticheskikh sistem, nadezhnosti i bezopasnosti ob'ektov jelektrojenergetiki i jenergoprinimajushhh ustanovok «Metodicheskie ukazaniya po ustojchivosti jenergosistem» [The Russian Federation. Orders of the Ministry of Energy of the Russian Federation. On approval of requirements for ensuring the reliability of electric power systems, reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations "Guidelines for the stability of power systems"]: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 03.08.2018 No. 630: 2018. - 25 p. [in Russian]
10. Pravila tehniceskoy jekspluatacii jelektricheskikh stancij i setej Rossijskoj Federacii [Rules of technical operation of power plants and networks of the Russian Federation], approved by Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 229. - 145 p. dated June 19, 2003. [in Russian]
11. Programnyj kompleks «RastrWin3»: rukovodstvo pol'zovatelja [Rastrwin3 software package: user's guide] / V.G. Neumin, E.V. Mashalov, A.S. Alexandrov et al. -- 10/25/2016-- - 314 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.010>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ САЖИ И ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

Обзорная статья

Руднев Б.И.¹, Повалихина О.В.^{2,*}

¹ ORCID: 0000-0002-7914-0035;

² ORCID: 0000-0001-7615-854X;

^{1,2} Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

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

Аннотация

Тенденции развития современных судовых дизелей связаны, прежде всего, с увеличением их удельной мощности, улучшением параметров экономичности и экологических характеристик. Это обуславливает появление ряда проблем, важнейшей из которых является проблема тепловой напряженности деталей, образующих камеру сгорания. Высокий уровень тепловых нагрузок указанных деталей судовых дизелей является одной из основных причин снижения их эксплуатационной надежности. Ошибки в расчетных оценках теплового и напряженно-деформированного состояния деталей камеры сгорания на стадии проектирования в настоящий период достигают 30 – 80 %. Это вызывает необходимость совершенствования математических моделей, описывающих процессы теплообмена в камере сгорания судовых дизелей. Целью данной статьи является представление и обсуждение результатов исследований, проведенных авторами, по оптическим характеристикам частиц сажи и радиационному теплообмену в камере сгорания судового дизеля типа 6 ЧН 24/36. Экспериментально доказано, что частицы сажи, образующиеся в камере сгорания судового дизеля, могут быть отнесены к малым с оптической точки зрения. Значения средних за рабочий цикл локальных результирующих потоков излучения для поверхностей крышки цилиндра, поршня и втулки, представленные в статье, позволяют еще на стадии проектирования определить в них величину переменных температурных напряжений. Это очень важно для оценки надежности работы деталей камеры сгорания в эксплуатации.

Ключевые слова: судовой дизель, частицы сажи, спектральный анализ, результирующий поток излучения.

RESULTS OF THE STUDY OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF SOOT PARTICLES AND PARAMETERS OF RADIATION HEAT EXCHANGE IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A MARINE DIESEL ENGINE

Review article

Rudnev B.I.¹, Povalikhina O.V.^{2,*}

^{1,2} Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

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

Abstract

Trends in the development of modern marine diesel engines are primarily associated with an increase in their specific power, improvement of efficiency parameters and environmental characteristics. This causes the appearance of a number of issues, the most important of which is the problem of thermal tension of the parts forming the combustion chamber. The high level of thermal loads of these parts of marine diesel engines is one of the main reasons for their reducing operational reliability. Errors in the calculated estimates of the thermal and stress-strain state of the combustion chamber parts at the design stage currently reach 30 - 80%. This makes it necessary to improve mathematical models describing the processes of heat exchange in the combustion chamber of marine diesel engines. The purpose of this article is to present and discuss the results of research on the optical characteristics of soot particles and radiation heat exchange in the combustion chamber of a marine diesel engine type 6 ChN 24/36 (6 ЧН 24/36). The study experimentally proves that soot particles formed in the combustion chamber of a marine diesel engine can be classified as small from an optical point of view. The average values of the local resultant radiation fluxes for the surfaces of the cylinder cover, piston, and piston boss for the duty cycle presented in the article make it possible to determine their value of variable temperature stresses at the design stage. This is very important for assessing the reliability of the combustion chamber parts in operation.

Keywords: marine diesel, soot particles, spectral analysis, resulting radiation flux.

Введение

Тенденции развития современных дизельных двигателей, в том числе и судовых связаны, прежде всего с увеличением их удельной мощности, улучшением параметров экономичности и экологических характеристик. Это обуславливает появление ряда проблем, важнейшей из которых является проблема тепловой напряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС). Высокий уровень тепловых нагрузок деталей цилиндропоршневой группы современных судовых дизелей является одной из основных причин снижения их эксплуатационной надежности. Состояние математических моделей (ММ), описывающих процессы переноса теплоты в КС дизельных двигателей в настоящее время таково, что ошибки в расчетных оценках теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы на стадии проектирования достигают 30 – 80%. Последнее вызывает необходимость совершенствования как уже существующих ММ, так и разработку новых, которые могли бы более адекватно описывать упомянутые выше процессы. Целью данной статьи является представление и обсуждение результатов расчетных и экспериментальных исследований, проведенных авторами. Тематика этих исследований охватывает весьма обширный круг вопросов, связанных с определением оптических характеристик частиц сажи и радиационного теплообмена в КС судового дизеля [1], [2], [3].

Оптические характеристики частиц сажи и результаты их спектрального анализа

Испытания судового дизеля 6 ЧН 24/36 проводились по стандартной нагрузочной характеристике [4] с регистрацией параметров рабочего процесса и отбором проб частиц сажи на пяти основных режимах: холостой ход, нагрузка 0% от номинальной мощности $Ne_{ном}$, а также 25, 50, 75 и 100% при частоте вращения коленчатого вала $n=500 \text{ мин}^{-1}$. В результате обработки отобранных в процессе испытаний проб частиц сажи на сканирующем микроскопе с высокой разрешающей способностью S-5500 Hitachi (Japan) был получен массив электронно-микроскопических снимков, позволяющий выполнить количественный анализ оптических характеристик, как самих частиц сажи, так и их наноструктур.

На рис. 1 и 2 представлены электронно-микроскопические снимки частиц сажи и их наноструктур, относящихся к режиму холостого хода (0% нагрузки от $Ne_{ном}$) судового дизеля 6 ЧН 24/36 при увеличении соответственно в 100 и 500 тысяч раз.

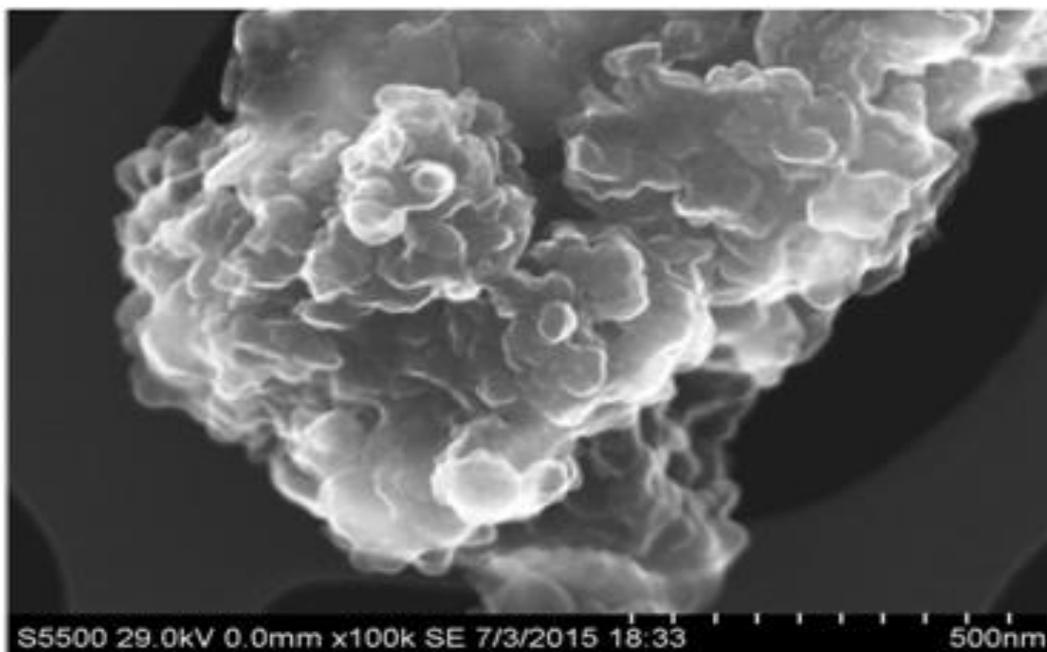


Рис. 1 – Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 0% от $Ne_{ном}$
Примечание: увеличение 100 тыс. раз

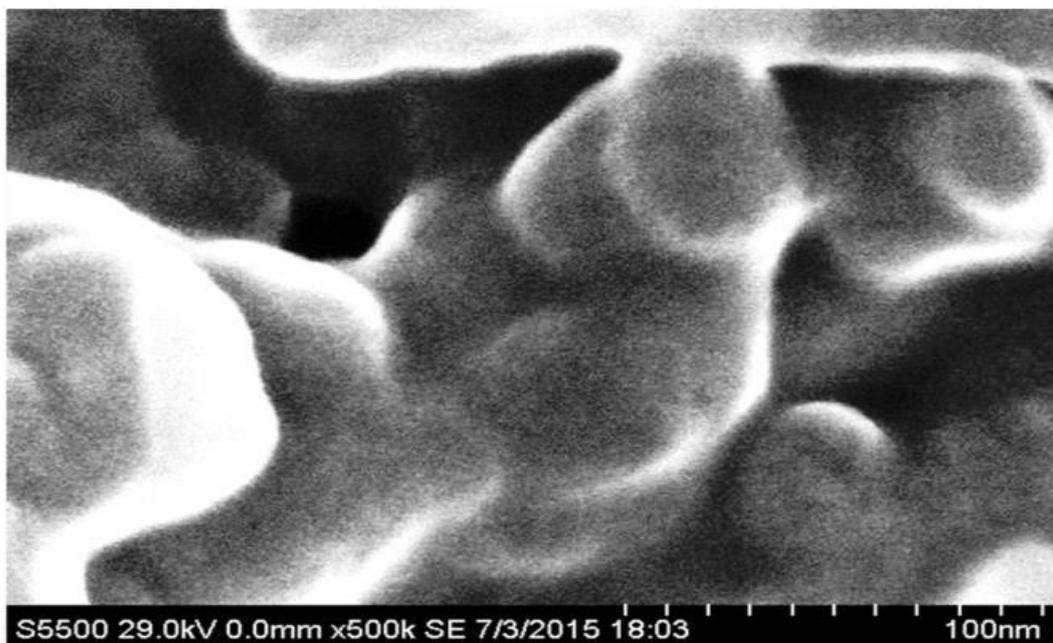


Рис. 2 – Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 0% от $Ne_{ном}$
Примечание: увеличение 500 тыс. раз

Размерная шкала электронного микроскопа, показанная на приведенных снимках, позволяет оценить как размеры наноструктур, в которые объединяются отдельные частицы сажи, так и размеры самих отдельных частиц. Частицы сажи и их наноструктуры, соответствующие нагрузке судового дизеля 6 ЧН 24/36 25% от $Ne_{ном}$ при увеличении в 200 тысяч раз показаны на рис. 3, а на рис. 4 и 5 представлены аналогичные экспериментальные данные при нагрузке указанного выше дизеля 50% и 100% от $Ne_{ном}$.

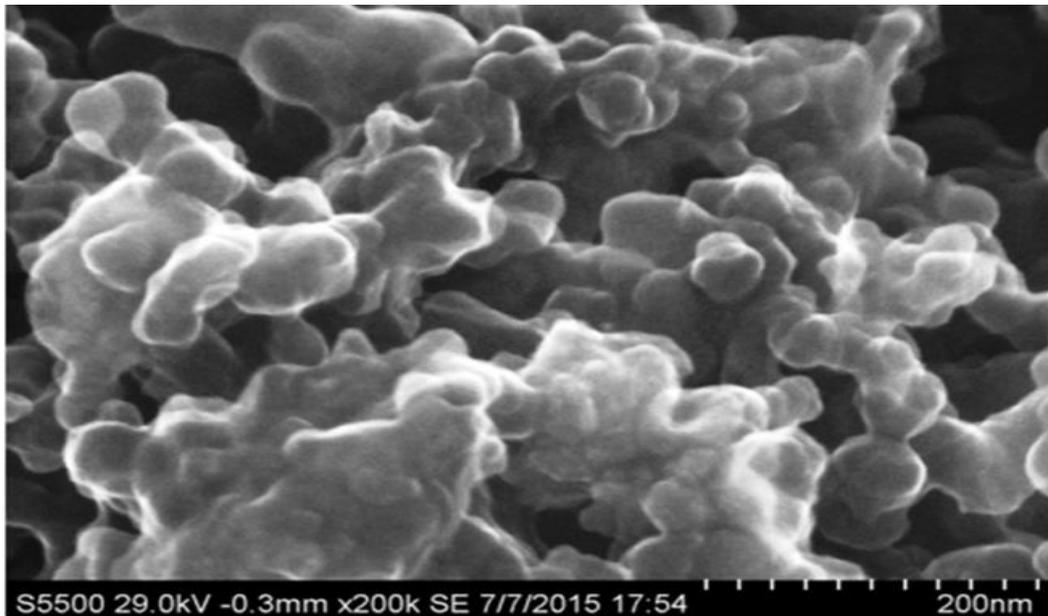


Рис. 3 – Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 25% от $N_{eном}$
Примечание: увеличение 200 тыс. раз



Рис. 4 – Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 50% от $N_{eном}$
Примечание: увеличение 200 тыс. раз

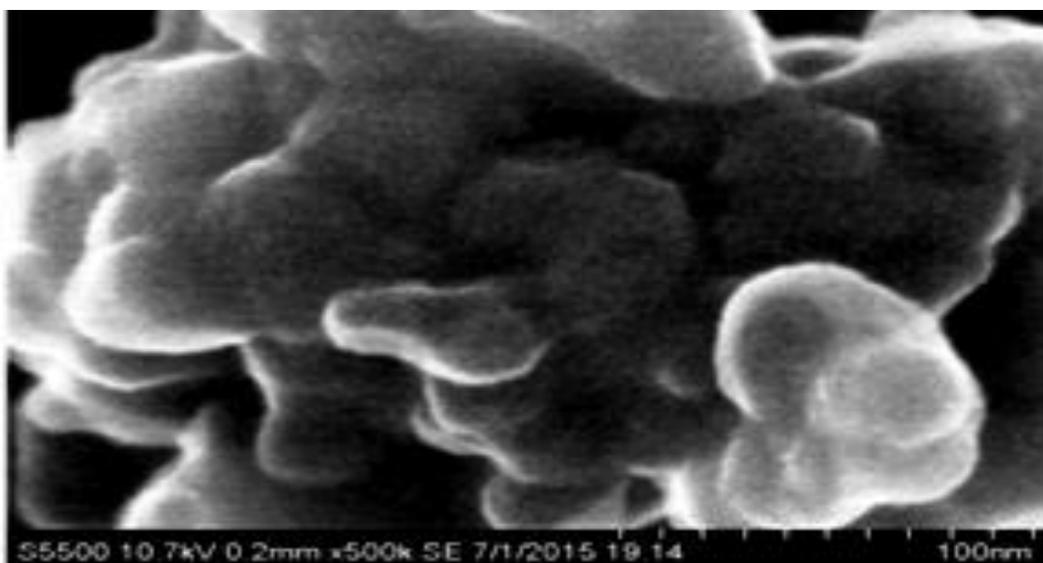


Рис. 5 – Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100% от $N_{eном}$
Примечание: увеличение 500 тыс. раз

Анализ представленных на рис. 1 – 5 экспериментальных данных показывает, что по форме большинство частиц сажи близки к сфере, средний диаметр частиц сажи, образующихся в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36 составляет 35 нм (0,035 мкм) и практически не зависят от нагрузки дизеля. Это положение подтверждается и другими исследователями [5], [6], [8], [9]. При этом параметр дифракции для частиц сажи

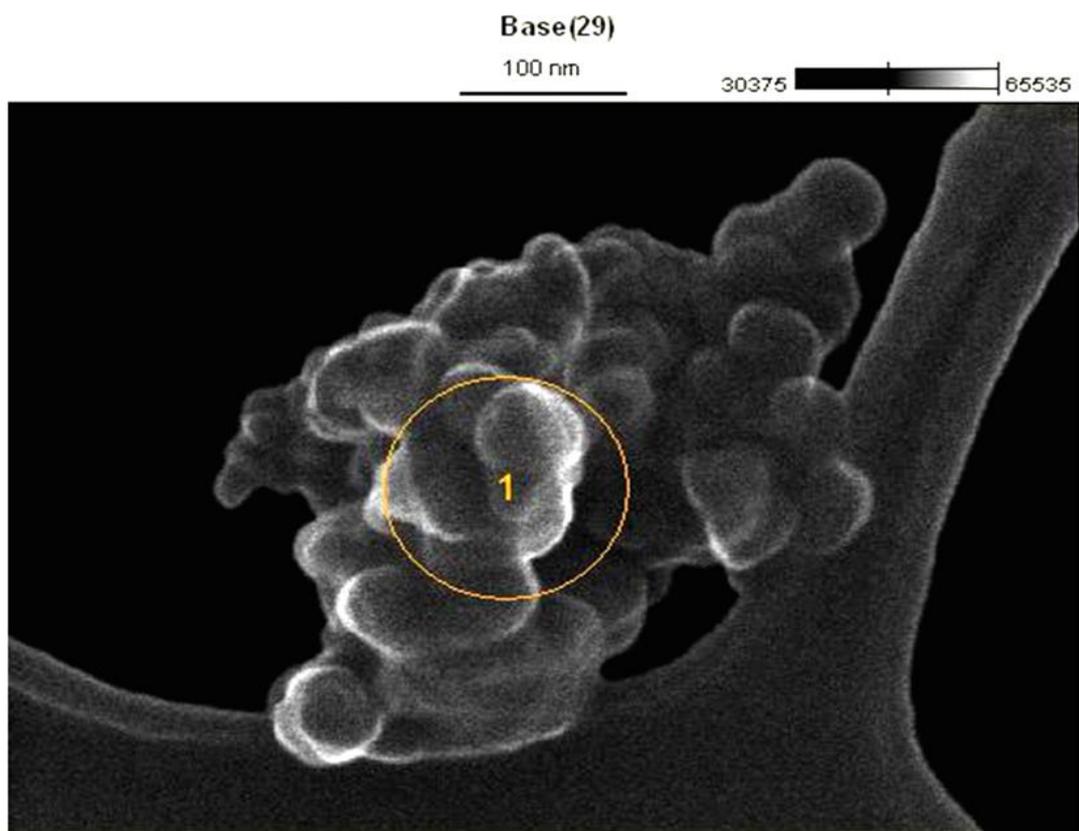
$$\rho = \pi d / \lambda,$$

где d – средний диаметр частиц сажи, мкм; λ – длина волны излучения, мкм.

в области ближнего инфракрасного спектра ($\lambda=0,5 - 6,0$ мкм) лежит в пределах $\rho = 0,2 - 0,018$. Среднее его значение для указанного спектрального диапазона составляет $\rho_{\text{ср}} = 0,07$, т.е. условие $\rho \leq 0,1$ выполняется. Это позволяет считать экспериментально доказанным факт отнесения частиц дизельной сажи к малым с оптической точки зрения [10]. Последнее является принципиально важным фактом, так как известно, что аналитические выражения для спектрального коэффициента ослабления излучения для малых и больших частиц не совпадают [11], [12].

Сканирующий электронный микроскоп S-5500 позволяет проводить спектральный анализ исследуемых проб частиц сажи. На рис. 6 и 7 в качестве примера представлены результаты такого анализа для проб частиц сажи, полученные при работе судового дизеля 6 ЧН 24/36 на нагрузке 100% от $N_{\text{ном}}$.

Анализ представленных на рис. 6 и 7 данных показывают, что в пробах однозначно присутствует именно углерод С (сажа). При изменении нагрузки в диапазоне от 0 % до 100 % от номинальной мощности от $N_{\text{ном}}$, содержание (весовое) углерода С (сажи) в пробах увеличивается от 69,48% до 97,55 %. Содержание кислорода О в пробах, как и следовало ожидать с ростом нагрузки уменьшается с 28,11 % при 0 % от $N_{\text{ном}}$ до 2,45 % при 100 % от $N_{\text{ном}}$, что связано с интенсификацией процесса сгорания топлива в цилиндре судового дизеля. Содержание других химических элементов в пробах, в частности, железа Fe (как продукта износа деталей цилиндропоршневой группы), кремния Si и серы S незначительно и лежит в пределах от 1,03 % до 7 %. Распределение частиц сажи по размерам, как было показано ранее [13], существенно отличается от нормального.



Element Setup | Analysis Setup | Compare Information | Quant Results | Processing | P&S Select

Mon Jul 06 17:09:58 2015

Filter Fit Chi-squared value: 9.662 Errors: +/- 1 Sigma

Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)

Acc.Voltage: 29.0 kV Take Off Angle: 15.0 deg

Element	Element	Wt. %	Atom %	Atom %	Compnd
Line	Wt. %	Error	Error	Wt. %	
C K	97.55	+/- 3.44	98.15	+/- 3.48	97.55
O K	2.45	+/- 2.45	1.85	+/- 3.09	2.45
Total	100.00		100.00		100.00

Рис. 6 – Спектральный анализ частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100% от $N_{\text{ном}}$

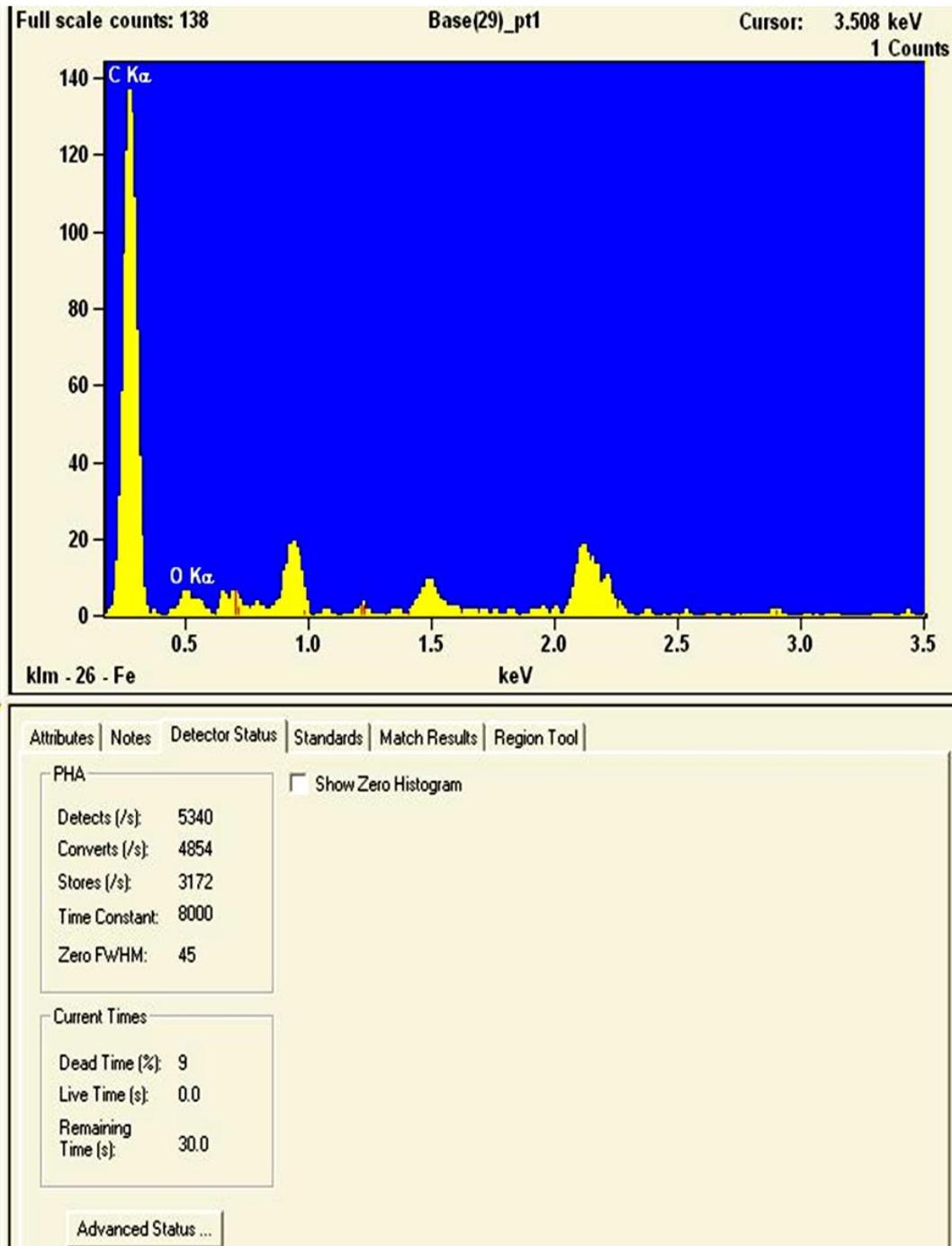


Рис. 7 – Гистограмма распределения химических элементов в пробах, отобранных из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100% от $N_{e,ном}$

Локальные результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля

Точность расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы практически полностью зависит от правильного задания граничных условий по теплообмену [14, 15]. При этом в составе граничных условий необходимо достаточно корректно учитывать и составляющую, обусловленную теплообменом излучением в КС судового дизеля. Последнее обусловлено тем, что в период активного тепловыделения в цилиндре судового дизеля, доля теплообмена излучением в суммарном тепловом потоке, передаваемом от рабочего тела к поверхностям деталей КС составляет 45 – 55 % и более. Учитывая сложную геометрию КС современных судовых дизелей, а зачастую и наличие двух источников излучения (имеются ввиду судовых малооборотных дизелей с двумя форсунками в КС), значимость расчетной оценки локальных результирующих потоков излучения существенно возрастает. Отмеченное подтверждается и другими исследованиями в области радиационного теплообмена [16].

На рис. 8 представлены результаты расчетной оценки результирующих потоков излучения на поверхностях поршня, крышки и втулки цилиндра судового дизеля 6 ЧН 24/36 при работе на режиме 100 % от номинальной мощности $N_{e,ном}$. По своей физической сущности это средние за рабочий цикл результирующие потоки излучения для указанных выше поверхностей КС. Они могут быть использованы в качестве граничных условий при оценке теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы на стадии проектирования с целью определения переменных температурных напряжений, возникающих в этих деталях в течение рабочего цикла. Локальные результирующие потоки излучения в пределах поверхности одной детали, например, поршня и крышки цилиндра для указанного выше судового дизеля были представлены ранее в [2]. Эти

потоки излучения необходимы на стадии проектирования для выяснения вопросов, связанных с наиболее нагруженными в тепловом отношении участками поверхности одной конкретной детали цилиндропоршневой группы. В количественном отношении представленные на рис. 8 значения локальных результирующих потоков излучения соответствуют известным экспериментальным данным [17].

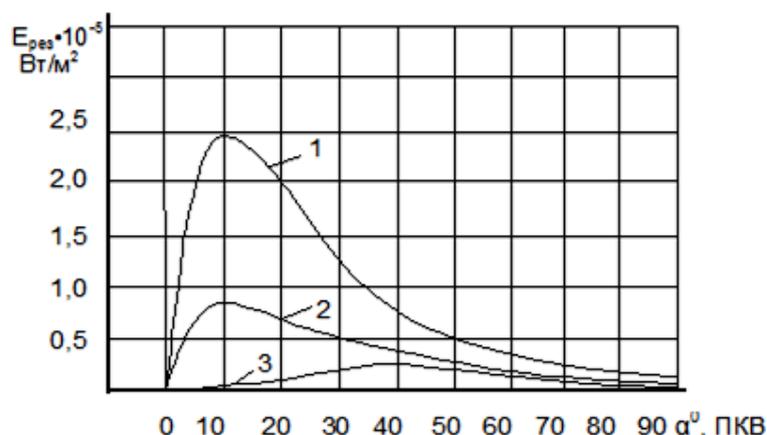


Рис. 8 – Результирующие потоки излучения для поверхностей деталей, образующих камеру сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36, при нагрузке 100 % от $N_{e,ном}$:
1 – поршень; 2 – крышка; 3 – втулки

Заключение

Представленные в статье результаты исследований оптических параметров частиц сажи, отобранных из КС судового дизеля 6 ЧН 24/36, экспериментально подтвердили факт возможности их отнесения к малым с оптической точки зрения. Это дало возможность в ММ локального радиационного теплообмена в КС судового дизеля пренебречь рассеиванием и считать, что ослабление излучения происходит лишь за счет поглощения. Приведенные значения средних за рабочий цикл локальных результирующих потоков излучения для поверхностей деталей, образующих КС, позволяет еще на стадии проектирования определить в них величину переменных температурных напряжений. Последнее очень важно для общей оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля и надежности их работы в процессе эксплуатации.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Израильский Ю.Г. Математическая модель локального радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля / Ю.Г. Израильский, О.В. Повалихина, Б.И. Руднев // Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3 (33), Т.1, С. 146 – 151.
2. Руднев Б.И. Локальные оптико-геометрические характеристики и результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля / Б.И. Руднев, О.В. Повалихина // Морские интеллектуальные технологии, 2018, №4(42), Т.5, С. 90 – 94.
3. Руднев Б.И. Расчетно-экспериментальное определение параметров излучения пламени в камере сгорания судового дизеля / Б.И. Руднев, О.В. Повалихина // Морские интеллектуальные технологии, 2020, №4(50), Т.1, С. 98 – 102.
4. ГОСТ Р ИСО 3046-1-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1. Стандартные исходные условия, объявленные мощность, расходы топлива и смазочного масла. Методы испытаний. – Введ. 2001-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1999, 23 с.
5. Вихерт М.М. Влияние типа рабочего процесса и режима работы быстроходного дизеля на свойства сажи и отработавшие газы / М.М. Вихерт, А.П. Кратко, И.С. Рафалькес и др. // Автомобильная промышленность, 1975, №10, С. 8 – 14.
6. Милликен Р.К. Размеры, оптические свойства и температура частиц сажи / Р.К. Милликен // Измерение температур в объемах новой техники. М.: Мир, 1965, С. 152 – 172.
7. Бакиров Ф.Г. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив / Ф.Г. Бакиров, В.М. Захаров, И.З. Полещук и др. М.: Машиностроение, 1989, 128 с.
8. Carpenter K. Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques / K. Carpenter, J.H. Johnson // SAE Preprints, 1979, № 790815, 17 p.
9. Mohammad Sarny I. Measurement of soot and flame temperature along three directions in the cylinder of a D.I. diesel / Sarny I. Mohammad, G.L. Borman // SAE Techn. Pap, Ser., 1991, №910728, P. 1 – 15.
10. Блох А.Г. Теплообмен излучением. Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991, 432 с.
11. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. М.: Мир, 1975, 934 с.
12. Modest M.F. Radiative heat transfer / M.F. Modest. New York. Academic Press, 2003, 822 p.
13. Руднев Б.И. Оценки спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля / Б.И. Руднев, О.В. Повалихина // Морские интеллектуальные технологии, 2020, №1(47), Т.2, С. 91 – 94.

14. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. Л.: Машиностроение, 1983, 212 с.
15. Гаврюшин С.С. Численный анализ элементов конструкции машин и приборов / С.С. Гаврюшин, О.О. Барышникова, О.Ф. Борискин. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 480 с.
16. Елисеев В.Н. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве / В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 396 с.
17. Dent J.C. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine / J.C. Dent, S.I. Siluaman // SAE Preprints, 1977, № 770407, 26p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Izrail'skij Ju.G. Matematicheskaja model' lokal'nogo radiacionnogo teploobmena v kamere sgoranija sudovogo dizelja [Mathematical model of local radiant heat transfer in marine diesel engine combustion chamber] / Ju.G. Izrail'skij, O.V. Povalihina, B.I. Rudnev // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2016, №3 (33), Vol.1, P. 146 – 151. [in Russian]
2. Rudnev B.I. Lokal'nye optiko-geometricheskie harakteristiki i rezul'tirujushhie potoki izlucheniya v kamere sgoranija sudovogo dizelja [Optical-geometrical data of radiation heat transfer in diesel combustion chamber] / B.I. Rudnev, O.V. Povalihina // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2018, №4 (42), Vol.5, P. 90 – 94. [in Russian]
3. Rudnev B.I. Raschetno-jeksperimental'noe opredelenie parametrov izlucheniya plameni v kamere sgoranija sudovogo dizelja [Calculation-experimental definition of radiation parameters of flame in marine diesel combustion chamber] / B.I. Rudnev, O.V. Povalihina // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2020, №4(50), Vol.1, P. 98 – 102. [in Russian]
4. GOST R ISO 3046-1-99. Dvigateli vnutrennego sgoranija porshnevyje. Harakteristiki. Chast'1. Standartnye ishodynye usloviya, ob'javlennye moshhnost', rashody topliva i smazochnogo masla. Metody ispytanij [Internal combustion engines piston. Characteristics. Part 1. Standart initial conditions proclaim power, consumptions of fuel and lubricant oil. Methods of experiences] – introduced. 2001-01-01. М.: Publishing house of standarts, 1999, 23 p. [in Russian]
5. Vihert M.M. Vlijanie tipa rabocheho processa i rezhima raboty bystrohodnogo dizelja na svojstva sazhi i otrabotavshie gazy [Influence type work process and regime of operation high speed diesel on properties of soot and exhaust gases] / M.M. Vihert, A.P. Kratko, I.S. Rafal'kes et al. // Avtomobil'naja promyshlennost', 1975, №10, P. 8 – 14. [in Russian]
6. Milliken R.K. Razmery, opticheskie svojstva i temperatura chastic sazhi / R.K. Milliken [Sizes, optical properties and temperature particles of soot] // Izmerenie temperatur v ob'emah novoj tehniki. М.: Mir, 1965, P. 152 – 172. [in Russian]
7. Bakirov F.G. Obrazovanie i vygoranie sazhi pri szhiganii uglevodorodnyh topliv [Formation and combustion of soot by combustion of hydrocarbons fuels] / F.G. Bakirov, V.M. Zaharov, I.Z. Poleshchuk et al. М.: Mashinostroenie, 1989, 128 p. [in Russian]
8. Carpenter K. Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques / K. Carpenter, J.H. Johnson // SAE Preprints, 1979, № 790815, 17 p. [in Russian]
9. Mohammad Sarny I. Measurement of soot and flame temperature along three directions in the cylinder of a D.I. diesel / Sarny I. Mohammad, G.L. Borman // SAE Techn. Pap, Ser., 1991, №910728, P. 1 – 15. [in Russian]
10. Bloh A.G. Teploobmen izlucheniem. Spravochnik [Radiative heat transfer. Handbook] / A.G. Bloh, Ju.A. Zhuravlev, L.N. Ryzhkov. М.: Jenergoatomizdat, 1991, 432 p. [in Russian]
11. Zigel' R. Teploobmen izlucheniem [Radiative heat transfer] / R. Zigel', Dzh. Haujell. М.: Mir, 1975, 934 p. [in Russian]
12. Modest M.F. Radiative heat transfer / M.F. Modest. New York. Academic Press, 2003, 822 p. [in Russian]
13. Rudnev B.I. Ocenki spektral'noj opticheskoj tolshhiny plameni v kamere sgoranija sudovogo dizelja [Estimation spectral optical thickness of flame in marine diesel combustion chamber] / B.I. Rudnev, O.V. Povalihina // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2020, №1(47), Vol.2, P. 91 – 94. [in Russian]
14. Shabrov N.N. Metod konechnyh jelementov v raschetah teplovyh dvigatelej [Method final elements in calculation of thermal engines] / N.N. Shabrov. L.: Mashinostroenie, 1983, 212 p. [in Russian]
15. Gavryushin S.S. Chislennyj analiz jelementov konstrukcii mashin i priborov [Numerical analysis elements of constructions machines and apparatuses] / S.S. Gavryushin, O.O. Baryshnikova, O.F. Boriskin. М.: Publishing house MGTU im. N.Je. Baumana, 2014, 480 p. [in Russian]
16. Eliseev V.N. Teploobmen i teplovyje ispytaniya materialov i konstrukcij ajerokosmicheskoy tehniki pri radiacionnom nagreve [Heat transfer and thermal investigations of materials and constructions of aero cosmic technics by radiation heating] / V.N. Eliseev, V.A. Tovstonog. М.: Publishing house MGTU im. N.Je. Baumana, 2014, 396 p. [in Russian]
17. Dent J.C. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine / J.C. Dent, S.I. Siluaman // SAE Preprints, 1977, № 770407, 26 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.011>

МИКРОСТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ CrN-TiN

Научная статья

Терюкалова Н.В.^{1,*}, Новицкая О.С.², Сизова О.В.³

¹ ORCID: 0000-0001-6547-7676;

² ORCID: 0000-0003-1043-4489;

³ ORCID: 0000-0001-9177-6602;

^{1, 2, 3} Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

* Корреспондирующий автор (natali.t.v[at]ispms.tsc.ru)

Аннотация

Представлены результаты исследования структуры и триботехнических свойств многослойных наноструктурных покрытий из чередующихся слоев CrN и TiN, полученных методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения нитрида хрома и нитрида титана при температуре 320÷390⁰С на медь марки С11000 и состаренный медно-бериллиевый сплав С17200. Анализируется структура покрытий и их поведение в процессе трибологических испытаний. Анализ показал, что характер износа на меди неравномерный: наряду с незначительным износом поверхностного слоя встречаются участки отслаивания покрытия.

Ключевые слова: трение скольжения, ионно-плазменные покрытия, медно-бериллиевый сплав, медь.

MICROSTRUCTURE AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF MULTILAYER ION-PLASMA COATINGS CrN-TiN

Research article

Teryukalova N.V.^{1,*}, Novitskaya O.S.², Sizova O.V.³

¹ ORCID: 0000-0001-6547-7676;

² ORCID: 0000-0003-1043-4489;

³ ORCID: 0000-0001-9177-6602;

^{1, 2, 3} Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

* Corresponding author (natali.t.v[at]ispms.tsc.ru)

Abstract

The current article presents the results of a study of the structure and tribotechnical properties of multilayer nanostructured coatings made of alternating layers of CrN and TiN obtained by vacuum-arc plasma-assisted deposition of chromium nitride and titanium nitride at a temperature of 320 ÷ 390⁰ C for C11000 grade copper and aged copper-beryllium alloy C17200. The study also conducts an analysis of the structure of coatings and their behavior during tribological tests.

Keywords: sliding friction, ion-plasma coatings, copper-beryllium alloy, copper.

Введение

Поиск нового класса материалов, обладающими широкими функциональными возможностями свидетельствует о том, наиболее перспективным направлением является создание на их поверхности металлических покрытий различного состава с многофазной архитектурой [1], [3], [5]. Среди разнообразных способов получения таких покрытий особое место занимают ионно-плазменные методы нанесения покрытий с внутренними граничными промежуточными слоями нанометровой толщины, состоящими из высокопрочных нитридов и карбидов переходных металлов [6], [7].

Из существующих современных технологий нанесения многослойных покрытий наиболее распространенными способами являются плазменное магнетронное напыление [8] и напыление из вакуумно-дуговой плазмы с использованием электродуговых испарителей металлов [9], [10]. Магнетронное распыление является наиболее предпочтительным методом из-за эффективности осаждения элементов и возможности применения для широкого класса материалов, в том числе и для относительно мягких, например, меди и ее сплавов.

В данной работе обсуждаются результаты исследования структуры и трибологических свойств многослойных покрытий состава CrN/TiN с внутренними граничными промежуточными подслоями нанометровой толщины, нанесенными на медь и бериллиевую бронзу вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом в газо-металлической плазме разрядов низкого давления.

Материалы и методы исследования

Многослойные покрытия состава TiN/CrN и CrN/TiN были получены на образцах медно-бериллиевого сплава С17200 и меди С11000, изготовленных из горячекатаных прутков диаметром 20,0 и 18,0 мм соответственно. Источник газовой плазмы использовался для предварительной очистки поверхности изделий от оставшихся диэлектрических, в том числе оксидных, пленок, нагрева подложки, а также для дополнительной ионизации газа и ассистирования при напылении покрытий. Для получения требуемого элементного состава покрытия подбиралось соотношение токов разряда дуговых испарителей. Образцы размещались в центре вакуумной камеры на держателе на уровне выходных апертур источников плазмы. Многослойные покрытия (32 слоя) наносились путем предварительного нанесения хрома или титана в атмосфере аргона в качестве подложки и последующим нанесением чередующихся слоев хрома и титана в среде азота, (см. таблицу 1). Микротвердость многослойного покрытия, измеренная при нагрузке 0,2 Н, оказалась равной 14 ГПа.

Таблица 1 – Параметры режимов напыления покрытий

Режим	Ток испарителя 1 (Cr)	Ток испарителя 2 (Ti)	Ток источника газовой плазмы	Напряжение смещения в процессе напыления	Темпер. обработки	Рабочий газ	Время осаждения
	I_1, A	I_2, A	I_{GAS}, A	$U_{см}, B$	$T, ^\circ C$		$t, мин$
чистка, нагрев	0	0	45	-700	20-360	Ar 0,3Па	30
чистка, нагрев	0	80	50	-900	360	Ar 0,3Па	2
напыление подслоя Ti	0	80	60	-50	400	Ar 0,3Па	3
Слой TiN	0	80	60	-150	400	Ar/N ₂ =10/90% 0,6Па	4,5÷9
Слой CrN	90	0	60	-150	400	Ar/N ₂ =10/90% 0,6Па	5,5÷11

Фазовый состав, морфологию и микроструктуру покрытий анализировали методами оптической и растровой электронной микроскопии на лазерном конфокальном микроскопе LEXT OLS4000 в оптическом и лазерном режимах, на сканирующем электронном микроскопе Philips SEM 515 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором «Genesis» и сканирующем электронном микроскопе «LEO EVO 50». Трибологические испытания образцов проводили на триботестере фирмы «TRIBOtechnic» (Франция) при нагрузке $P = 5$ Н и скорости скольжения $V = 0,01$ м/с в течение 2 часов. Скольжение осуществляли в воздушной среде при комнатной температуре с граничной смазкой по схеме «шарик-диск», контртелом служил твердый сплав ВК8 и оксид алюминия.

Основные результаты

На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения поперечных сечений образцов меди и бронзы с нанесенными многослойными покрытиями. Металлографические исследования образцов меди и бронзы показали, что покрытия представляют собой многослойную структуру с четкими распределениями слоев и хорошо видимыми границами раздела, что свидетельствует о хорошем качестве осажденных покрытий. Общая толщина покрытий составляла 4,0 – 5,0 мкм, толщина монослоев варьировалась от 300 до 400 нм.

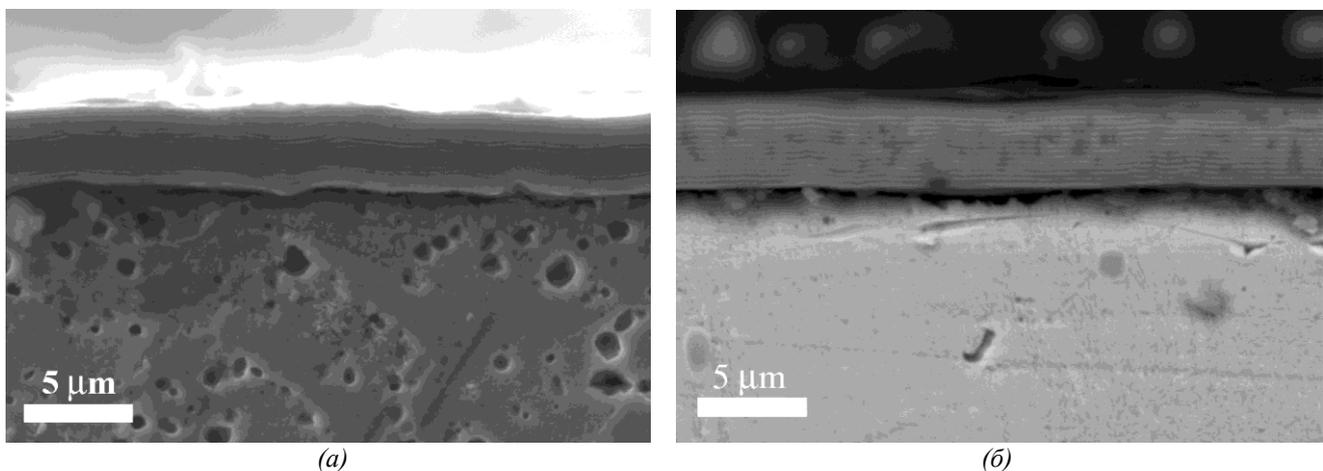


Рис. 1 – РЭМ-изображения поперечного сечения покрытий CrN/TiN (32 слоя) на меди (а) и на медно-бериллиевом сплаве (б)

По результатам рентгенофазового анализа покрытий установлено, что осаждаемые элементы формируют на поверхности медного образца многофазную структуру, состоящую из меди, титана и соединений TiN и CuTi₃, (см. рисунок 2). Общая толщина покрытий не препятствовала прохождению рентгеновских лучей в материал основы, поэтому рефлекс меди мог состоять как из отражений подложки, так и чистой меди, содержащейся в покрытии.

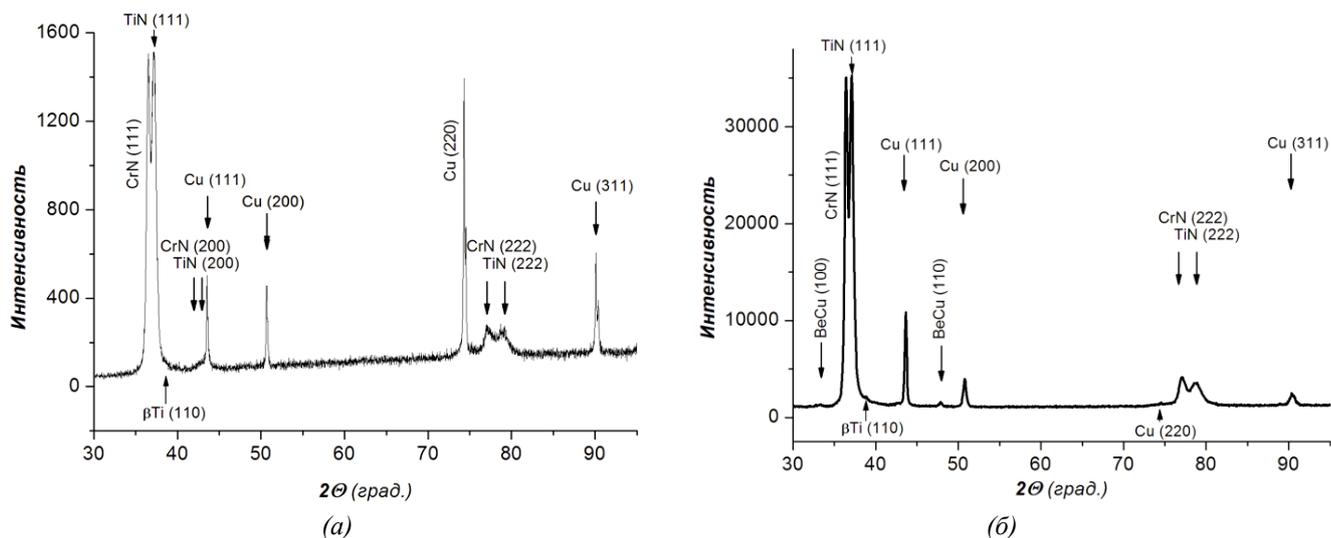


Рис. 2 – Рентгенограммы многослойных покрытий CrN/TiN (32 слоя), полученных на меди (а) и медно-бериллиевом сплаве (б)

Значение микротвердости меди и состаренного медно-бериллиевого сплава составило $90 \text{ HV}_{0,02}$ и $350 \text{ HV}_{0,02}$ соответственно. Послойное нанесение титана и хрома, а также наличие соединений нитридов титана и хрома, привело к повышению твердости поверхностного слоя медного образца до $1100 \text{ HV}_{0,02}$ и до $1400 \text{ HV}_{0,02}$ у бронзы или, соответственно, 11 и 14 ГПа. Следует отметить, что твердость многослойных покрытий на основе TiN и CrN, как правило, значительно выше, чем у однослойных покрытий того же или близкого состава, что обусловлено наличием границ раздела между слоями с мелкозернистой структурой и высоким уровнем остаточных напряжений [11], [12].

Трибологические испытания показали, что коэффициент трения медного образца с покрытием из 32 слоев резко возрастает в первые минуты трения до значения 0,15, что отражает время приработки, затем опускается до значения 0,11 и колеблется во время всего периода испытания около этого значения, (см. рисунок 3, а).

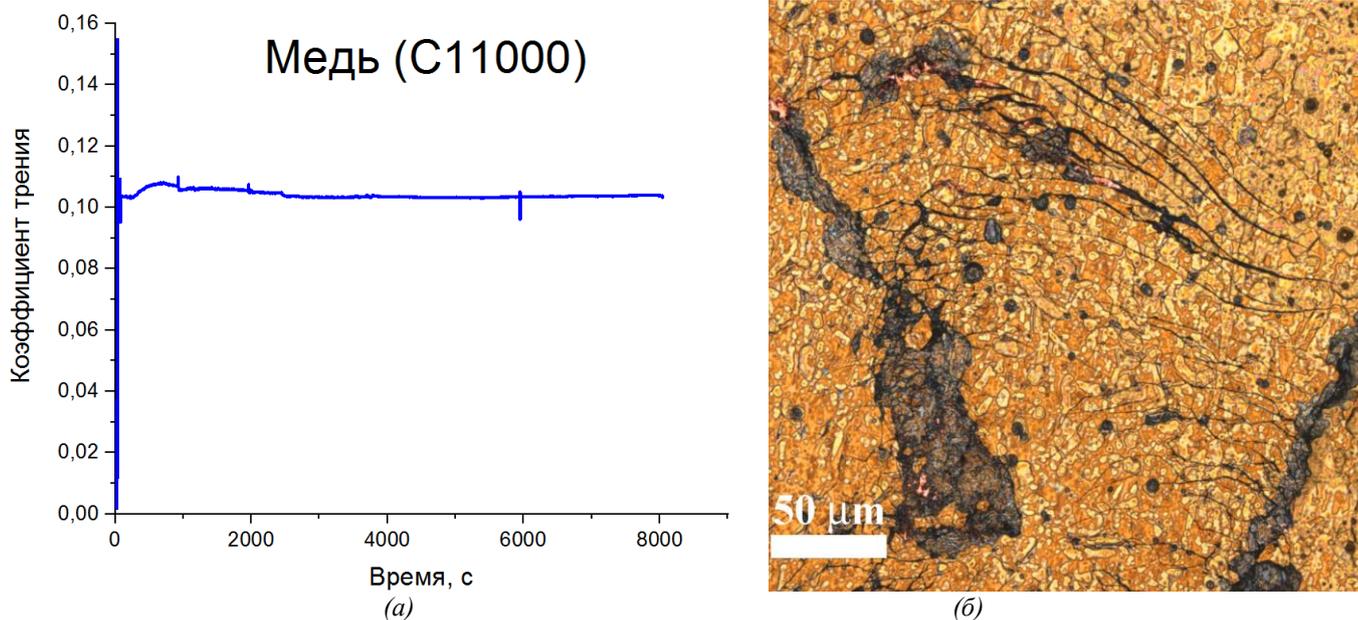


Рис. 3 – Коэффициент трения (а) и дорожка трения (б) медного образца (C11000) с покрытием CrN/TiN из 32 слоев

Коэффициент трения образца медно-бериллиевого сплава с покрытием из 32 слоев аналогично медному образцу в период приработки увеличивается до 0,15, а после приработки ведет себя стабильно, незначительно колеблясь около значения 0,10, (см. рисунок 4, а).

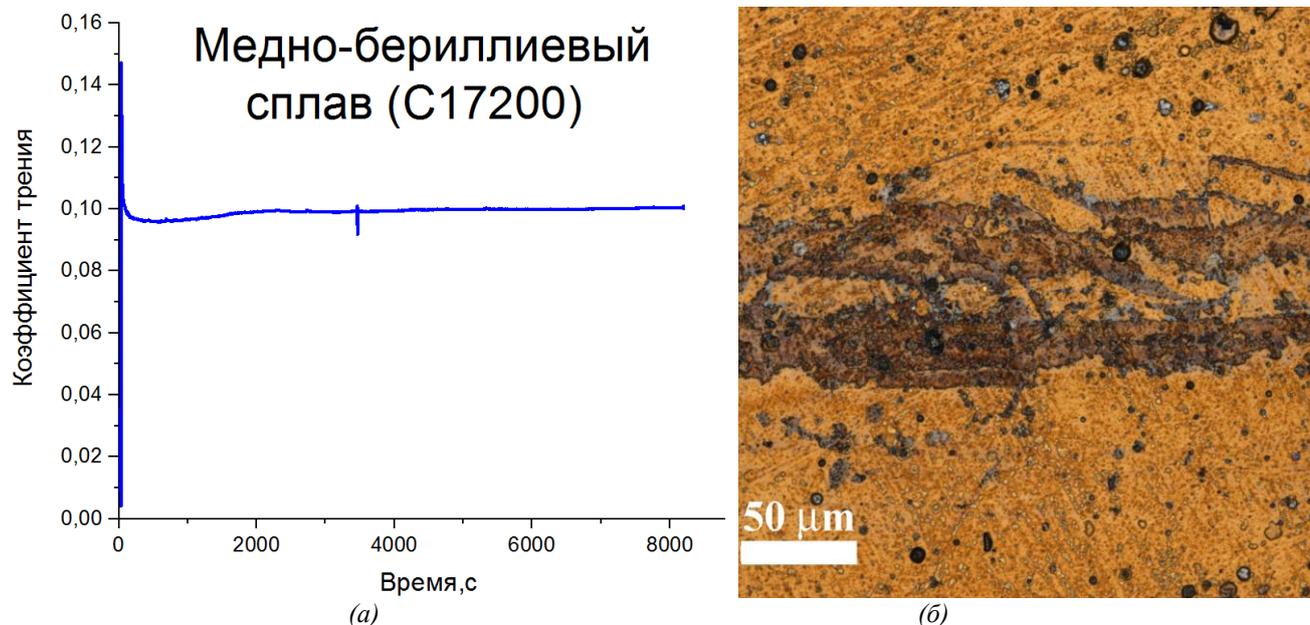


Рис. 4 – Коэффициент трения (а) и дорожка трения (б) образца медно-бериллиевого сплава (С17200) с покрытием CrN/TiN из 32 слоев

На отдельных участках дорожки трения многослойного покрытия на меди наблюдаются видимые следы износа, (см. рисунок 3, б). Предположительно, это связано с адгезионным взаимодействием контртела и покрытия. При трибологических испытаниях многослойных покрытий на сплаве С17200 в качестве контртела применяли шарик из Al_2O_3 , твердость которого выше твердости нитридов. Изнашивание покрытия происходило по абразивному механизму, для которого характерно царапающее действие, что отчетливо проявляется на дорожке трения, (см. рисунок 4, б).

Заключение

Металлографические исследования показали, что покрытия толщиной 4,0 ... 5,0 мкм имеют многослойную структуру с хорошо видимыми границами между слоями, толщина которых варьировалась от 150 до 300 нм. Микротвердость многослойных покрытий CrN/TiN, измеренная при нагрузке 0,2 Н, составила 11 ГПА для медных образцов с покрытием и 14 ГПА для покрытий на сплаве С17200.

Анализ трибологических испытаний при нагрузке 5 Н показал, что характер износа на меди неравномерный: наряду с незначительным износом поверхностного слоя встречаются участки отслаивания покрытия. Покрытие на сплаве С17200 при трении с нагрузкой 5 Н постепенно изнашивается в результате микроабразивного истирания.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-58-00048 Бел_а). Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0006.

Funding

This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-58-00048 Bel_a). The work was performed under the government statement of work for ISPMS SB RAS, Project No. FWRW-2021-0006.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Fan Zhao. Tribological and mechanical properties of hardness-modulated TiAlSiN multilayer coatings fabricated by plasma immersion ion implantation and deposition / Fan Zhao, Yugiang Ge, Langping Wang et al. // Surface and Coatings Technology (2020), 402. P.126475;
2. Lomello F. Temperature dependence of the residual stresses and mechanical properties in TiN/CrN nanolayered coating processed by cathodic arc deposition / F. Lomello, M. Arab Pour Yazardi, P. Sanchette et al. // Surface and Coatings Technology, 238 (2014), 216-222.
3. Liu L. Wear resistance of TiN(Ti2N)/Ti composite layer by plasma surface Ti-alloying and nitriding / L. Liu, H.H. Chen, X.Z. Liu et al. // Applied Surface Science (2016), 388. P.103-108.
4. Yan M.F. Combining thermos-diffusing titanium and plasma nitriding to modify C61900 Cu-Al alloy / M.F. Yan, Y.D. Zhu, Y.X. Zhang et al. // Vakuuum (2016), 126. P.41-44.
5. Yan M.F. Microstructure and mechanical properties of copper-nitrogen multiphase layers produced by a duplex treatment on C17200 copper-beryllium alloy / M.F. Yan, Y.D. Zhu, C.S. Zhang et al. // Materials and Design (2015), 84. P.10-17.
6. Athmani M. Microstructural, mechanical, thermal stability and oxidation behavior of TiSiN/CrVxN multilayer coatings deposited by D.C. reactive magnetron sputtering / M. Athmani, A. AL-Rjoub, D. Cavaleiro et al. // Surface & Coatings Technology 405 (2021) 126593.

7. Fan Zhao. Tribological and mechanical properties of hardness-modulated TiAlSiN multilayer coatings fabricated by plasma immersion ion implantation and deposition / Fan Zhao, Yugiang Ge, Langping Wang et al. // *Surface and Coatings Technology* (2020), 402. P.126475.
8. Dinesh Kumar D. Wear resistant super-hard multilayer transition metal-nitride coatings / D. Dinesh Kumar, N. Kumar, S. Kalaiselvam et al.// *Surface and Interface* (2017), 7, p.74-82
9. Vereschaka A. A. Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nano-structured coatings / Alexey A. Vereschaka, Sergey N. Grigoriev // *Wear* 378-379 (2017) 43–57
10. Lomello F. Temperature dependence of the residual stresses and mechanical properties in TiN/CrN nanolayered coating processed by cathodic arc deposition / F. Lomello, M. Arab Pour Yazardi, P. Sanchette et al. // *Surface and Coatings Technology*, 238 (2014), 216-222.
11. Kolubaev A V. Multi-phase ion-plasma Cu-Ti coatings deposited on copper and copper-beryllium alloy / A V Kolubaev, O V Sizova, Yu A Denisova et al. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1100 (2021) 012050
12. Zhu Y.D. Surface modification of C17200 copper-beryllium alloy by plasma nitriding of Cu-Ti gradient film / Y.D. Zhu, M.F. Yan, Y.X. Zhang et al. // *Journal of Materials Engineering and Performance* (2018), 27, issue 3, P. 961-969.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.012>**САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПОРОШКОВОЙ НИТРИДНО-КАРБИДНОЙ КОМПОЗИЦИИ TiN-SiC ПРИ ГОРЕНИИ СИСТЕМЫ «Si-Ti-NaN₃-(NH₄)₂SiF₆-C»**

Научная статья

Титова Ю.В.^{1,*}, Белова Г.С.², Минеханова А.Ф.³, Майдан Д.А.,⁴ Амосов А.П.⁵¹ ORCID: 0000-0001-6292-280X;² ORCID: 0000-0002-6430-9408;³ ORCID: 0000-0002-6081-8264;⁴ ORCID: 0000-0002-0195-4506;⁵ ORCID: 0000-0003-1994-5672;^{1, 2, 3, 4, 5} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

* Корреспондирующий автор (titova600[at]mail.ru)

Аннотация

Исследована возможность синтеза высокодисперсной порошковой нитридно-карбидной композиции TiN-SiC при сжигании смеси азиды натрия (NaN₃) с элементными порошками кремния (Si), титана (Ti) и сажи (C) и активирующей добавкой – галоидной солью гексафторсиликата аммония ((NH₄)₂SiF₆) в атмосфере азота. Определены параметры горения, фазовый состав, морфология и размеры частиц синтезированных продуктов. Показано, что после водной промывки порошкообразный продукт горения состоит из нитрида титана (TiN), карбида кремния (β-SiC), нитрида кремния двух модификаций (α-Si₃N₄ и β-Si₃N₄) и незначительного количества свободного кремния (Si). В большинстве случаев полученная нитридно-карбидная композиция TiN-SiC представляет собой смесь субмикронных (0,1-0,5 мкм) равноосных частиц и волокон, перспективную для получения при меньших температурах соответствующих конструкционных композиционных керамических материалов с повышенными механическими свойствами.

Ключевые слова: азид натрия, гексафторсиликат аммония, горение, синтез, композит, TiN-SiC.**SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF POWDER NITRIDE-CARBIDE COMPOSITION TiN-SiC DURING COMBUSTION OF THE «Si-Ti-Na₃N-(NH₄)₂SiF₆-C» SYSTEM**

Research article

Titova Yu.V.^{1,*}, Belova G.S.², Minekhanova A.F.³, Maydan D.A.,⁴ Amosov A.P.⁵¹ ORCID: 0000-0001-6292-280X;² ORCID: 0000-0002-6430-9408;³ ORCID: 0000-0002-6081-8264;⁴ ORCID: 0000-0002-0195-4506;⁵ ORCID: 0000-0003-1994-5672;^{1, 2, 3, 4, 5} Samara State Technical University, Samara, Russia

* Corresponding author (titova600[at]mail.ru)

Abstract

The possibility of synthesis of a highly dispersed powder nitride-carbide composition TiN-SiC by burning a mixture of sodium azide (NaN₃) with elemental powders of silicon (Si), titanium (Ti) and soot (C) and an activating additive – a halide salt of ammonium hexafluorosilicate ((NH₄)₂SiF₆) in a nitrogen atmosphere is investigated. The combustion parameters, phase composition, morphology and particle sizes of the synthesized products were determined. It is shown that, after water washing, the powdery combustion product consists of titanium nitride (TiN), silicon carbide (β-SiC), silicon nitride of two modifications (α-Si₃N₄ and β-Si₃N₄), and an insignificant amount of free silicon (Si). In most cases, the resulting nitride-carbide composition TiN-SiC is a mixture of submicron (0.1-0.5 μm) equiaxed particles and fibers, promising for obtaining corresponding structural composite ceramic materials with improved mechanical properties at lower temperatures.

Keywords: sodium azide, ammonium hexafluorosilicate, combustion, synthesis, composite, TiN-SiC.**Введение**

Нитридно-карбидная композиция TiN-SiC перспективна для использования в режущих инструментах и износостойких деталях, а также керамике с улучшенными теплопроводностью и электропроводностью, в микроэлектронике, высокоомощной электронике, катализе, абразивной обработке, а также в качестве модификаторов литейных сплавов.

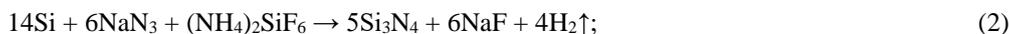
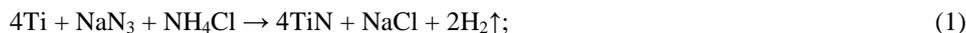
Известные технологии получения нитрида титана и карбида кремния (азотирование металлического титана или его гидрида, взаимодействие в газовой фазе между TiCl₄ и аммиаком или смесями азота и водорода, разложение аминхлоридов титана, восстановление TiO₂ углем или металлами в среде азота, взаимодействие порошка кремния / диоксида кремния с углеродом, термическая деструкция карбосилана, осаждение из парогазовой фазы, золь-гель метод, печной способ, плазмохимический синтез и др.) характеризуются большим электропотреблением, сложным оборудованием и не всегда обеспечивают наноразмерность порошков TiN и SiC и тем более получение нанопорошковых композиций нитрид-карбид.

Основные недостатки известных технологий могут быть устранены с использованием процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который идет за счет собственного тепловыделения горения в простом малогабаритном оборудовании и занимает мало времени, в таком его варианте как азидный СВС или СВС-Аз.

С 1970 г. в СамГТУ разрабатывается азидная технология, которая позволяет в режиме горения получать широкую гамму порошков нитридов, карбидов и композиций на их основе с применением порошка азиды натрия в качестве

азотирующего реагента вместо газообразного или жидкого азота [1].

Весомую роль в технологии СВС-Аз играет использование в исходной смеси порошков галоидных солей, которые нейтрализуют пожароопасный атомарный натрий, выделяющийся в волне горения при разложении азида натрия, и часто являются прекурсором азотируемого элемента, поэтому технология СВС-Аз основана на сжигании исходной смеси порошков «элемент + азид натрия + галоидная соль». Приведем типичные реакции СВС-Аз:



Как видно из этих примеров, азидная технология СВС позволяет получать разнообразные керамические порошки, которые применяются для получения алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ). Для процессов СВС-Аз характерны невысокие температуры горения и образование большого количества побочных продуктов — как газообразных, так и конденсированных, которые затрудняют слияние и увеличение размеров первоначальных частиц продуктов синтеза и позволяют сохранить их в нано- и микроразмерном состоянии. Оценка стоимости нанопорошков марки СВС-Аз свидетельствует о том, что из-за простоты технологии и оборудования они могут быть в 2-3 раза дешевле аналогичных нанопорошков плазмохимического синтеза [2], [3], [4], [5].

Целью настоящей работы является проведение исследования по применению метода СВС с использованием азида натрия NaN_3 в качестве азотирующего реагента и активирующей добавки галоидной соли гексафторсиликата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ для получения высокодисперсной композиции порошков TiN-SiC с различным соотношением фаз.

Керамика из нитрида титана (TiN) и карбида кремния (SiC) обычно используется в космической технике, самолетостроении и полупроводниковой технике, благодаря их превосходным характеристикам, таким как высокая твердость и модуль упругости, низкий коэффициент трения, хорошая коррозионная стойкость, хорошая теплопроводность и высокая электрическая проводимость. TiN-SiC представляет собой твердый раствор и ожидается, что он будет включать в себя преимущества и характеристики обоих компонентов, что делает его перспективным современным материалом.

Композиты $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN-SiC}$ были синтезированы из смесей TiSi_2 и SiC реакцией горения при высоком давлении азота. Исследован механизм азотирования TiSi_2 . Результаты показали, что при азотировании TiSi_2 вначале образуются TiN и Si , а при дальнейшем азотировании Si образуется фаза Si_3N_4 . Расплавленная эвтектическая фаза между Si и TiSi_2 образуют единую структуру ядро-оболочка и влияют на процесс азотирования. При более высоком давлении азота реакция азотирования завершилась и были получены относительно плотные композиты $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN-SiC}$. Растровая электронная микроскопия выявила неоднородный размер зерна Si_3N_4 , наличие аморфной фазы, полостей, микротрещин и дислокаций, а также графит, который образовался в результате азотирования SiC .

Всю реакцию азотирования можно разделить на две стадии следующим образом:

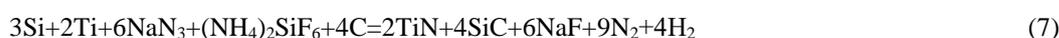


На втором этапе азотирования смесей Si-TiN позволяет получать пористые электропроводящие композиты. Фаза TiN , полученная на первой стадии в качестве разбавителя, снижает температуру горения Si в атмосфере азота под высоким давлением. В основе этого процесса может лежать азотирование смесей Si и Si_3N_4 . Анализ реакции горения кремния в атмосфере азота под давлением позволил установить, что образование $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ происходит в результате кинетически-контролируемой реакции и определяется скоростью диффузии. Кинетическая реакция между парами Si и N_2 на поверхности микрокристаллов Si_3N_4 происходит очень быстро, но пары Si диффундируют через N_2 к поверхности микрокристаллов Si_3N_4 и очень медленно реагируют с N_2 [6].

Относительно плотный композит $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN-TiC}$ был получен синтезом в процессе горения при высоком давлении газа. Рентгеноструктурный анализ показал, что реакция прошла полностью и во внутреннем слое были обнаружены лишь небольшое количество остаточного Si . Микроструктура была сложной, с микротрещинами и дислокациями, но реакции между Si_3N_4 , TiN и SiC не было [7].

Методы и принципы исследования

Для синтеза целевых композиций TiN-SiC с мольным соотношением фаз от 1:4 до 4:1 использованы следующие уравнения химических реакций:



В уравнениях (6)-(10) состав продуктов реакций выражен в молях, при переходе к массовым процентам получаются следующие соотношения для теоретического состава целевых композиций TiN-SiC, при условии удаления водорастворимой побочной соли NaF из продуктов реакций:

уравнение (6): $\text{TiN} + 2\text{SiC} = 60,7\% \text{ TiN} + 39,3\% \text{ SiC}$,
уравнение (7): $\text{TiN} + 2\text{SiC} = 43,6\% \text{ TiN} + 56,4\% \text{ SiC}$,
уравнение (8): $\text{TiN} + 4\text{SiC} = 27,9\% \text{ TiN} + 72,1\% \text{ SiC}$,
уравнение (9): $2\text{TiN} + \text{SiC} = 75,6\% \text{ TiN} + 24,4\% \text{ SiC}$,
уравнение (10): $4\text{TiN} + \text{SiC} = 86,1\% \text{ TiN} + 13,9\% \text{ SiC}$.

Для экспериментального исследования в качестве исходного сырья использовали (здесь и далее указываются масс. %): порошок кремния марки Кр0 (содержание основного вещества $\geq 98,8\%$, $d_{0,5} = 5$ мкм); порошок титана марки ПТМ-3 (содержание основного вещества $\geq 99,12\%$, $d_{0,5} = 4,5$ мкм); порошок гексафторсиликата аммония классификация «Ч» ($\geq 98,97\%$, 20 мкм), порошок азидата натрия классификации «Ч» ($\geq 98,71\%$, 100 мкм), технический углерод марки П701 ($\geq 88,0\%$, 70 нм в виде агломератов до 1 мкм). Методика проведения экспериментальных исследований подробно описана в монографии [1].

Фазовый состав синтезированных продуктов определяли на порошковом рентгеновском дифрактометре ARL E'тrA-138, оснащённом рентгеновской трубкой с медным анодом. Расшифровку дифрактограмм и количественную оценку фазового состава методом Ритвельда выполняли в программе PDXL 1.8 с использованием баз кристаллографических данных PDF-2009 и COD-2019. Исследование морфологии и размера частиц синтезированных композиций проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6390A фирмы «Jeol».

Основные результаты

Экспериментальное исследование заключалось в определении максимальной температуры T_T , скорости U_T , максимального давления P_M , теоретического (M_T) и практического ($M_{ПР}$) выхода конденсированных продуктов горения шихтовых смесей для синтеза композиций TiN-SiC.

На рисунке 1 представлены результаты исследования зависимости параметров горения системы «Si-Ti-NaN₃-(NH₄)₂SiF₆-C» от соотношения исходных компонентов. Из представленных графиков видно, что с увеличением содержания Si и C (y) температура и скорость горения снижаются. При увеличении содержания титана в системе параметры синтеза повышаются.

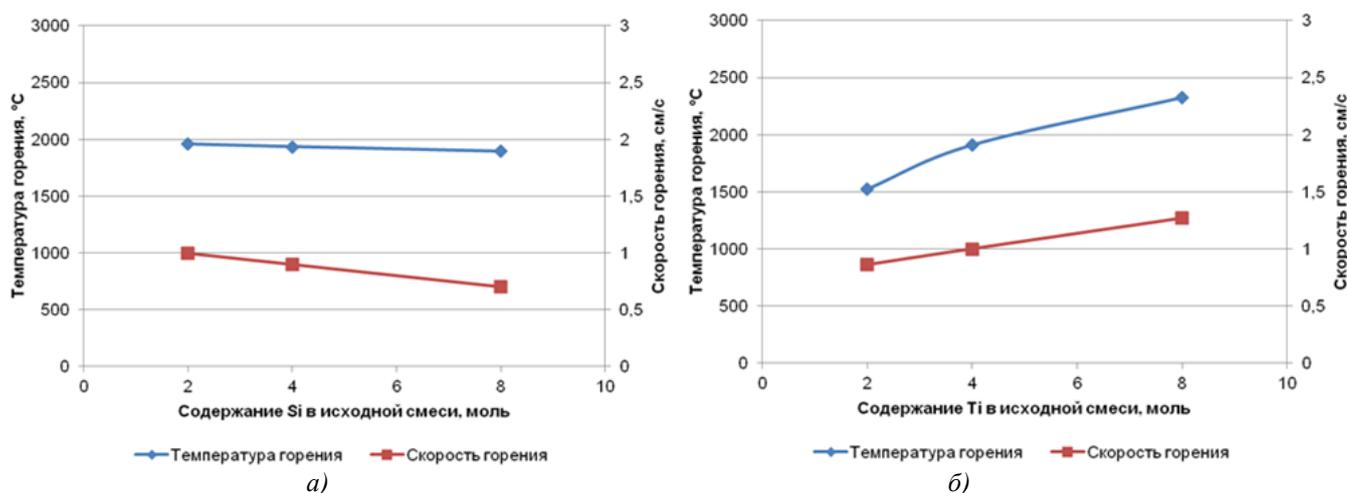


Рис. 1 – Зависимость температуры и скорости горения системы «Si-Ti-NaN₃-(NH₄)₂SiF₆-C» от соотношения исходных компонентов: а) параметры горения уравнений (8), (9), (10); б) параметры горения уравнений (8), (11), (12)

Результаты рентгенофазового анализа показали, что промытые продукты горения всех синтезированных композиций состоят из пяти фаз: нитрида титана, карбида кремния, нитрида кремния α - и β -модификаций, а также примеси свободного кремния в количестве не превышающем 1 %. Другие отличия экспериментально определенного состава продуктов горения от теоретического состава обсуждается ниже вместе с микроструктурой продуктов горения (рисунком 2).

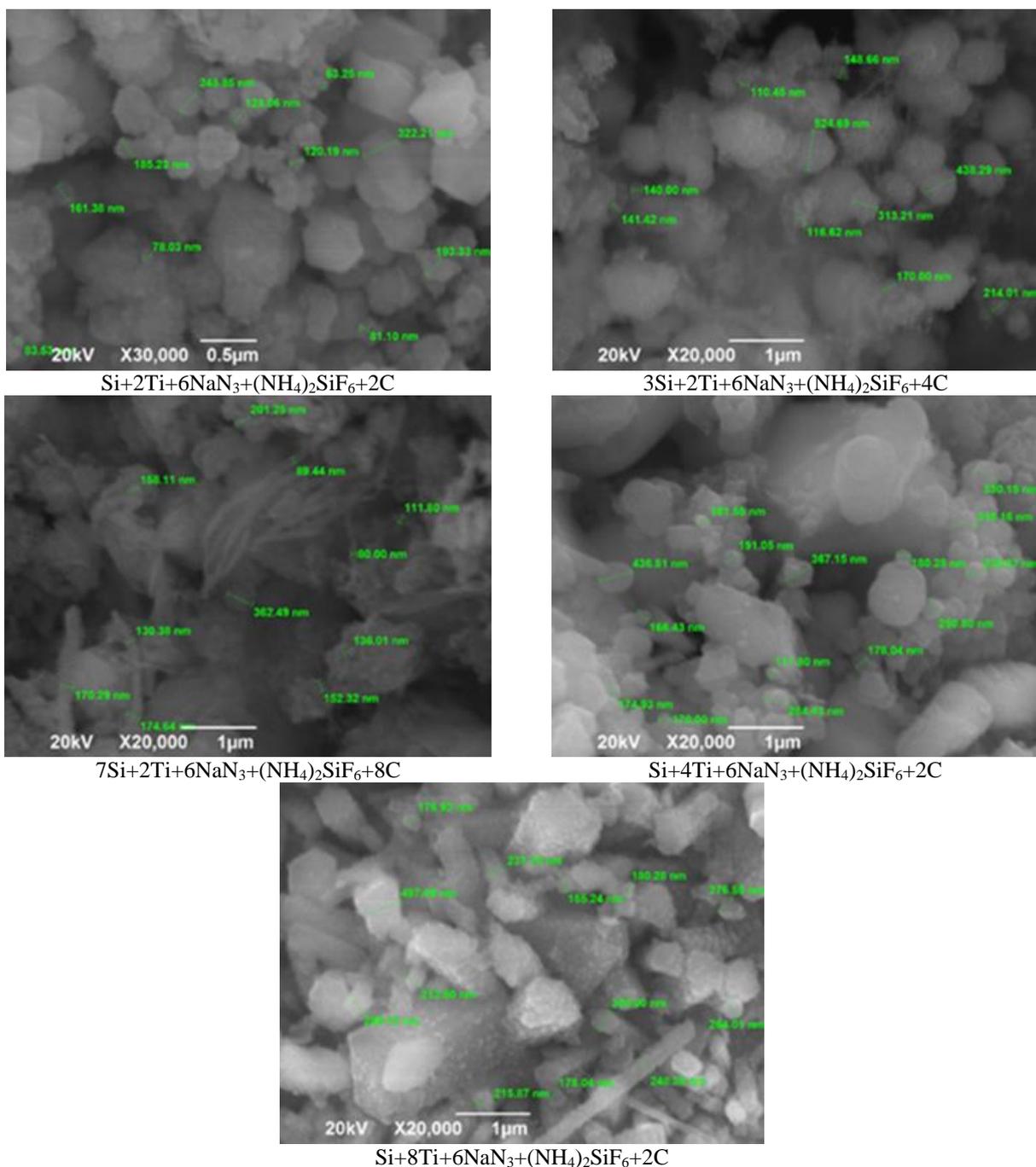


Рис. 2 – Морфология частиц продуктов горения смесей после операции промывки в дистиллированной воде при различном соотношении исходных компонентов

При горении шихтовой смеси « $\text{Si-Ti-6NaN}_3-(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6-\text{C}$ » образуются продукты, состоящие из ультрадисперсных частиц равноосной и сферической форм размером 100-300 нм. Результаты РФА показывают образование пяти фаз: TiN – 59,4 %, $\beta\text{-SiC}$ – 11,9 %, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ – 17,3 %, $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ – 10,4 %, а также незначительное количество свободного кремния Si – 1,0 %. Таким образом, синтезирована композиция отличается от теоретического состава (60,7 % TiN – 39,3 % SiC) меньшим содержанием карбида кремния наличием нитрида кремния и небольшого количества примеси свободного кремния. Отметим, что наличие небольших примесей непрореагировавшего кремния характерно и для других случаев применения процесса горения для получения нитридных и карбидных композиций [8-10].

При увеличении содержания кремния и углерода на два моля – шихта « $3\text{Si}+2\text{Ti}+6\text{NaN}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6+4\text{C}$ », состав продуктов горения аналогичен составу смеси « $\text{Si}+2\text{Ti}+6\text{NaN}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6+2\text{C}$ », при этом отличается меньшим содержанием TiN – 41,0 %, увеличенным содержанием $\beta\text{-SiC}$ – 28,7 % и представляют собой преимущественно частицы равноосной и сферической форм с размером 100-400 нм. Также продукты горения шихты « $3\text{Si}+2\text{Ti}+6\text{NaN}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6+4\text{C}$ » содержат $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ – 15,4 % и $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ – 13,9 % и незначительное количество Si – 1,0 %. Таким образом, композиция отличается от ожидаемого теоретического состава (43,6% TiN – 56,4 % SiC) большей разницей в содержании карбида кремния и наличием нитрида кремния.

При увеличении содержания углерода в четыре раза и кремния в семь раз – шихта « $7\text{Si}+2\text{Ti}+6\text{NaN}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6+8\text{C}$ », продукты горения шихты отличаются от продуктов горения смеси « $\text{Si}+2\text{Ti}+6\text{NaN}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6+2\text{C}$ » увеличением содержания $\beta\text{-SiC}$ – 46,1 % и снижением количества TiN – 24,2 %, при этом содержание нитрида кремния осталось прежним, однако увеличилась доля β -фазы ($\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ – 13,3 % и $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ – 15,4 %). Продукты синтеза представляют собой преимущественно волокна диаметром 50-200 нм и длиной до 3 мкм и

равноосные частицы размером 100-300 нм. Такой состав композиции отличается от ожидаемого состава (27,9% TiN – 72,1% SiC) в 2 раза меньшим содержанием карбида кремния и наличием нитрида кремния.

В результате горения шихты «Si+4Ti+6NaN₃+(NH₄)₂SiF₆+2C» с увеличенным в два раза содержанием титана по сравнению с шихтой «Si+2Ti+6NaN₃+(NH₄)₂SiF₆+2C» при том же содержании углерода и кремния, образуются преимущественно частицы сферической и равноосной форм с диаметром 100-300 нм. Продукты горения состоят из пяти фаз: TiN – 73,8 %, β-SiC – 9,5 %, α-Si₃N₄ – 8,8 % и β-Si₃N₄ – 7,4 % а также Si – 0,5 %. Таким образом, синтезирована композиция, отличается незначительно от теоретического состава (75,6% TiN – 24,4% SiC) намного меньшим содержанием карбида кремния и наличием нитрида кремния.

В случае шихты «Si+8Ti+6NaN₃+(NH₄)₂SiF₆+2C» с увеличенным в четыре раза содержанием титана по сравнению с шихтой «Si+2Ti+6NaN₃+(NH₄)₂SiF₆+2C» при том же содержании углерода и кремния, приводит к увеличению содержания TiN – 82,0 %, снижению количества β-SiC – 4,5 %, α-Si₃N₄ – 4,6 % и β-Si₃N₄ – 8,7 %, а также снижением доли Si – 0,2 %. Продукты горения представляют собой частицы равноосной формы размером 100-500 нм и волокна диаметром 100-200 нм и длиной до 3 мкм. Здесь состав синтезированной композиции отличается от теоретического состава (86,1% TiN – 13,9% SiC) в три раза меньшим содержанием карбида кремния и наличием нитрида кремния.

Таким образом, при реализации процесса азидного СВС для получения высокодисперсной композиции порошков TiN-SiC экспериментальный состав композиции заметно отличается от теоретического, в первую очередь, по значениям содержания карбида кремния и наличием нитрида кремния. Этот факт можно объяснить тем, что горение – сложный быстропротекающий высокотемпературный процесс, в котором не успевает установиться равновесие на всех стадиях, и не все стадии этого процесса хорошо изучены. Поэтому результаты теоретических расчетов могут давать заметную погрешность. Кроме того, в эксперименте определяется состав остывших продуктов горения, а при остывании могут происходить процессы взаимодействия высокотемпературных продуктов горения и фазовые превращения, которые могут существенно изменить состав продуктов горения.

Заключение

Таким образом, применение метода азидного СВС не позволило синтезировать целевую двухфазную порошковую композицию TiN-SiC. Однако, впервые показана возможность применения азидной технологии СВС для получения композиций ультрадисперсных керамических порошков TiN-Si₃N₄-SiC с размером частиц от 100 до 500 нм, что является заметным достижением, так как до этого с применением метода СВС удавалось получить композиции TiN-Si₃N₄ и TiN-Si₃N₄-SiC только значительно более крупных порошков с размером частиц 5-10 мкм при сжигании силицидов титана и карбида кремния в газообразном азоте при высоком давлении [11]. Следует также отметить, что ранее предпринималась попытка применить метод азидного СВС для получения микро- и нанопорошковой композиции TiN-Si₃N₄ [12]. Продукт горения представлял собой композицию ультрадисперсных порошков, но чистую нитридную композицию, состоящую только из нитрида кремния и нитрида титана, получить не удалось, так как в конечном продукте присутствовали в большом количестве (от 10 до 40 %) побочные непроазотированные продукты Ti и Si, а также промежуточные продукты реакций TiSi₂ и Na₂TiF₆.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00298.

Funding

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-08-00298.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доценту Новикову В.А. за помощь в проведении рентгенофазового и микроструктурного анализов синтезированных композиций.

Acknowledgement

The authors are grateful to docent Novikov V.A. for help in conducting out X-ray phase and microstructural analyzes of the synthesized compositions.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

- Амосов, А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пос. / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 567 с.
- Курдюмов, А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов 2-е изд. / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов и др. – М.: МИСиС, 1996. – 416 с.
- Амосов, А.П. Научно-технические основы применения процессов СВС для создания литых алюмоматричных композиционных сплавов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами / А.П. Амосов // Научно-технические основы в машиностроении, 2013. – № 8. – С. 3-9.
- Kondratieva L.A. Investigation of possibility to fabricate Si₃N₄-TiN ceramic nanocomposite powder by azide SHS method / L.A. Kondratieva, I.A. Kerson, A.Yu. Illarionov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 156 (2016) 012032. – DOI:10.1088/1757-899X/156/1/012032.
- Titova, Y.V. Development of SHS azide technology of silicon carbide nanopowder / Y.V. Titova, A.Yu. Illarionov, A.P. Amosov, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. – 177(1). – 012115.
- Jie-Cai Han. Synthesis of Si₃N₄-TiN-SiC composites by combustion reaction under high nitrogen pressures / Jie-Cai Han, Gui-Qing Chen, Shan-Yi Du et al. // Journal of the European Ceramic Society, 20 (2000). – pp. 927-932.

7. Zeng J. Combustion Synthesis of Si₃N₄-SiC Composite Powders / J. Zeng, Y. Miyamoto, O. Yamada // Journal of the American Ceramic Society, 1989. – V. 74. – pp. 2197-2200.
8. Kata D. Preparation of Fine Powders in the Si-C-N System Using SHS Method / D. Kata, J. Lis, R. Pampuch et al. // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 1998. – V. 7. – No. 4. – pp. 475-485.
9. Хачатрян Г.Л. Активированное горение смеси кремний-углерод в азоте и СВС композиционных керамических порошков Si[3]N[4]/SiC и карбида кремния / Г.Л. Хачатрян, А.Б. Арутюнян, С.Л. Харатян // Физика горения и взрыва, 2006. – Т. 42. – № 5. – С. 56.
10. Manukyan K.V. Combustion synthesis and compaction of Si₃N₄/TiN composite powder / K.V. Manukyan, S.L. Kharatyan, G. Blugan et al. // Ceram. Int. 2007. Vol. 33. P. 379–383.
11. Han J.C. Synthesis of Si₃N₄-TiN-SiC composites by combustion reaction under high nitrogen pressures / Han J.C., Chen Q.C., Du S.Y. et al. // J. Eur. Ceram. Soc, 2000. – Vol. 20. – pp. 927-932.
12. Kondratieva L.A. Study the possibility of obtaining micro - and nanopowder nitride composition Si₃N₄-TiN in silicon halide – sodium azide – titanium halide system by SHS azide technology / L.A. Kondratieva, I.A. Kerson, G.V. Bichurov et al. // Vestnik of SamST U. Technical Sciences series, 2016. – No. 4 (52). – pp. 130-138.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Amosov, A.P. Poroshkovaja tehnologija samorasprostranjajushhegosa vysokotemperaturnogo sinteza materialov [Powder technology of self-propagating high-temperature synthesis of materials]: textbook / A.P. Amosov, I.P. Borovinskaya, A.G. Merzhanov. - M.: Mashinostroenie-1, 2007. - 567 p. [in Russian]
2. Kurdyumov, A.V. Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov [Production of castings from non-ferrous metal alloys] 2nd ed. / A.V. Kurdyumov, M.V. Pikunov et al. - M.: MISIS, 1996-- - 416 p. [in Russian]
3. Amosov, A.P. Nauchno-tehnicheskie osnovy primeneniya processov SVS dlja sozdaniya lityh aljumomatricznych kompozicionnyh splavov, diskretno armirovannyh nanorazmernymi keramicheskimi chasticami [Scientific and technical bases of the application of SHS processes for the creation of cast aluminum-matrix composite alloys discretely reinforced with nanoscale ceramic particles] / A.P. Amosov // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii [High-tech technologies in mechanical engineering], 2013. - No. 8. - pp. 3-9. [in Russian]
4. Kondratieva L.A. Investigation of possibility to fabricate Si₃N₄-TiN ceramic nanocomposite powder by azide SHS method / L.A. Kondratieva, I.A. Kerson, A.Yu. Illarionov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 156 (2016) 012032. – DOI:10.1088/1757-899X/156/1/012032.
5. Titova, Y.V. Development of SHS azide technology of silicon carbide nanopowder / Y.V. Titova, A.Yu. Illarionov, A.P. Amosov, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. – 177(1). – 012115.
6. Jie-Cai Han. Synthesis of Si₃N₄-TiN-SiC composites by combustion reaction under high nitrogen pressures / Jie-Cai Han, Gui-Qing Chen, Shan-Yi Du et al. // Journal of the European Ceramic Society, 20 (2000). – pp. 927-932.
7. Zeng J. Combustion Synthesis of Si₃N₄-SiC Composite Powders / J. Zeng, Y. Miyamoto, O. Yamada // Journal of the American Ceramic Society, 1989. – V. 74. – pp. 2197-2200.
8. Kata D. Preparation of Fine Powders in the Si-C-N System Using SHS Method / D. Kata, J. Lis, R. Pampuch et al. // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 1998. – V. 7. – No. 4. – pp. 475-485.
9. Khachatryan G.L. Aktivirovannoe gorenje smesi kremnij-uglerod v azote i SVS kompozicionnyh keramicheskikh poroshkov Si[3]N[4]/SiC i karbida kremniya [Activated gorenje gorenje mixture of silicon-carbon in nitrogen and SHS composite ceramic powders Si[3]N[4]/SiC and silicon carbide] / G.L. Khachatryan, A.B. Harutyunyan, S.L. Kharatyan // Fizika gorenija i vzryva [Physics of combustion and explosion], 2006. - Vol. 42. - No. 5. - p. 56.10. Manukyan K.V. Combustion synthesis and compaction of Si₃N₄/TiN composite powder / K.V. Manukyan, S.L. Kharatyan, G. Blugan et al. // Ceram. Int. 2007. Vol. 33. P. 379–383. [in Russian]
11. Han J.C. Synthesis of Si₃N₄-TiN-SiC composites by combustion reaction under high nitrogen pressures / Han J.C., Chen Q.C., Du S.Y. et al. // J. Eur. Ceram. Soc, 2000. – Vol. 20. – pp. 927-932.
12. Kondratieva L.A. Study the possibility of obtaining micro - and nanopowder nitride composition Si₃N₄-TiN in silicon halide – sodium azide – titanium halide system by SHS azide technology / L.A. Kondratieva, I.A. Kerson, G.V. Bichurov et al. // Vestnik of SamST U. Technical Sciences series, 2016. – No. 4 (52). – pp. 130-138.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.013>

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИЙ

Научная статья

Федосеева В.П.^{1,*}, Сайкин М.С.²

¹ ORCID: 0000-0002-3739-2111;

^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина, Иваново, Россия

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

Аннотация

Разработаны конструкции магнитожидкостных датчиков для диагностики и контроля уровня вибраций технического оборудования различного назначения. Магнитожидкостные датчики вибраций имеют преимущества по сравнению с известными конструкциями, а именно обладают высоким быстродействием и надёжностью, обеспечивают работоспособность после воздействия значительных нагрузок и сохраняют свои эксплуатационные характеристики в течение длительного времени. На основе проведенного анализа разработанных конструкций, а также численной и экспериментальной оценке эксплуатационных параметров датчиков даны рекомендации по их применению. Новизна всех конструкций магнитожидкостных датчиков вибраций подтверждена наличием охранных документов.

Ключевые слова: магнитожидкостный датчик вибраций, чувствительный элемент, магнитная жидкость, постоянный магнит.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF VIBRATION SENSORS BASED ON MAGNETIC FLUID

Research article

Fedoseeva V.P.^{1,*}, Saykin M.S.²

¹ ORCID: 0000-0002-3739-2111;

^{1,2} V.I.Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

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

Abstract.

The current article introduces the designs of sensors based on magnetic fluid for diagnostics and monitoring of the vibration level of technical equipment for various purposes. Magnetic fluid vibration sensors have advantages over known designs, namely, they have high performance and reliability, ensure operability after exposure to significant loads and retain their performance characteristics for long periods of time. Based on the analysis of the developed structures, as well as numerical and experimental evaluation of the operational parameters of the sensors, the article also provides recommendations for their use. The novelty of all designs of magnetic fluid vibration sensors is confirmed by the presence of security documents.

Keywords: magnetic fluid vibration sensor, sensing element, magnetic fluid, permanent magnet.

Введение

Для виброконтроля и диагностики технических объектов применяются различные типы датчиков, выбор которых определяется поставленными техническими задачами [1]. Использование новых физических эффектов позволило создать принципиально новые конструкции датчиков вибраций.

Любая конструкция магнитожидкостного датчика вибраций (МЖДВ) представляет собой магнитный подвес, состоящий из трёх кольцевых постоянных магнитов. Один из магнитов представляет собой чувствительный элемент, одноименные полюса которого направлены к одноименным полюсам статических магнитов, которые могут быть расположены в корпусе или крышках датчика. Магнитная жидкость (МЖ) удерживается пондеромоторной силой, создаваемой чувствительным элементом, и обеспечивает его левитацию с минимальным коэффициентом трения. Чувствительный элемент может быть расположен с внутренней или внешней стороны корпуса.

Актуальность работы обусловлена требованиями, предъявляемыми к техническому оборудованию различного назначения по обеспечению высокой надежности и ресурса работы. Поэтому необходимо разработать датчики вибраций, имеющие высокие точность и быстродействие в широком диапазоне измеряемых частот. Повышенные эксплуатационные требования предъявляются к датчикам диагностики и контроля вибраций энергетического оборудования, авиационных двигателей, железнодорожных мостов, насосного оборудования.

Основная часть

Создание магнитных жидкостей [2], [3] с отличающимися эксплуатационными характеристиками позволило разработать различные конструкции магнитожидкостных датчиков вибраций. В первоначально разработанной конструкции магнитожидкостного датчика МЖ является сердечником, который, пересекая витки измерительной обмотки, изменяет её индуктивность, что позволяет контролировать изменение динамического состояния объекта [4].

Этот датчик имеет ряд недостатков связанных с усилением магнитной седиментации МЖ из-за магнитной адгезии дисперсных магнитных частиц к внутренним стенкам корпуса, что снижает быстродействие датчика при резком изменении его положения.

В разработанных конструкциях магнитожидкостных датчиков вибраций в качестве чувствительного элемента используются кольцевые постоянные магниты, изготовленные из редкоземельных материалов с высокими значениями остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы [5], [6].

Проведена классификация разработанных магнитожидкостных датчиков вибраций по основным конструктивным признакам (см. рисунок 1).



Рис. 1 – Магнитожидкостный датчик вибраций

Одна из конструкций МЖДВ с чувствительным элементом, в качестве которого используется кольцевой постоянный магнит 1, расположенный внутри корпуса, представлена на рисунке 2 [7]. Магнитная жидкость 2 удерживается пондеромоторной силой в зазорах, один из которых образован с корпусом 3, а другой с цилиндрическим стержнем 4 изготовленным из немагнитопроводного материала. Выполнение конструкции датчика с двумя зазорами обеспечивает устойчивую левитацию чувствительного элемента внутри корпуса.

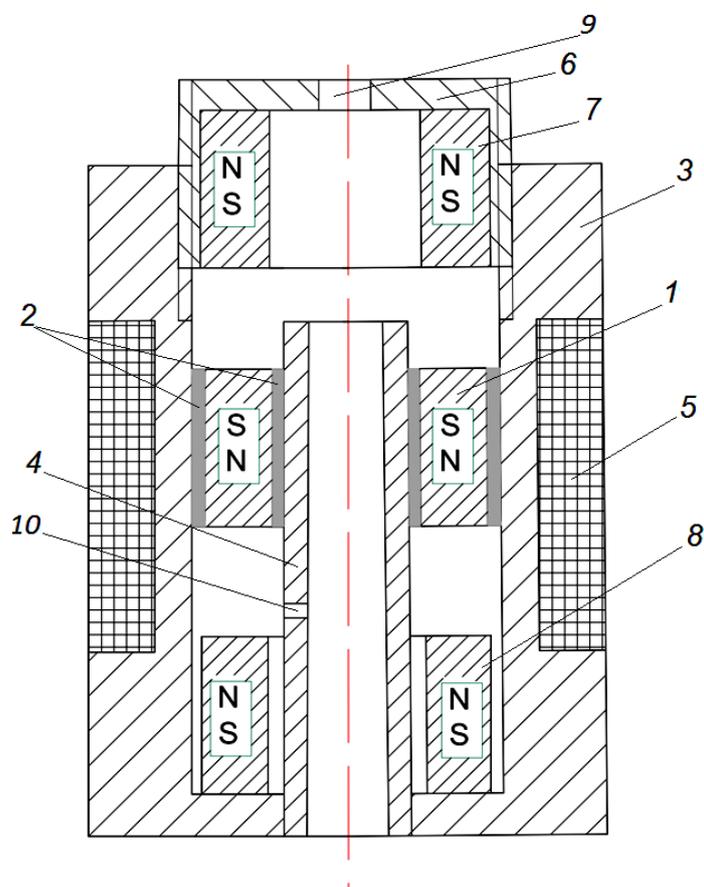


Рис. 2 – Магнитожидкостный датчик вибраций:

1 – кольцевой постоянный магнит; 2 – магнитная жидкость; 3 – корпус; 4 – цилиндрический немагнитопроводный стержень; 5 – измерительная обмотка; 6 – торцевая крышка; 7,8 – кольцевые постоянные магниты; 9,10 – сквозные отверстия

При возникновении вибраций оборудования происходят колебания чувствительного элемента МЖДВ с минимальным коэффициентом трения. В измерительной обмотке 5 наводится напряжение. Его величина пропорциональна частоте вибраций чувствительного элемента. В конструкции датчика предусмотрена возможность настройки диапазона измеряемых частот. С этой целью торцевая крышка 6 с кольцевым постоянным магнитом 7 имеет возможность осевого перемещения по резьбе. В немагнитопроводном корпусе расположен кольцевой постоянный магнит 8. Постоянные магниты 7 и 8 ориентированы одноименными полюсами к полюсам чувствительного элемента 1, при этом возникают силы отталкивания, которые препятствуют соприкосновению чувствительного элемента 1 с ними. Уменьшение расстояния между магнитами приводит к увеличению силы отталкивания, действующей на чувствительный элемент. Снижается чувствительность измерений, и контролируемый диапазон частот переходит в низкочастотную область. Увеличение этого расстояния приводит к уменьшению силы отталкивания, действующей на чувствительный элемент, что повышает чувствительность измерений вибраций в области высоких частот.

Наличие сквозных отверстий 9 и 10 обеспечивает равенство давлений во внутренних объемах корпуса и внешней среде, что предотвращает возникновение перепада давлений и повышает чувствительности измерений.

Данная конструкция обладает простотой и высокой надежностью. Однако, в этой конструкции на магнитную жидкость действует значительный градиент магнитного поля, который возникает на гранях чувствительного элемента. Это вызывает ускоренное старение МЖ, изменение её физико-химических параметров и, как следствие, эксплуатационных характеристик датчиков.

Численные исследования магнитного поля датчиков с различными размерами магнитов показали, что градиент магнитной индукции на гранях постоянного магнита достигает значений $\nabla B = 500$ Тл/м [8]. Для сохранения стабильности эксплуатационных характеристик магнитожидкостных датчиков разработана конструкция, в которой чувствительный элемент расположен внутри немагнитопроводной втулки (см. рисунок 3) [9].

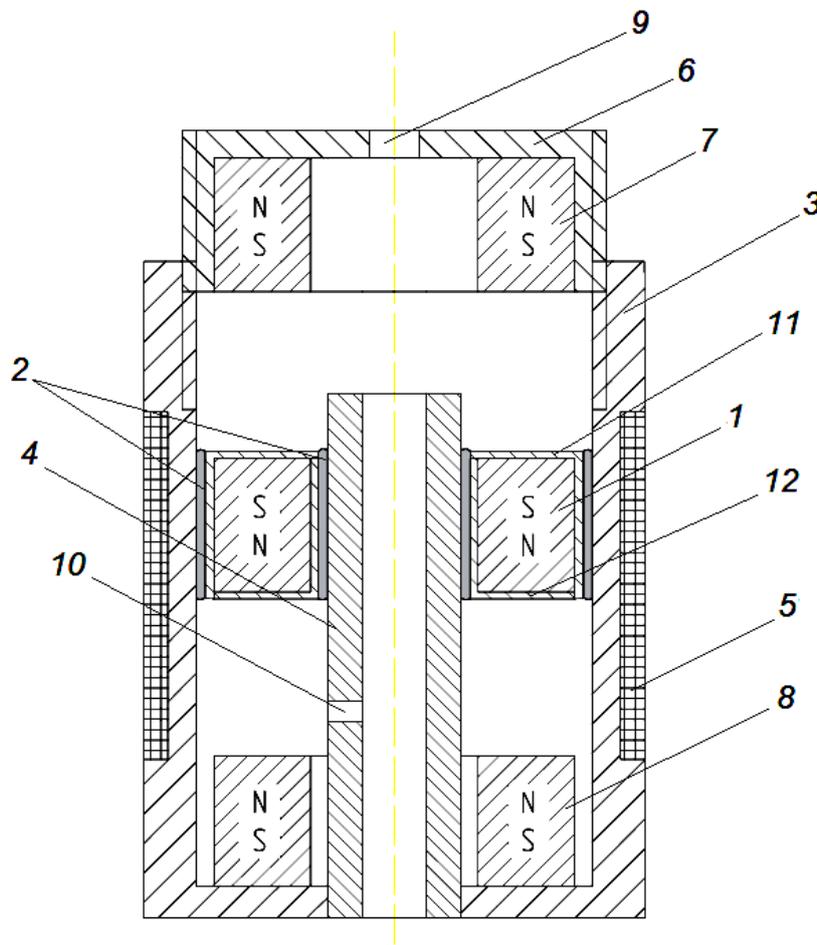


Рис. 3 – Магнитожидкостный датчик вибраций с защитной втулкой:

1 – кольцевой постоянный магнит; 2 – магнитная жидкость; 3 – корпус; 4 – цилиндрический немагнитопроводный стержень; 5 – измерительная обмотка; 6 – торцевая крышка; 7, 8 – кольцевые постоянные магниты; 9, 10 – сквозные отверстия; 11, 12 – немагнитопроводные части втулки

Втулка, состоит из двух немагнитопроводных частей 11 и 12. Это позволяет снизить градиент магнитной индукции на гранях постоянных магнитов в 2-2,5 раза, что повышает ресурс работы датчика и стабильность метрологических характеристик.

Для повышения пределов измерений магнитожидкостного датчика с возможностью предаварийного отключения оборудования разработана конструкция, представленная на рисунке 4 [10].

Отличительная особенность этой конструкции заключается в том, что датчик имеет дополнительные измерительные обмотки, установленные на немагнитопроводном каркасе, выполненном из двух полуколец, охватывающих корпус, а между частями измерительной обмотки имеются полукольца из немагнитопроводного материала.

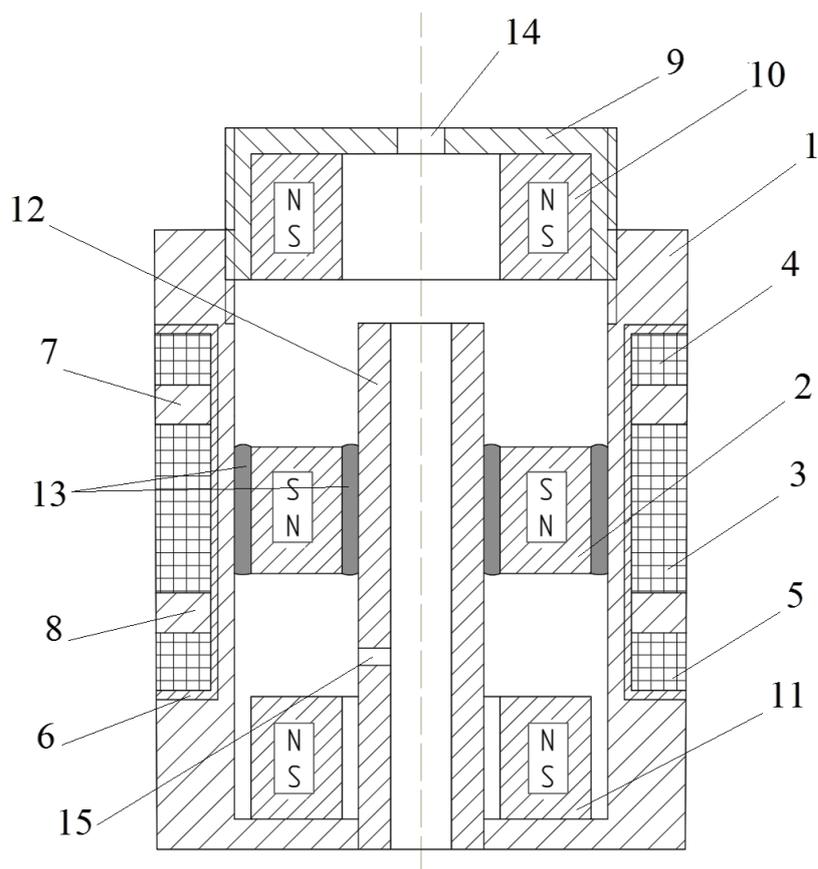


Рис. 4 – Магнитожидкостный датчик вибраций с дополнительными измерительными обмотками:
 1 – немагнитопроводный корпус; 2 – чувствительный элемент; 3 – основная обмотка; 4, 5 – дополнительные обмотки; 6 – немагнитопроводный корпус; 7, 8 – немагнитопроводные полукольца; 9 – крышка; 10, 11 – кольцевые постоянные магниты; 12 – немагнитопроводный стержень; 13 – магнитная жидкость

Магнитожидкостный датчик вибраций (см. рисунок 4) состоит из немагнитопроводного корпуса 1, в котором расположен чувствительный элемент 2, основная 3, и две дополнительные измерительные обмотки 4, 5. Обмотки установлены на немагнитопроводном каркасе 6, выполненном в виде двух полуколец. Между основной и дополнительной измерительными обмотками расположены полукольца 7, 8 из немагнитопроводного материала. На обращённых друг к другу цилиндрических поверхностях крышки 9 и корпуса 1 выполнена резьба.

Магнитный подвес выполнен аналогично выше рассмотренным конструкциям. Он состоит из кольцевых постоянных магнитов, ориентированных одноименными полюсами относительно полюсов подвижного постоянного магнита, один из которых 10 установлен в крышке, а другой 11 в корпусе датчика. Через чувствительный элемент 2 и кольцевой постоянный магнит 11 проходит полый стержень 12, выполненный из немагнитопроводного материала. Магнитная жидкость 13 удерживается пондеромоторной силой с обеих сторон чувствительного элемента. Для предотвращения возникновения перепада давлений внутри корпуса МЖДВ в торцевой крышке 9 и полем немагнитопроводном стержне 12 выполнены отверстия 14 и 15.

Разработаны конструкции магнитожидкостных датчиков вибраций, в которых чувствительный элемент расположен с внешней стороны корпуса. Дозаправка таких датчиков осуществляется без демонтажа с действующего оборудования. Это упрощает эксплуатацию датчиков и облегчает контроль объёма заправки магнитной жидкости в нём.

В конструкции одного из таких датчиков (см. рисунок 5) [11] чувствительный элемент 1 образует рабочий зазор, с корпусом 2, который заполнен магнитной жидкостью 3. На немагнитопроводной втулке 4 расположена катушка 5. Аналогично конструкции датчика (см. рисунок 2) торцевая крышка 6 с кольцевым постоянным магнитом 7 имеет возможность осевого перемещения, что позволяет настроить датчик на требуемый диапазон измеряемых частот. Магниты 7 и 8 ориентированы одноименными полюсами относительно полюсов чувствительного элемента 1, а магнит 8 расположен на немагнитопроводном основании 9. За счёт этого возникают силы отталкивания, которые препятствуют соприкосновению чувствительного элемента 1 с ними.

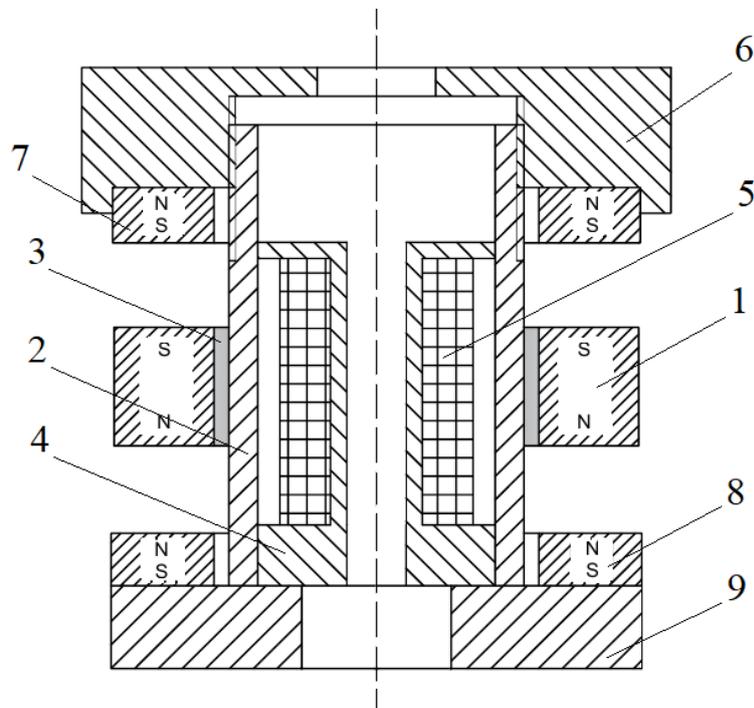


Рис. 5 – Магнитожидкостный датчик с внешним расположением чувствительного элемента:
 1 – чувствительный элемент; 2 – корпус; 3 – магнитная жидкость; 4 – немагнитопроводная втулка; 5 – катушка;
 6 – торцевая крышка; 7,8 – кольцевые постоянные магниты; 9 – основание

Отличие следующей конструкции МЖДВ (см. рисунок 6) заключается в том, что в ней имеются дополнительные обмотки подмагничивания, наличие которых позволяет повысить точность настроек эксплуатационных параметров датчиков [12].

Конструктивное отличие датчика заключается в том, что для повышения точности настроек измерений вибраций кольцевые магниты 7 и 8 помещены в сердечники 10 и 11, на которых уложены обмотки 12 и 13. При изменении направления постоянного тока в этих обмотках изменяется величина силы отталкивания, постоянных магнитов 7 и 8 на чувствительный элемент 1. При совпадении направлений магнитных потоков постоянных магнитов и потоков, создаваемых токами, протекающих по обмоткам 12 и 13, величина силы отталкивания возрастает и, наоборот, при встречном направлении этих потоков величина силы отталкивания уменьшается.

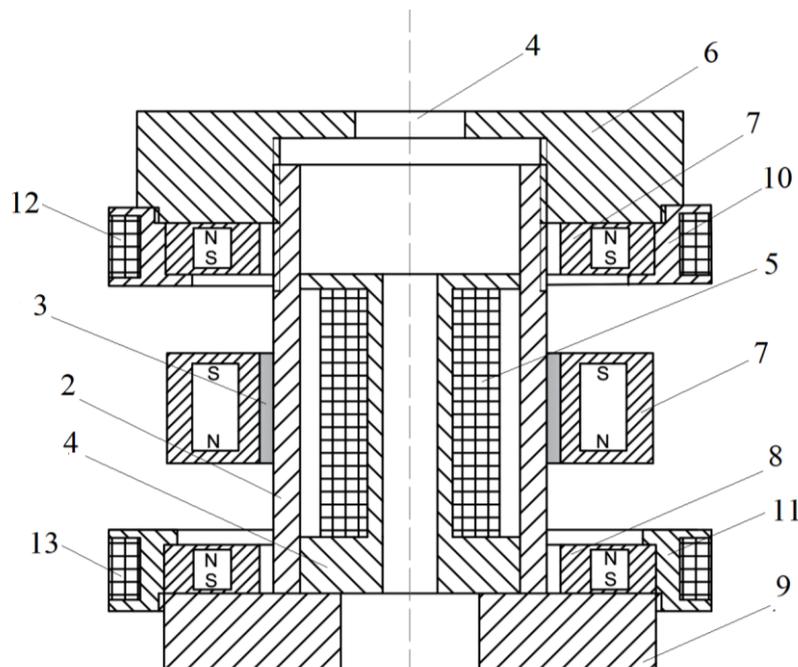


Рис. 6 – Магнитожидкостный датчик с внешним расположением чувствительного элемента
 и дополнительными обмотками подмагничивания:

1 – чувствительный элемент; 2 – корпус; 3 – магнитная жидкость; 4 – немагнитопроводная втулка; 5 – катушка;
 6 – торцевая крышка; 7,8 – кольцевые постоянные магниты; 9 – основание; 10,11 – сердечники; 12, 13 – обмотки

В целях лучшего использования энергии постоянного магнита разработана конструкция МЖДВ с магнитопроводом (см. рисунок 7) [13]. Наличие магнитопровода значительно повышает эффективность использования постоянных

магнитов за счёт уменьшения полей рассеяния и позволяет получить требуемые эксплуатационные характеристики устройства при снижении его массогабаритных параметров.

На рисунке 7 представлен МЖДВ, состоящий из цилиндрического немагнитопроводного корпуса 1, внутри которого расположен стержень из немагнитопроводного материала 2, чувствительный элемент 3, измерительной обмотки 4. Магнитопровод, состоит из двух вертикальных направляющих 5, закреплённых к корпусу датчика, и магнитопроводной крышки 6 со сквозным отверстием, внутренняя сторона которой выполнена в форме цилиндра и обращённых друг к другу вертикальных направляющих, в которых расположены постоянные магниты 7, ориентированные к подвижному магниту одноименными полюсами, и в крышке выполнена резьба.

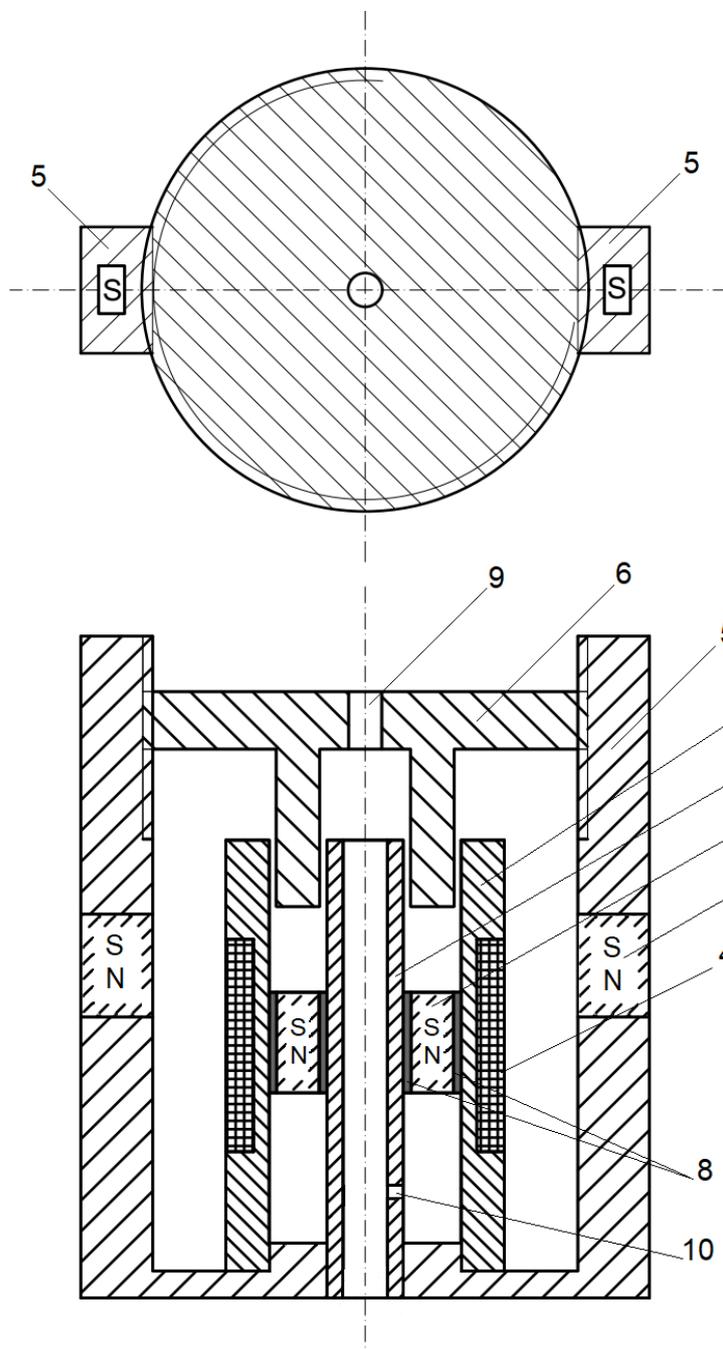


Рис. 7 – Магнитожидкостный датчик вибраций с магнитопроводом:

1 – немагнитопроводный корпус; 2 – немагнитопроводный стержень; 3 – чувствительный элемент; 4 – измерительная обмотка; 5 – вертикальные направляющие из магнитопроводного материала; 6 – магнитопроводная крышка; 7 – постоянные магниты; 8 – магнитная жидкость; 9, 10 – сквозные отверстия

Использование магнитопровода, позволяет уменьшить поля рассеяния магнитной системы датчика и повысить эффективность использования постоянных магнитов.

Подвижный кольцевой магнит 3, образует два зазора, один из которых с корпусом 1, а другой – с полым немагнитопроводным стержнем 2. Зазоры заполнены магнитной жидкостью 8, которая удерживается в них пондеромоторной силой. В магнитопроводной крышке 6 и в полым немагнитопроводном стержне 2 выполнены отверстия 9 и 10.

Численная и экспериментальная оценка эксплуатационных параметров датчиков

Цель исследований заключалась в определении силы взаимодействия между одноименными полюсами чувствительного элемента и магнитами магнитного подвеса.

На первом этапе проводилось численное исследование распределения магнитной индукции между обращенными друг к другу кольцевыми постоянными магнитами из сплава самарий-кобальт с размерами: K32×18×5, K17,1×10×11, K11×6×2,5. Постоянные магниты имели следующие параметры: величина остаточной индукции магнитов $B_r=0,95$ Тл, а коэрцитивной силы $H_c=680$ кА/м. Основные расчётные результаты получены на основе вычислительных экспериментов в программных пакетах ELCUT и FEMM. Расчёты проводились для двухмерного плоскомеридианного поля в цилиндрических координатах с учётом граничных условий Дирихле-Неймана.

Распределение магнитной индукции определялось на расстоянии Δ в диапазоне $0,1D - D$ от поверхности магнита с шагом $0,1D$, где D – наружный диаметр кольцевого постоянного магнита.

При температуре 20°C (рис. 8) снижение магнитной индукции составило: 90,7%, для магнита K32×18×5, 89,96% для магнита K17,1×10×11 и 88,26% для магнита K11×6×2,5.

При увеличении температуры до 120°C наблюдались аналогичные зависимости изменения магнитной индукции от расстояния Δ , при этом значения магнитной индукции при повышении температуры от 20°C и 120°C снизились на 5-7%.

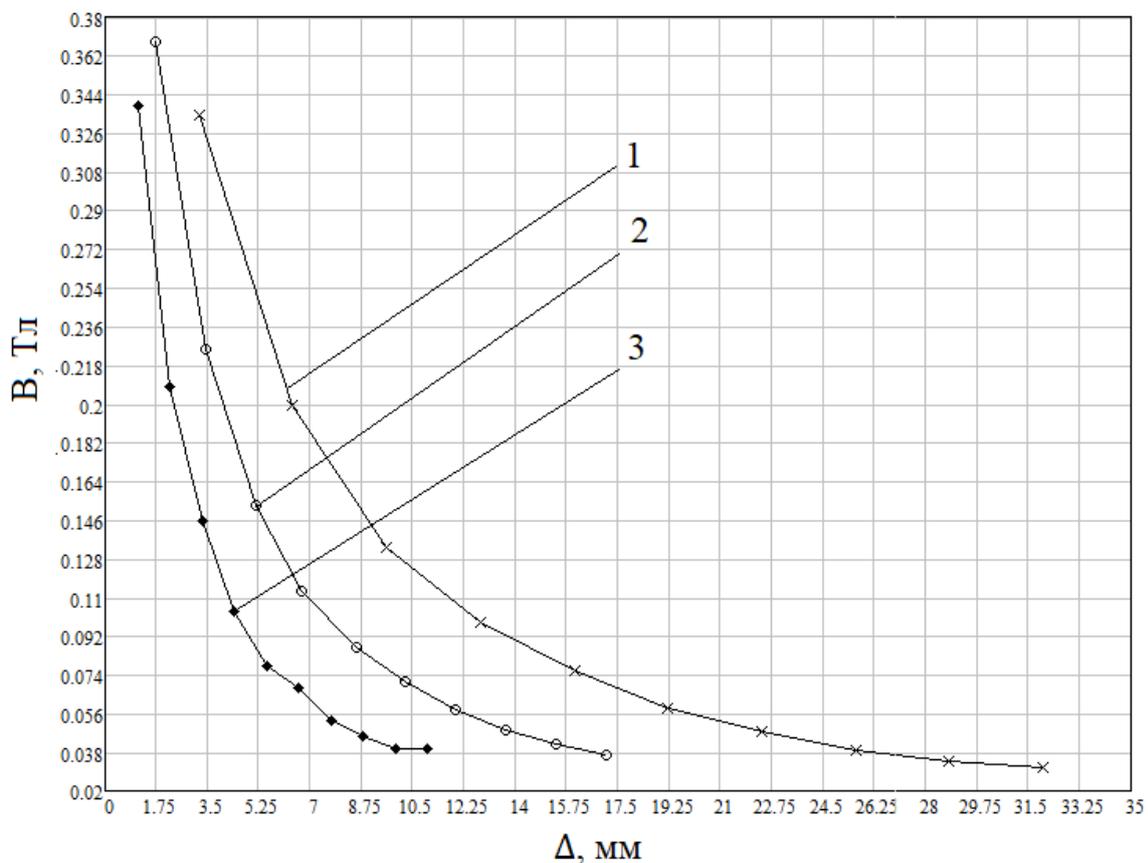


Рис. 8 – Зависимости изменения магнитной индукции МЖДВ от расстояния между магнитами при 20°C :
1 – магнит K32×18×5; 2 – магнит K17,1×10×11; 3 – магнит K11×6×2,5

Полученные результаты расчетов позволяют прогнозировать тенденции изменения магнитной индукции для различных размеров кольцевых постоянных магнитов магнитного подвеса и температурах эксплуатации.

Для тех же типоразмеров магнитов выполнены экспериментальные исследования по определению силы взаимодействия чувствительного элемента с кольцевыми магнитами магнитного подвеса на специально разработанном стенде, в состав которого входят электронные весы ВНМ-3/6 [15].

Испытательный стенд (рис.9) состоит из двух частей, одна из которых - статическая платформа 1, к которой крепится механический привод 2 с регулировочной ручкой 3. Консоль 4 крепится к механическому приводу посредством прямоугольной площадки 5, с подшипником 6, который закреплён на направляющей 7. К внешнему краю консоли крепится деталь 8, имеющая круглое отверстие, в котором с помощью немагнитных винтов 9 фиксируются постоянный магнит 10. Вторая часть устройства представляет собой электронные весы 11 высокого класса точности с немагнитопроводным столом 12, предназначенным для установки постоянного магнита 13. Фиксация магнитов 10 и 13 вдоль одной оси симметрии достигается использованием направляющих, выполненных в форме немагнитного стержня 14 для кольцевых магнитов или в форме частей полого цилиндра (на рисунке не показаны) для дисковых магнитов.

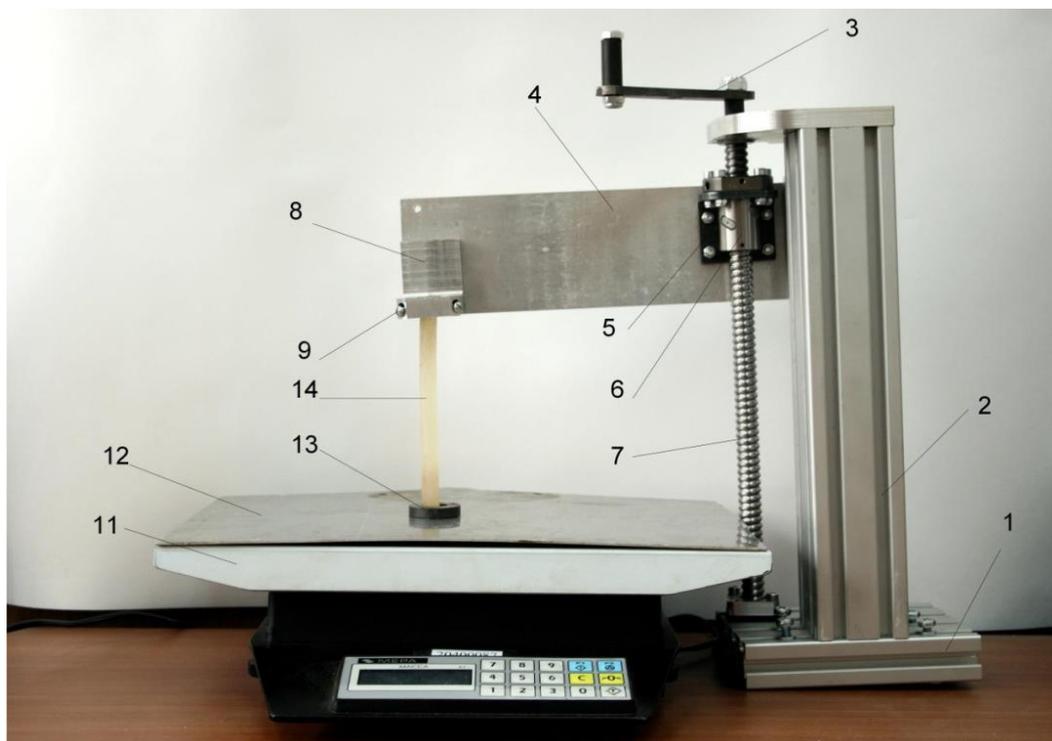


Рис. 9 – Внешний вид испытательного стенда:

1 – статическая платформа; 2 – механический привод; 3 – регулировочная ручка; 4 – консоль; 5 – прямоугольная площадка; 6 – подшипник; 7 – направляющая; 8 – фиксирующая деталь; 9 – винты; 10 – постоянный магнит; 11 – электронные весы; 12 – немагнитопроводный стол; 13 – постоянный магнит; 14 – направляющая

При проведении эксперимента выбирались два постоянных магнита одинаковых размеров и формы. Магниты располагались друг к другу одноименными полюсами. Один из магнитов 10 устанавливался в круглое отверстие детали 8 и закреплялся в нём с помощью немагнитных винтов 9. Для определения веса второго магнита 13 он устанавливался на немагнитопроводный стол 12 электронных весов 11, и определялась его масса без внешнего воздействия со стороны магнита 10. Затем магниты устанавливались по оси симметрии с помощью направляющих. Вращением регулировочной ручки 3 изменялось расстояние между магнитами 10 и 13. По показаниям электронных весов 11 фиксировалось увеличение массы второго магнита 13. Разность полученного значения и первоначальной массы магнита есть величина силы взаимодействия между постоянными магнитами 10 и 13. С помощью теслаамперметра фиксировалось значение магнитной индукции между постоянными магнитами при изменении расстояния между ними. Получены экспериментальные зависимости силы взаимодействия чувствительного элемента с постоянными магнитами магнитного подвеса (рис.10).

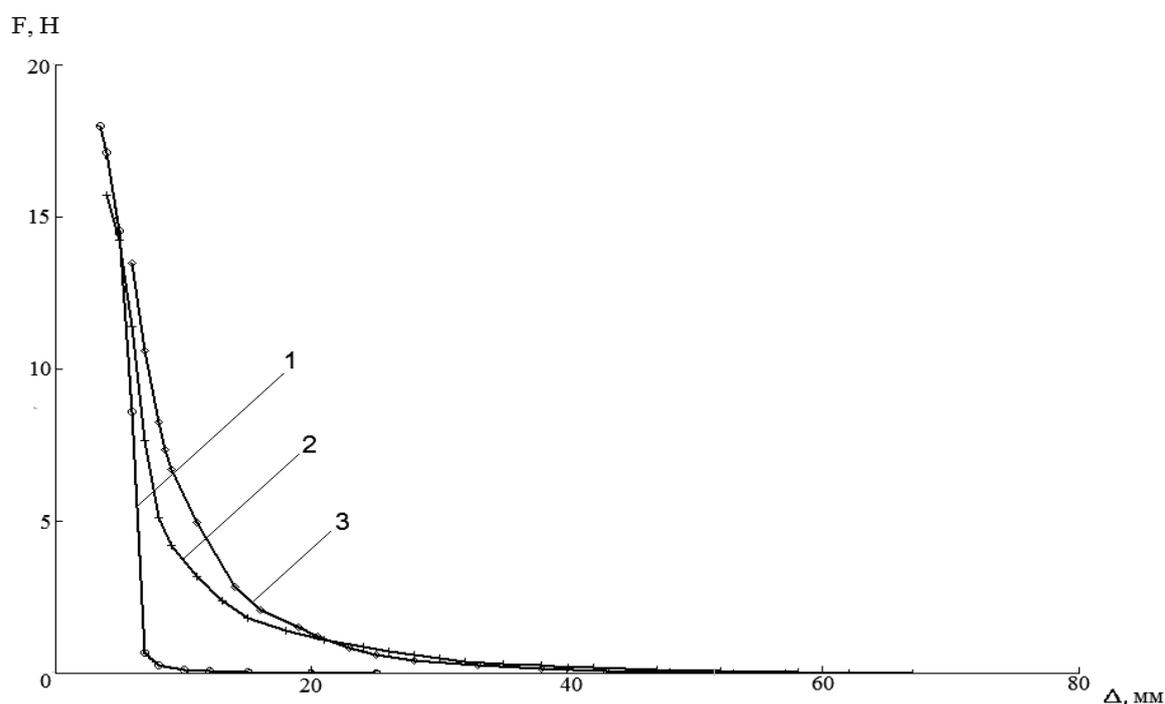


Рис. 10 – Экспериментальные зависимости силы взаимодействия:
1 – магнит K32×18×5; 2 – магнит K17,1×10×11; 3 – магнит K11×6×2,5

Разработанные конструкции магнитожидкостных датчиков вибраций имеют следующие технические характеристики:

- частотный диапазон, Гц: 4 – 5000;
- чувствительность, мВ/g: свыше 500;
- диапазон ускорений, g: 0,2-300;
- диапазон температур, °С: ± 60

Магнитожидкостный датчик вибраций (см. рисунок 2) может применяться для решения ряда технических задач, где отсутствуют жёсткие требования к повышенной стабильности метрологических характеристик в течение длительного срока эксплуатации. Данная конструкция может эксплуатироваться при наличии высокой амплитуды горизонтальных перемещений, что достигается высоким значением подъёмной силы обеспечивающей левитацию чувствительного элемента. Конструкция обладает повышенной надёжностью и простотой.

Требуемая по условиям эксплуатации стабильность метрологических характеристик обеспечивается применением конструкции МЖДВ (см. рисунок 3). В этой конструкции на МЖ действует пониженный градиент магнитного поля, что создаёт благоприятные условия для повышения ресурса работы датчика. Область применения – вибродиагностика и контроль работы авиационных двигателей.

Обе конструкции датчиков могут эксплуатироваться как в помещении, так и на открытом воздухе.

Магнитожидкостный датчик (см. рисунок 4) предназначен для эксплуатации на установках требующих дополнительного контроля и диагностики нерегламентированной работы оборудования.

Магнитожидкостные датчики (см. рисунки 5 и 6) предназначены для эксплуатации в закрытых помещениях или защищённом оборудовании. Область их применения – энергетическое оборудование электрических станций и подстанций. Датчики имеют возможность дозаправки даже во время эксплуатации.

Магнитожидкостный датчик (см. рисунок 7) имеет высокую точность и эффективность использования постоянных магнитов. Это позволяет уменьшить массогабаритные параметры датчика и использовать его в ограниченном пространстве.

Заключение

Проведен анализ особенностей разработанных конструкций магнитожидкостных датчиков вибраций, предназначенных для проведения её контроля и диагностики. Новизна представленных разработок подтверждена наличием охранных документов. Применение магнитожидкостных датчиков контроля и диагностики вибраций позволит повысить точность и эффективность оценки работоспособности оборудования различного назначения.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва. Техносфера. 2012. – 624 с.
2. Фертман В.Е. Магнитные жидкости / В.Е. Фертман. Справочное пособие Минск. Высшая школа. 1988.-84 с.
3. Берковский Б.М. Магнитные жидкости / Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков. – М.: Химия. 1989. – 240 с.
4. Бойко Н.Г. Магнитожидкостные датчики угла наклона, давления, ускорения / Н.Г. Бойко, С.А. Касаткин, А.В. Ключин // Механизация и автоматизация производства. №4, 1990. С.14.
5. Магниты постоянные на основе сплава «кобальт–самарий»: Технические условия. ТУ 6391-005-55177547-2008. Пышменский опытный завод «Прогресс». – Верхняя Пышма, 2008.
6. Магниты постоянные на основе сплава «неодим–железо–бор» марки ЧЗ6Р: Технические условия ТУ6391-002-55177547-2005 (Взамен ТУ 48-4-543-90 с изм.1,2). Пышменский опытный завод «Прогресс». – Верхняя Пышма, 2005.
7. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева. Патент на полезную модель RU 184838 U1, 12.11.2018. Заявка № 2018125789 от 12.07.2018
8. Сайкин М.С. Исследование распределения магнитной индукции в магнитожидкостном датчике вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева // В сборнике: Надёжность и долговечность машин и механизмов Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 205-208.
9. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева. Патент на полезную модель RU 189089 U1, 30.01.2019. Заявка № 2019102636 от 13.05.2019
10. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева. Патент на полезную модель RU 198257 U1, 29.06.2020. Заявка №2019144236 от 24.12.2019
11. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева. Патент на полезную модель RU 195546 U1, 31.01.2020. Заявка №2019127832 от 03.09.2019
12. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева. Патент на полезную модель RU 201384 U1, 11.12.2020. Заявка №2020129548 от 07.09.2020
13. Сайкин М.С. Устройство для измерения вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева. Патент на полезную модель RU 204436 U1, 25.05.21. Заявка №2021106092 от 09.03.2021
14. Сайкин М.С. Разработка магнитожидкостных виброметрических датчиков / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева // Сборник научных трудов 19-ой Международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, Россия, Иваново, 2020 г., С.262-268 (сентябрь 2020 г.)

15. Сайкин М.С. Экспериментальное исследование силы взаимодействия постоянных магнитов магнитоожидкостного датчика вибраций / М.С. Сайкин, В.П. Федосеева // Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции «Надёжность и долговечность машин и механизмов», Иваново, 12 апреля 2019. - С. 163-167.

Список литературы на английском языке/ References in English

1. Datchiki: Spravochnoe posobie [Sensors: Reference manual] / edited by V.M. Sharapov, E.S. Polishchuk. Moscow. Technosphere. 2012. – 624 p. [in Russian]
2. Fertman V.E. Magnitnye zhidkosti. Spravochnoe posobie [Magnetic fluids. Reference manual] / V. E. Fertman. Minsk. Vysshaya shkola. 1988.-84 p. [in Russian]
3. Berkovsky B.M. Magnitnye zhidkosti [Magnetic fluids] / B. M. Berkovsky, V. F. Medvedev, M. S. Krakov. - М.: Khimiya. 1989– 240 p. [in Russian]
4. Boyko N.G. Magnitozhidkostnyye datchiki ugla naklona, davleniya, uskorenija [sensors based on magnetic fluid of tilt angle, pressure, acceleration] / N. G. Boyko, S. A. Kasatkin, A. V. Klunin // Mekhanizacija i avtomatizacija proizvodstva [Mechanization and automation of production]. №4, 1990. p.14 [in Russian]
5. Magnity postojannye na osnove splava «kobal't–samarij» [Permanent magnets based on the cobalt–samarium alloy]: Technical specifications. TU 6391-005-55177547-2008. Pyshmen experimental plant "Progress". - Verkhnyaya Pyshma, 2008 [in Russian]
6. Magnity postojannye na osnove splava «neodim–zhelezo–bor» marki Ch36R [Permanent magnets based on the alloy "neodymium-iron-boron" brand CH36R]: Technical specifications TU6391-002-55177547-2005 (Instead of TU 48-4-543-90 with revision 1,2). Pyshmen experimental plant "Progress". - Verkhnyaya Pyshma, 2005 [in Russian]
7. Saykin M.S. Ustrojstvo dlja izmerenija vibracij [A device for measuring vibrations] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva. Utility model patent RU 184838 U1, 12.11.2018. Application No. 2018125789 dated 12.07.2018 [in Russian]
8. Saikin M.S. Issledovanie raspredelenija magnitnoj indukcii v magnitozhidkostnom datchike vibracij. V sbornike: Nadjozhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov. Sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Investigation of the distribution of magnetic induction in a magnetic fluid vibration sensor In the collection: Reliability and durability of machines and mechanisms. Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference] / M. S. Saikin, V. P. Fedoseeva. 2018, pp. 205-208 [in Russian]
9. Saykin M.S. Ustrojstvo dlja izmerenija vibracij [A device for measuring vibrations] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva. Utility model patent RU 189089 U1, 30.01.2019. Application No. 2019102636 dated 13.05.2019 [in Russian]
10. Saykin M.S. Ustrojstvo dlja izmerenija vibracij [A device for measuring vibrations] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva. Utility model patent RU 198257 U1, 29.06.2020. Application No. 2019144236 dated 24.12.2019 [in Russian]
11. Saykin M.S. Ustrojstvo dlja izmerenija vibracij [A device for measuring vibrations] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva. Utility model patent RU195546 U1, 31.01.2020. Application No. 2019127832 dated 03.09.2019 [in Russian]
12. Saykin M.S. Ustrojstvo dlja izmerenija vibracij [A device for measuring vibrations] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva. Utility model patent RU201384 U1, 11.12.2020. Application No.2020129548 dated 07.09.2020 [in Russian]
13. Saykin M.S. Ustrojstvo dlja izmerenija vibracij [A device for measuring vibrations] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva. Utility model patent RU204436 U1, 25.05.21. Application No.2021106092 dated 09.03.2021 [in Russian]
14. Saykin M.S. Razrabotka magnitozhidkostnykh vibrometricheskikh datchikov [Development of magnetofluidic vibrometric sensors] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva / Collection of scientific papers of the 19th International Pless Scientific Conference on Nanodisperse magnetic liquids, Russia, Ivanovo, 2020, pp.262-268 (September 2020) [in Russian]
15. Saikin M.S. Ehksperimental'noe issledovanie sily vzaimodejstvija postojannykh magnetov magnitozhidkostnogo datchika vibracij. Sbornik materialov X Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nadjozhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov» [Experimental investigation of the interaction force of permanent magnets of a magnetofluidic vibration sensor. Collection of materials of the X All-Russian Scientific and Practical Conference "Reliability and durability of machines and mechanisms"] / M. S. Saykin, V. P. Fedoseeva, Ivanovo, April 12, 2019. - pp. 163-167 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.014>

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВЫПЕЧКИ ХЛЕБА И МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Научная статья

Федотов В.А.^{1,*}, Берестова А.В.²

¹ ORCID: 0000-0002-3692-9722;

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

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

Аннотация

В статье изучаются способы нагрева тестовых заготовок при выпечке хлебобулочных и мучных кондитерских (пряничных) изделий в печах с комбинированным обогревом - инфракрасным и высокочастотным. Установлены оптимальные технологические характеристики (длина волны) инфракрасного излучения при нагревании тестовых образцов. Судя по максимальной глубине проникновения инфракрасного излучения, сделан вывод о максимальной интенсификации прогрева теста в печах при длине волны около 1 нм. При этом длительность выпечки мучных кондитерских изделий с помощью инфракрасных излучателей по сравнению с обычной выпечкой горячим воздухом сокращается на 20-50 % при выпечке тортов, пирогов и печенья, на 30-40 % при выпечке кексов.

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

A STUDY OF TECHNOLOGICAL MODES OF PRODUCTION OF BREAD AND PASTRY PRODUCTS

Research article

Fedotov V.A.^{1,*}, Berestova A.V.²

¹ ORCID: 0000-0002-3692-9722;

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

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

Abstract

The article examines the methods of heating a dough piece when baking bakery and pastry (gingerbread) products in ovens with combined heating (infrared and high-frequency). The authors determine optimal technological characteristics (wavelength) of infrared radiation during the heating of test samples. Judging by the maximum depth of penetration of infrared radiation, the research concludes that the maximum intensification of the heating of the dough in furnaces occurs at a wavelength of ~1 nm. At the same time, the duration of baking pastry with the help of infrared emitters, compared with conventional baking with hot air, is reduced by 20-50% when baking cakes, pies and cookies, and by 30-40% when baking cupcakes.

Keywords: baking, technological control, bread, quality assessment.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и совершенствованию новых наиболее перспективных способов выпечки хлебобулочных и мучных кондитерских изделий: применение токов высокой частоты, микроволнового и инфракрасного обогрева [1]. Выпечка токами высокой частоты принципиально отличается от других способов тем, что почти не зависит от температуры окружающей среды, так как тепло генерируется непосредственно внутри выпекаемого продукта [2]. Пищевые продукты, в том числе и изделия из теста, при облучении их определенной частотой электромагнитного поля становятся диэлектриками. При этом тепло выделяется по всему объему в результате преобразования электрической энергии в теплоту [3].

Первые работы по применению токов высокой частоты для выпечки хлеба проводились еще в 1934 г. С того времени проведено много исследований, касающихся вопросов выпечки хлеба и мучных кондитерских изделий токами высокой частоты. Опытные установки для выпечки с комбинированным воздействием токами высокой частоты и обычным (или инфракрасным) обогревом были сооружены и испытаны во многих странах [4]. Например, на кондитерских фабриках работают бисквитные высокочастотные печи, состоящие из трех секций, расположенных одна над другой. Внизу помещается силовая установка, в середине - пекарная камера, сверху - ламповый генератор. Тесто прогревается в электрическом поле между двумя электродами, расположенными внутри пекарной камеры, на некотором расстоянии от верхней поверхности изделий. Высокочастотный обогрев, применяемый для выпечки печенья, на начальной стадии не имеет преимуществ по сравнению с обычной выпечкой. На второй стадии увеличивается количество выделяемых газов и пара, и в связи с этим наблюдается неравномерный подъем печенья [5]. Высокочастотный нагрев целесообразно применять на конечной стадии выпечки, где печенье приобретает окраску и доводится до требуемой влажности. Применение высокочастотного нагрева позволило выпекать печенье с более низкой влажностью. При низкой влажности внутренних слоев печенья интенсивнее протекает процесс карамелизации сахара, улучшается вкус [6].

Материалы и методы исследования

В печах с комбинированным обогревом - инфракрасным и высокочастотным - продолжительность выпечки сокращается вдвое при хорошем качестве изделий. С 1 м² площади пода промышленной печи с ленточным подом получают от 35 до 45 кг/ч сдобных изделий и от 30 до 40 кг/ч пряников. При этом расход электроэнергии на 100 кг изделий составляет от 30 до 35 кВт*ч. При высокочастотном нагреве сокращается время выпечки, улучшается пористость и вкус бисквитных изделий [7]. В промышленности получил широкое распространение сверхвысокочастотный (СВЧ) способ обогрева [8]. Энергия волн в таких установках потребляется нагреваемой или выпекаемой продукцией и превращается в тепло, ускоряя прогрев. Производили пробные выпечки в кондитерской печи Menu-master, выпекали хлеб пшеничный в/с, хлеб украинский, пряник Покровский. Глубину проникновения в тесто

инфракрасного излучения оценивали с помощью термопары. Продукты, содержащие до 20 % влаги, высушиваются в таких печах в десять раз быстрее, скорость высушивания удваивается при циркуляции горячего воздуха [9].

Результаты и их обсуждение

Применение инфракрасного излучения является перспективным для интенсификации процессов выпечки и создания условий автоматизации управления ими. Интенсификация выпечки достигается благодаря проникновению внутрь изделий коротковолновых инфракрасных лучей. В этом случае предотвращается перегрев верхней поверхности, который наблюдается при продолжительной выпечке в печах с темными излучателями. Способствует интенсификации прогрева теста в печах со светлыми излучателями то, что среда пекарной камеры, содержащая водяной пар и углекислый газ, пропускает инфракрасные лучи с длиной волны менее 2,5 нм.

Исследования показали, что проникающая способность инфракрасных лучей в хлебе в несколько раз выше, чем в тесте. Максимальная глубина проникновения при длине волны около 1 нм составляет: для пшеничного хлеба - 13, украинского - 19, теста пшеничного влажностью 44 % - 8 мм.

Проведены эксперименты по определению спектральной проникающей способности пряничного теста в области от 0,7 до 5 нм с целью применения инфракрасных лучей для выпечки пряников. Длинноволновая область спектра способствует максимальной лучеиспускательной способности греющих поверхностей промышленных канальных печей, а коротковолновая - максимальной лучеиспускательной способности наиболее высокотемпературных инфракрасных излучателей, которые можно применять в промышленных печах. Опыты показали, что пряничное тесто незначительно пропускает излучения с длиной волны от 0,8 нм до 1,8 нм, а при длине волны более 3,5 нм инфракрасное излучение не проникает даже через самые тонкие срезы образца пряничного теста.

Наиболее высокая проницаемость пряничного теста, приготовленного по рецептуре пряника Покровского, 7 мм и мякиша 11 мм соответствует длинам волн 1 нм (таблица 1). Отечественная промышленность освоила производство многих инфракрасных излучателей, нагреваемых как электрическим током, так и газом. Наиболее широко распространены зеркальные инфракрасные лампы, кварцевые излучатели, металлические трубчатые темные излучатели (ТЭНы); керамические - трубчатые, стержневые, плоские инфракрасные излучатели; неметаллические излучатели, электропроводящие стекла [10].

Таблица 1 – Максимальная глубина проникновения инфракрасного излучения

Изделие	Полуфабрикат / готовое изделие	Длина волны инфракрасного излучения, нм		
		0,5	1	2
Хлеб пшеничный в/с	Мякиш	8	13	7
	Тесто	4	8	5
Хлеб украинский	Мякиш	15	19	17
	Тесто	3	8	4
Пряник Покровский	Мякиш	5	11	6
	Тесто	3	7	4

Для генерации инфракрасных волн такой длины можно использовать излучатель, с нанесенным на его поверхность аморфным углеродным покрытием. При температуре 200-250 °С излучатель испускает 15 % энергии с длиной волн 0,2-0,4 мкм. Длительность выпечки мучных кондитерских изделий с помощью такого излучателя по сравнению с обычной выпечкой горячим воздухом сократилась на 20-50 %. Для проверки эффекта интенсивности процесса выпечки были поставлены опыты промышленного масштаба по выпечке кексов, тортов, пирогов и печенья.

Продолжительность выпечки кексов (толщиной 40 мм) в металлических противнях, обогреваемых подвешенными излучающими плитами с углеродным покрытием, можно сократить на 30-40 % по сравнению с высокопроизводительными печами, обогреваемыми горячим воздухом или высокотемпературными излучателями. Для придания поверхности выпекаемых изделий более интенсивной окраски используют вспомогательные излучатели высокой температуры.

Заключение

В качестве альтернативного способу выпечки хлебобулочных и пряничных изделий горячим воздухом использовали инфракрасный и высокочастотный нагрев. Наиболее эффективную длину волны инфракрасного излучения при этом выбирали, основываясь на максимальной глубине проникновения излучений. Инфракрасные излучатели в кондитерской печи, осуществляющие нагрев длинной волны 1 нм, обеспечивают максимальный прогрев тестовых заготовок для хлеба пшеничного в/с, хлеба украинского, пряника Покровского, сокращая время выпечки на 20-50 %.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Жидков, С. А. Приоритетные направления развития рынка зерна в России: монография / С. А. Жидков. – Мичуринск: ООО БИС, 2018. – 313 с.
2. 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.

3. 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.
4. 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.
5. Саидов, Д. Т. Резервы повышения рентабельности реализации зерна / Д. Т. Саидов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2010. - №2 (26). – С.152-155.
6. Doggett H. Sorghum. 2nd edition / H. Doggett // New York, USA: John Wiley and Sons. Inc., NY, 1988. – P. 512.
7. Hochholdinger F. Towards the molecular basis of heterosis / F. Hochholdinger, N. Hoekenger // Trends Plant Sci., 2007. – 12. – P. 427-432.
8. Manley M. Near infrared hyperspectral imaging for the evaluation of endosperm texture in whole yellow maize (*Zea mays* L.) kernels / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. // Agric. Food Chem, 57. 2009.
9. Беркутова, Н. С. Микроструктура пшеницы / Н. С. Беркутова, И. А. Швецова. - М.: Колос, 1977. - 122 с.
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. 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 BIS, 2018. – 313 p. [in Russian]
2. Medvedev, P. V. Kompleksnaia ocenka potrebitel`skikh svoi`stv zerna i produktov ego pererabotki [Comprehensive assessment of consumer properties of grain and its processed products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Mezhdunarodny`i` nauchno-issledovatel`skii` zhurnal [International Research Journal]. - 2015. - № 7-1 (38). - P. 77-80. [in Russian]
3. Zenkina I. V. Analiz strategicheskikh razry`vov kak instrument strategicheskogo analiza i potencial ego primeneniia 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. – P. 107-112. [in Russian]
4. Fedotov V. A. Informatcionno-izmeritel`naia sistema opredeleniia potrebitel`skikh svoi`stv pshenitcy` [Information and measurement system for determining the consumer properties of wheat] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov // Vestneyk Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. – 2013. – № 3. – P. 140-145. [in Russian]
5. Saidov, D. T. Rezervy` povы`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). – P.152-155. [in Russian]
6. Doggett H. Sorghum. 2nd edition / H. Doggett // New York, USA: John Wiley and Sons. Inc., NY, 1988. – P. 512.
7. Hochholdinger F. Towards the molecular basis of heterosis / F. Hochholdinger, N. Hoekenger // Trends Plant Sci., 2007. – 12. – P. 427-432.
8. Manley M. Near infrared hyperspectral imaging for the evaluation of endosperm texture in whole yellow maize (*Zea mays* L.) kernels / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. // Agric. Food Chem, 57. 2009.
9. Berkutova, N. S. Mikrostruktura pshenitcy` [Microstructure of wheat] / N. S. Berkutova, I. A. Shvetcova. - М.: Kolos, 1977. - 122 p. [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. - Rostov-na-Donu: Feniks, 2002. - 192 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.015>

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ВЫПЕЧКИ ХЛЕБА

Научная статья

Федотов В.А.^{1,*}, Соловых С.Ю.²

¹ ORCID: 0000-0002-3692-9722;

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

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

Аннотация

В статье описана методика, лежащая в основе системы контроля и автоматического управления процессом выпечки для регулирования интенсивности окрашивания корки хлеба. Для регистрации изменения окраски корки тестовых заготовок в зависимости от температуры поверхности была собрана лабораторная установка. В проведенных экспериментах инструментально окраску оценивали косвенно, определяя величину отражательной способности корки с помощью фотоэлементов. Для устранения влияния температуры фотоэлементы были помещены в термостатирующее устройство. Градуировка установки фотометром дала возможность корректировать выдаваемые фотоэлементом значения с учетом его селективности к излучениям видимого спектра. Температура тестовых заготовок определялась термопарами, размещенными на их поверхности.

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

INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR CONTROLLING THE BREAD BAKING PROCESS

Research article

Fedotov V.A.^{1,*}, Solovykh S.Yu.²

¹ ORCID: 0000-0002-3692-9722;

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

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

Abstract

The article describes the technology underlying the system of control and automatic control of the baking process to regulate the intensity of coloring of the bread crust. The study uses a laboratory machine to register the change in the color of the crust of test products depending on the surface temperature. The experiments show that the color was instrumentally evaluated indirectly by determining the value of the reflectivity of the crust using photocells. To eliminate the influence of temperature, the photocells were placed in a thermostatic device. Calibration of the installation with a photometer made it possible to adjust the values issued by the photocell, taking into account its selectivity to visible spectrum radiation. The temperature of the test pieces was determined by thermocouples placed on their surface.

Keywords: baking, technological control, bread, quality assessment.

Введение

Хлебные изделия выпекают в пекарной камере хлебопекарной печи. Для выпечки 1 кг хлеба требуется от 500 кДж до 800 кДж. Это тепло расходуется на испарение влаги из тестовой заготовки и на ее прогревание до температуры 97 °С в центре [1]. Большая доля тепла передается тесту-хлебу путем излучения от раскаленных стенок пекарной камеры. Остальная часть тепла передается теплопроводностью от горячего пода и конвекцией от движущихся токов паровоздушной смеси в пекарной камере [2].

Тестовые заготовки прогреваются постепенно, с поверхности, поэтому процессы, характерные для выпечки, происходят не одновременно во всей массе хлеба, а послойно [3]. Быстрота прогрева зависят от ряда факторов. Повышение температуры в пекарной камере ускоряет прогревание заготовок и сокращает время выпечки. Тесто высокой влажности и достаточно большой пористости прогревается быстрее, чем крепкое и плотное тесто. Тестовые заготовки значительной толщины и массы при прочих равных условиях прогреваются дольше [4]. Недостатки методик контроля и управления процессом выпечки связаны с недостаточностью оценки только лишь временного и температурного факторов для регулирования интенсивности окрашивания хлеба.

Материалы и методы исследования

Интенсивность окраски хлебобулочных изделий усиливается с повышением температуры их поверхности, при которой протекает реакция меланоидинообразования. Этот процесс связан с ароматом хлеба и его вкусовыми свойствами [5]. Цвет корки как конечный результат воздействия температурного режима рабочей камеры на поверхность изделия оценивается органолептически, что не позволяет установить связь между процессом накопления красящих веществ и температурой среды [6]. Об интенсивности окраски корки хлеба при выпечке можно судить в какой-то мере по ее отражательной способности, для непрерывного определения которой не могут быть использованы существующие приборы – универсальные фотометры фотоэлектрические, например, марки КФК-3. Фотометры также могут быть использованы для измерения коэффициентов пропускания и оптических плотностей прозрачных жидкостных растворов, измерения скорости изменения оптической плотности и определения концентрации веществ в растворах после предварительной градуировки фотометров. Фотометры применяются в различных отраслях сельского хозяйства, медицины, предприятиями нефтехимической, пищевой индустрии, прочих сферах промышленности [7].

Результаты и их обсуждение

Была разработана лабораторная установка, с помощью которой можно непрерывно регистрировать на ленте электродного потенциометра изменение интенсивности света, отраженного от корки хлеба [8]. Принцип действия ее

основан на том, что на поверхность тестовой заготовки направляется пучок света от источника, который, отражаясь, попадает на фотоэлемент, включенный в измерительную схему. Установка состоит из осветителя, фотоэлектрического устройства, помещенного в термостатирующее приспособление, регистрирующего прибора. Источником света служит лампа накаливания с матовой поверхностью, питающаяся от стабилизированного источника [9]. Световой поток, пройдя через конденсатор, выходит из осветителя и попадает на поверхность тестовой заготовки, размещенной в рабочей камере лабораторной хлебопекарной печи. Часть светового потока, отраженного от участка поверхности хлеба, принимается фотоэлементом. Чтобы избежать влияния кривизны и неравномерности окраски поверхности хлеба, замеры ведут на горизонтальном участке поверхности корки хлеба площадью 30 мм². При выпечке хлеба без увлажнения среды пекарной камеры поверхность хлеба матовая, поэтому небольшие отклонения контролируемого участка поверхности от горизонтального положения не влияют на показания прибора.

Изменение высоты тестовой заготовки только в первый период выпечки влияет на величину показаний в пределах от 7 % до 9 %. Во втором периоде выпечки, когда прекращается рост тестовой заготовки и поверхность стабилизируется, прибор удовлетворительно регистрирует накопление красящих веществ меланоидиновой реакции в корке хлеба. Для преобразования отраженного от поверхности хлеба пучка света в энергию электрического тока установлено фотоэлектрическое устройство. Оно состоит из двух вентильных фотоэлементов и осветителя. Вентильный фотоэлемент реагирует на изменение величины света отраженного от поверхности хлеба. Фотоэлемент включен в схему дифференциально и служит для увеличения чувствительности регистрирующего прибора. Величина светового потока, падающего на него от источника, постоянна и стабилизирована [10].

Вентильные фотоэлементы (например, типа ФЭССУ-3) весьма чувствительны к температурным колебаниям. Так как фотоэлементы не могут быть удалены на большое расстояние от печи, для устранения влияния температуры на показания прибора фотоэлементы помещены в термостатирующее устройство. Градуировка прибора осуществляется по фотометру, что дает возможность градуировать фотоэлемент косвенно, с учетом селективности к излучениям видимого спектра. Описанная выше установка была использована для регистрации изменения окраски корки хлеба в зависимости от температуры его поверхности.

Выпекали тестовые заготовки развесом 450-500 г из муки пшеничной первого сорта при температуре среды 200 °С. Температура поверхности тестовой заготовки в процессе выпечки замерялась медно-константановыми термопарами, размещенными на поверхности тестовой заготовки. В результате проведенных опытов установлено, что после посадки тестовой заготовки в печь начинается интенсивное потемнение ее поверхности, достигающее наибольшей величины при температуре поверхности, близкой 60 °С. При дальнейшем повышении температуры поверхности до 100 °С хлеба ее отражательная способность увеличивается. В первые минуты прогрева происходит клейстеризация крахмала на поверхности изделия, продукты которой придают поверхности более темный цвет. Это подтверждается тем, что наиболее интенсивно поверхность хлеба темнеет при 60 °С, т. е. при температуре клейстеризации крахмала. При дальнейшем повышении температура поверхности становится светлее вследствие ее обезвоживания. После того как температура корки поднимается выше 100 °С, наступает бурное течение меланоидиновой реакции, что ведет к накоплению красящих веществ в корке. Изменение цвета ее от светло-желтого до темно-коричневого происходит при нагревании от 130 °С до 180 °С. При температуре корки выше 180 °С начинается обугливание хлеба. Конечной температурой корки хлеба из муки пшеничного сорта можно считать температуру около 150 °С.

Заключение

Таким образом, устройство позволяет косвенно, по отражательной способности корки судить о ее цвете, описанное устройство при дальнейшем его совершенствовании может быть использовано в схеме автоматического управления процессом выпечки для регулирования интенсивности окрашивания корки хлеба. Установлено, что наибольшая величина потемнения тестовых заготовок в печах достигается при температуре около 60 °С, дальнейшее повышение температуры поверхности изделий до 100 °С приводит к увеличению отражательной способности, вплоть до конечной температуры около 150 °С.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Медведев, П. В. Комплексная оценка потребительских свойств зерна и продуктов его переработки / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 7-1 (38). - С. 77-80.
2. Федотов В. А. Информационно-измерительная система определения потребительских свойств пшеницы / П. В. Медведев, В. А. Федотов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – № 3. – С. 140-145.
3. Пищевая химия / Нечаев А. П., Траубенберг С. Е., Кочеткова А. А. и др. Под ред. А. П. Нечаева. – СПб.: ГИОРД, 2001. – 592 с.
4. Ауэрман, Л. Я. Технология хлебопекарного производства / Л. Я. Ауэрман. - 9-е. - СПб.: Профессия, 2005. - 416 с.
5. Медведев, П. В. Информационно-измерительные системы управления потребительскими свойствами зерноучных товаров / П. В. Медведев, В. А. Федотов // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд : монография. – Оренбург: ООО «Агентство «Пресса», 2013. – С. 35-51.
6. Шепелев, А. Ф. Товароведение и экспертиза электропродуктов: учебное пособие для вузов / А. Ф. Шепелев, И. А. Печенежская. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. - 192 с.
7. Manley M. Near infrared hyperspectral imaging for the evaluation of endosperm texture in whole yellow maize (*Zea mays* L.) kernels / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. // Agric. Food Chem, 57. 2009.
8. Беркутова, Н. С. Микроструктура пшеницы / Н. С. Беркутова, И. А. Швецова. - М.: Колос, 1977. - 122 с.

9. Shewry P.R. Wheat / P.R. Shewry // J. Exp. Bot., 60. 2009.

10. Bradsky G. Learning OpenCV / G. Bradsky, A. Kaehler. Sebastopol : O'Reilly Media, Inc., 2008. 571 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Medvedev, P. V. Kompleksnaia ocenka potrebitel'skikh svoi'stv zerna i produktov ego pererabotki [Comprehensive assessment of consumer properties of grain and its processed products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Mezhdunarodny'i nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]. - 2015. - № 7-1 (38). - P. 77-80. [in Russian]

2. Fedotov V. A. Informatcionno-izmeritel'naiia sistema opredeleniia potrebitel'skikh svoi'stv pshenitcy [Information and measurement system for determining the consumer properties of wheat] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov // Vestnyk Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. - 2013. - № 3. - P. 140-145. [in Russian]

3. Pishchevaia himiia [Food chemistry] / Nechaev A. P., Traubenberg S. E., Kochetkova A. A. et al. ed. A. P. Nechaeva. - SPb.: GIOR, 2001. - 592 p. [in Russian]

4. Aue`rman, L. Ia. Tekhnologiia khlebopekarnogo proizvodstva [Bakery production technology] / L. Ia. Aue`rman. - 9-th edition. - SPb.: Professiia, 2005. - 416 p. [in Russian]

5. Medvedev, P. V. Informatcionno-izmeritel'ny'e sistemy upravleniia potrebitel'skimi svoi'stvami zernomuchnykh tovarov [Information and measurement systems for managing consumer properties of grain products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov // Sovremennye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyi vzgliad : monografiia [Modern trends in economics and management: a new look: monograph]. - Orenburg: OOO «Agentstvo «Pressa», 2013. - P. 35-51. [in Russian]

6. Shepelev, A. F. Tovarovedenie i ekspertiza elektrotovarov: uchebnoe posobie dlia vuzov [Commodity science and expertise of electrical goods: a textbook for universities] / A. F. Shepelev, I. A. Pechenezhskaia. - Rostov-na-Donu: Feniks, 2002. - 192 p. [in Russian]

7. Manley M. Near infrared hyperspectral imaging for the evaluation of endosperm texture in whole yellow maize (*Zea mays* L.) kernels / M. Manley, P. Williams, D. Nilsson et al. // Agric. Food Chem, 57. 2009.

8. Berkutova, N. S. Mikrostruktura pshenitcy [Microstructure of wheat] / N. S. Berkutova, I. A. Shvetcova. - M.: Kolos, 1977. - 122 p. [in Russian]

9. Shewry P.R. Wheat / P.R. Shewry // J. Exp. Bot., 60. 2009.

10. Bradsky G. Learning OpenCV / G. Bradsky, A. Kaehler. Sebastopol : O'Reilly Media, Inc., 2008. 571 p.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.016>**ПРЕДИКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ФАЗ АЗОТИРОВАННЫХ СЛОЕВ**

Научная статья

Федотова А.Д.^{1,*}, Крукович М.Г.²¹ ORCID: 0000-0003-1547-4156;² ORCID: 0000-0001-5563-0930;^{1,2} Российский университет транспорта, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (afca23[at]mail.ru)

Аннотация

Проведен анализ закономерностей протекания процессов азотирования в различных средах и экспериментально установлен порядок образования фаз. Определен параметр, комплексно характеризующий процесс азотирования, названный кинетическим коэффициентом, и установлена его температурно-временная зависимость. Предложена модель расчета толщин фаз азотированного слоя, в том числе при наличии в стали легирующих элементов. Показано, что легирующие элементы оказывают одинаковое влияние на рост слоя нитридов и α – твердого раствора при различных способах протекания процесса. Эта модель может быть использована для любых технологий азотирования в случае определения для них приведенных кинетических коэффициентов.

Ключевые слова: азотирование, кинетический коэффициент, граничные условия, толщина слоя, нитриды, α -твердый раствор, легирующие элементы, достоверность расчета.

PREDICTIVE CALCULATION OF THE PHASE THICKNESS OF NITRIDED CASES

Research article

Fedotova A.D.^{1,*}, Krukovich M.G.²¹ ORCID: 0000-0003-1547-4156;² ORCID: 0000-0001-5563-0930;^{1,2} Russian university of transport, Moscow, Russia

* Corresponding author (afca23[at]mail.ru)

Abstract

The current article conducts an analysis of the regularities of the nitriding processes in various media and experimentally determines the order of phase formation. The study determined a parameter that comprehensively characterizes the nitriding process, which was called the kinetic coefficient; the study also determines its temperature-time relationship. The authors propose a model for calculating the thicknesses of the phases of nitrided cases, including the presence of alloying elements in the steel. It is shown that the alloying elements have the same effect on the growth of the nitride layer and the α - solid solution at different methods of the process. This model can be used for any nitriding technologies if the presented kinetic coefficients are determined.

Keywords: nitriding, kinetic coefficient, boundary conditions, phase thickness, nitrides, α -solid solution, alloying elements, reliability of calculation.

Введение

Азотирование является одним из эффективных методов повышения надежности и долговечности деталей и инструментов. В то же время для надежного применения процесса насыщения и азотированных слоев на практике возникает необходимость получения предварительных результатов обработки. В частности, для оценки качества упрочненных деталей, изготовленных из конструкционных сталей, важным является толщина полученного слоя. В настоящее время существуют методики расчета толщины фаз азотированного слоя, основанные на решении уравнений Фика с граничными условиями, которые позволяют определить коэффициенты диффузии азота в железе и образующихся фазах, оценить толщину образующихся слоев с допустимой достоверностью [1], [3], [4], [6]. Попытки использования этого подхода при азотировании легированных конструкционных сталей приводят к большим погрешностям (более 15%) и сводятся к группированию сталей по степени легированности при отдельных способах обработки [2], [7].

Таким образом, целью данной работы является разработка методики предварительного расчета толщины фаз азотированного слоя на конструкционных сталях с более высокой достоверностью.

В задачи работы входит исследование закономерностей протекания процессов азотирования в различных средах, моделирование и расчет ключевого параметра процесса азотирования, определение влияния содержания легирующих элементов на толщину азотированного слоя.

Методика проведения исследования

Результаты азотирования получены на техническом железе и специально выплавленных сталях с различным содержанием одного из легирующих элементов (до 6 % по массе). Выбранные количества легирующих элементов соответствуют их содержанию в большинстве конструкционных и инструментальных сталях.

Азотирование проводилось в газовой среде на основе диссоциированного аммиака, разбавленного азотом при 500 – 550 °С в течение 25 -35 ч, в расплавах солей на основе цианатов натрия и калия при температурах 550 – 570 °С в течение 1,5 ч и в газовой среде закрытых контейнеров при 500 – 550 °С в течение 5 ч. Газообразующей составляющей последней технологии являлась мочевины (100 %). Контейнеры герметизировались плавким затвором (80% SiO₂ + 20% В₂O₃).

Исследования структуры и фазового состава получаемых азотированных слоев проводились с применением металлографического, рентгеноструктурного и дюрOMETрического методов анализа.

Математическое моделирование заключалось в нахождении коэффициентов диффузии азота в железе при решении уравнений Фика с граничными условиями, обеспечивающих образования различных фаз. Эмпирическое моделирование основывалось на методах аппроксимации зависимостей, принципах экстраполяции и интерполяции, принципах подобия и логики. Достоверность разработанной модели расчета была подтверждена на стандартных марках конструкционных сталей.

Разработка расчетной модели

Формирование азотированного слоя во времени протекает при изменении условий на поверхности. При этом в начале образуется слой α -твердого раствора, а затем, по мере накопления азота, формируется слой нитридов. Динамика формирования слоя во времени была прослежена при азотировании в расплавах солей (Рисунок 1). Было установлено, что до образования сплошного слоя нитридов имеет место одна закономерность роста α -твердого раствора, а после образования слоя нитридов, толщиной 3 мкм – другая.

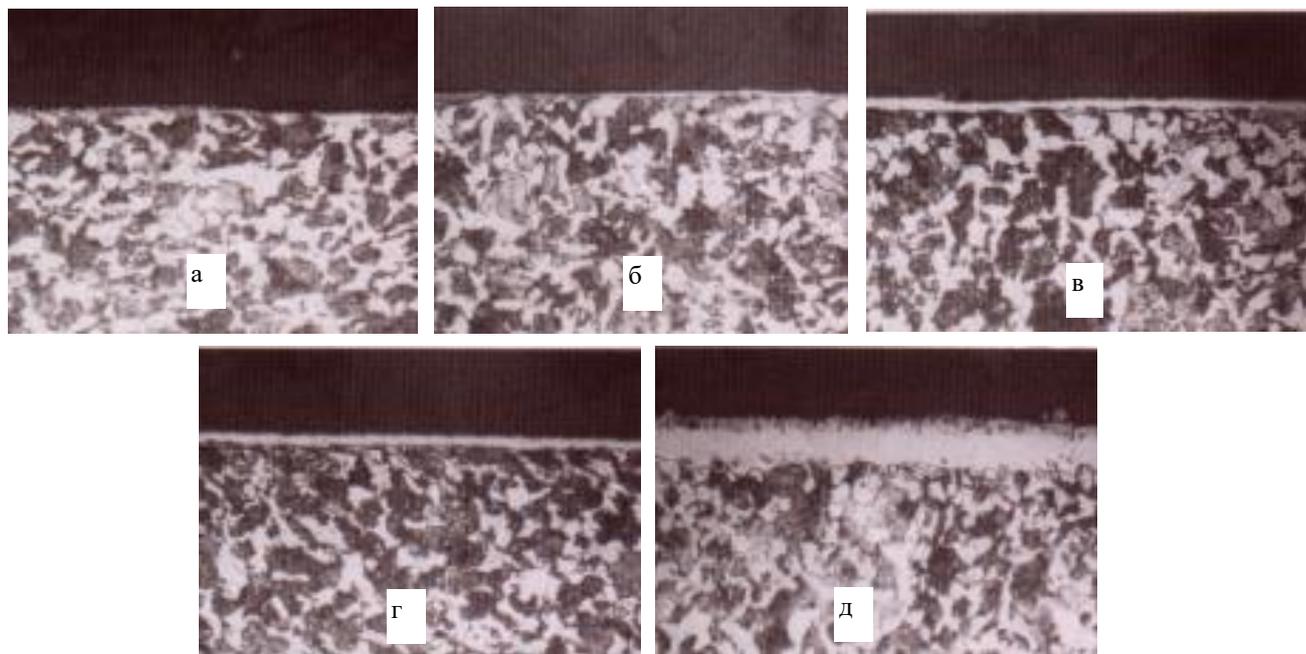


Рис. 1 – Динамика роста азотированных слоев во времени (570^oC):

a – 3 мин, $y_{\alpha}=100$ мкм, $y_{\gamma'}=0$ мкм; *б* – 15 мин, $y_{\alpha}=225$ мкм, $y_{\gamma'}=1$ мкм; *в* – 25 мин, $y_{\alpha}=290$ мкм, $y_{\gamma'}=3$ мкм;
г – 35 мин, $y_{\alpha}=350$ мкм, $y_{\gamma'}=5$ мкм; *д* – 90 мин, $y_{\alpha}=550$ мкм, $y_{\gamma'}=25$ мкм

Таким образом, с появлением на поверхности новой фазы, более богатой по азоту, рост предыдущей фазы замедляется. Этот факт находится в полном соответствии с величинами коэффициентов диффузии в α -твердом растворе и γ' фазе. На обрабатываемой поверхности устанавливается равновесие в соответствии с ее реакционной способностью между обрабатываемым металлом и средой, а на границе раздела нитрида γ' и α -твердого раствора устанавливается равновесие в соответствии с концентрационными значениями диаграммы состояния Fe – N. При этом равновесие на этой границе с течением времени практически не изменяется при любой технологии азотирования (Рисунок 2). Последующий рост α -твердого раствора и γ' фазы подчиняется параболической закономерности.

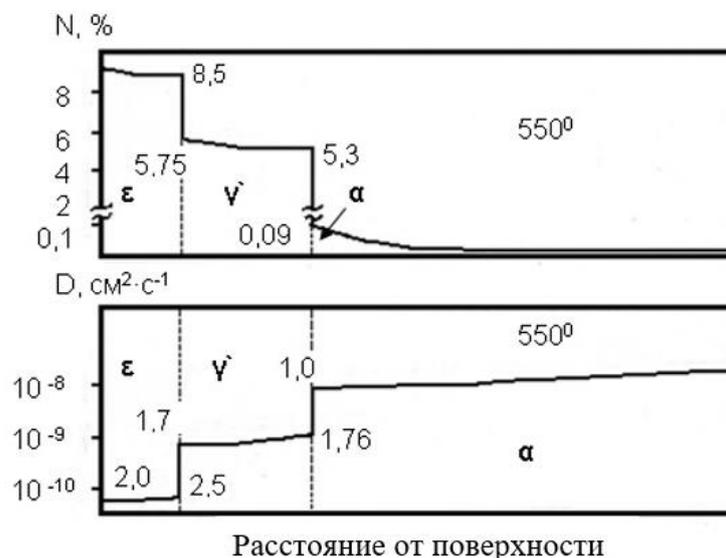


Рис. 2 – Концентрационное распределение азота на границах раздела фаз азотированного слоя и значения коэффициентов диффузии в фазах при 550^oC

Принимая во внимание не изменяющийся характер концентрации азота на границах раздела фаз для описания кинетики их роста нами предложена экспериментальная характеристика, названная кинетическим коэффициентом (D), который находится из выражения параболической закономерности роста фаз:

$$y = D\sqrt{\tau} \quad (1)$$

где y – толщина конкретной фазы азотированного слоя; τ – продолжительность процесса, D – кинетический коэффициент.

По нашему мнению, этот кинетический коэффициент (D), который в ряде работ называется эффективным коэффициентом диффузии [4], [6], интегрально и косвенно отражает совокупность следующих процессов и характеристик:

- процессы, протекающие в среде обработки и степень стабильности реакций массопереноса;
- процессы, протекающие на поверхности обрабатываемого металла и ее реакционную способность в конкретной среде;
- структурное состояние металла основы и его фазовый состав;
- коэффициент диффузии и свойства взаимодействующих элементов (атомные радиусы, кристаллические решетки, тип взаимодействия и т.п.).

На основании проведенных экспериментов по азотированию технического железа в различных средах были получены значения кинетических коэффициентов роста фаз при технологически обоснованной продолжительности, которые с учетом температурной зависимости приведены к единым температурным условиям (Таблица 1).

Все эксперименты проводились при температурах 500 – 590°C, продолжительность процессов была выбрана с учетом получения технологически приемлемой толщины покрытия. Исследование изменений кинетического коэффициента в зависимости от температуры проведения азотирования позволили аппроксимировать полученные зависимости и рассчитать приведенные значения.

Таблица 1 – Значения приведенных кинетических коэффициентов роста фаз азотированных слоев в различных средах

№ п/п	Вид процесса насыщения	Время обработки, ч	Приведенный кинетический коэффициент $D_{(\varepsilon+\gamma)'}^{500}$	Приведенный кинетический коэффициент D_{α}^{500}
1	Расплавы солей цианатов Na и K	1,5	7,0	500
2	Газобарический процесс (герметизированные контейнеры)	1,5	3,0	285
3	Газовое ионное азотирование в аммиачной среде	4	7,0	275
4	Насыщение из порошковых смесей	4	3,0	260
5	Насыщение из газовой аммиачной среды (NH ₃ +N ₂ +H ₂)	5	7,0	235

Эта зависимость в интервале 500 – 590°C рассчитывается по следующим формулам (2-3):

$$D_{\alpha}^T = K_{\alpha} * D_{\alpha}^{500} \quad (2)$$

где $K_{\alpha} = 0,2281e^{0,0029T}$;

$$D_{\gamma'+\varepsilon}^T = K_{\gamma'+\varepsilon} * D_{\gamma'+\varepsilon}^{500} \quad (3)$$

где $K_{\gamma'+\varepsilon} = 0,0059e^{0,0102T}$; T - задаваемая температура, °C.

Расчет кинетического коэффициента для слоя нитридов проводился без разделения γ' и ε фаз. Таким образом, имея приведенное значение кинетического коэффициента можно рассчитать его величину при других температурах в исследованном интервале.

Важным моментом моделирования кинетического коэффициента является степень его изменения от продолжительности обработки. То есть закономерность роста фаз слоя полностью не подчиняется параболической зависимости ($\sqrt{\tau}$), вследствие сложности процессов на границах фаз, а для α -твердого раствора дополнительно связана с дисперсным выделением нитридов, требующих для своего образования некоторого количества атомов азота. Наиболее удобным, по нашему мнению, эту степень снижения кинетического коэффициента выразить в процентах (%) по отношению к его приведенному значению, а поправку в модель вводить после расчета толщины фаз слоя по параболической зависимости. В данном случае процентное снижение коэффициента во времени не зависит ни от марки стали, ни от технологических составов конкретного процесса.

В частности, при увеличении продолжительности процесса кинетический коэффициент для α – твердого раствора снижается в большей степени в жидкой среде, в которой его значение выше, и в меньшей степени - для газовых процессов. Отсюда вытекает и технологическая продолжительность азотирования в рассматриваемых средах.

Аппроксимация зависимостей изменения кинетического коэффициента роста α -слоя от продолжительности процесса (в %) при температурах $<590^\circ\text{C}$ при азотировании технического железа в разных средах привела к следующим формулам (4 - 6):

- при ионном азотировании –

$$D_{\alpha}^{\tau} = -476\tau^3 + 0,835\tau^2 - 5,5378\tau + 104,43; R^2 = 0,995 \quad (4)$$

- при газовом азотировании в аммиачных средах –

$$D_{\alpha}^{\tau} = -0,007\tau^2 - 0,2718\tau + 99,729; R^2 = 0,9968 \quad (5)$$

- при азотировании в расплавах солей –

$$D_{\alpha}^{\tau} = -4,8188\tau + 102,75; R^2 = 0,9898 \quad (6)$$

где R^2 – достоверность аппроксимации;

τ – продолжительность азотирования.

Поскольку азотированию подвергаются всевозможные конструкционные стали с различным содержанием углерода и легирующих элементов, поэтому следующим этапом работы явилось исследование влияния легирующих элементов на толщину азотированного слоя. Для этого использовались как стандартные конструкционные стали, так и специально выплавленные сплавы с переменным содержанием одного из легирующих элементов.

Анализ полученных результатов и аппроксимация зависимостей привели к получению формул влияния процентного содержания легирующих элементов на толщины фаз азотированного слоя (Таблицы 2, 3). Расчет толщины для слоя нитридов проводился без разделения γ' и ϵ фаз.

Таблица 2 – Расчетные формулы влияния содержания легирующих элементов на толщину слоя нитридов $\gamma' + \epsilon$.

№ п/п	Легирующий элемент	Формула влияния
1	Mn	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,2215x^2 - 2,4494x + 42,343$
2	Ni	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,6866x^2 - 8,0185x + 41,605$
3	Cr	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,4203x^2 - 4,5995x + 41,741$
4	Mo	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,8375x^2 - 9,8022x + 40,642$
5	W	$y_{\epsilon+\gamma'} = 2,4685x^2 - 19,551x + 42,174$
6	Cu	$y_{\epsilon+\gamma'} = 30,105x^3 - 74,85x^2 + 38,462x + 42,141$
7	Zn	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,2538x^3 - 2,2727x^2 + 1,4662x + 42,361$
8	Zr (Nb)	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,6563x^2 - 9,2641x + 41,412$
9	V	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,098x^4 - 1,4711x^3 + 8,2607x^2 - 23,699x + 41,662$
10	Ti	$y_{\epsilon+\gamma'} = 0,1442x^2 - 2,3697x + 42,099$
11	Al	$y_{\epsilon+\gamma'} = -0,1774x^3 + 2,0755x^2 - 8,6316x + 41,057$
12	C	$y_{\epsilon+\gamma'} = -0,112x^3 + 1,9455x^2 - 12,465x + 41,857$

Расчет толщины слоя при содержании нескольких легирующих элементов проводится либо путем последовательного учета влияния каждого элемента ($K_i^{л.э.}$), либо одновременным расчетом.

Общая формула расчета имеет вид:

$$y_{стали} = y_0 \prod_{i=1}^n K_i^{л.э.} \quad (7)$$

где $K_i^{л.э.} = \frac{y_{i(л.э.)}}{y_0}$;

тогда

$$y_{стали} = \prod_{i=1}^n y_{i(л.э.)} / y_0^{n-1} \quad (8)$$

где y_0 – толщина слоя на железе, определенная либо путем решения уравнений Фика, либо экспериментальным путем из результатов в определенных условиях и получением приведенного кинетического коэффициента;

n – число легирующих элементов в стали; $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Таблица 3 – Расчетные формулы влияния содержания легирующих элементов на толщину α – слоя

№ п/п	Легирующий элемент	Формула влияния
1	Si	$y_{\alpha} = -0.2727x^3 + 6.2541x^2 - 57.321x + 606.52$
2	Cr (Nb)	$y_{\alpha} = 0.1779x^4 - 2.5888x^3 + 16.366x^2 - 94.511x + 609.62$
3	Mn	$y_{\alpha} = -0.4476x^3 + 9.2311x^2 - 75.152x + 603.39$
4	Mo	$y_{\alpha} = 4.5877x^4 - 43.175x^3 + 146.9x^2 - 277.55x + 605.33$
5	W	$y_{\alpha} = 126.81x^6 - 959.01x^5 + 2758.5x^4 - 3775.4x^3 + 2535.8x^2 - 915.24x + 602.96$
6	C	$y_{\alpha} = 1.925x^4 - 27.808x^3 + 141.31x^2 - 321.75x + 603.18$
7	Al	$y_{\alpha} = -1.0153x^5 + 17.481x^4 - 112.32x^3 + 335.94x^2 - 500.05x + 607.45$
8	V	$y_{\alpha} = 0.2189x^4 - 3.176x^3 + 19.399x^2 - 102.34x + 609.12$
9	Ti (Zr)	$y_{\alpha} = -1.026x^5 + 17.813x^4 - 115.63x^3 + 350.11x^2 - 525.51x + 607.36$
10	Cu (Zn)	$y_{\alpha} = -0.2746x^3 + 3.91x^2 - 52.012x + 609.7$
11	Ni	$y_{\alpha} = 0.9724x^4 - 13.808x^3 + 68.541x^2 - 157.3x + 605.79$
12	S	$y_{\alpha} = -0.338x^3 + 3.8942x^2 - 28.897x + 607.25$
13	P	$y_{\alpha} = -0.3397x^3 + 4.3806x^2 - 40.739x + 607.25$

Результаты и обсуждения

В работе экспериментально установлена последовательность образования фаз азотированного слоя и показано, что образование на поверхности сплошного слоя последующей фазы тормозит рост предыдущей фазы. Этот факт играет существенную роль при кратковременной обработке. При длительных выдержках он нивелируется.

Принимая во внимание закономерности образования фаз слоя и граничные концентрации азота было сделано заключение об общности формирования фаз при любых технологических вариантах азотирования, что не нарушает физики процесса и позволяет прийти к разработке общей модели расчета. При этом учет особенностей разных технологий азотирования проводился путем использования приведенного кинетического коэффициента, который интегрально и косвенно отражает процессы в насыщающем пространстве, процессы на обрабатываемой поверхности и диффузионные процессы в обрабатываемом металле. Установленная закономерность изменения кинетического коэффициента от температуры и продолжительности обработки позволила проводить расчеты при любых значениях условий в рамках исследованных параметров. В конечном итоге это обеспечило повышение достоверности расчетных значений толщин фаз азотированных слоев.

В результате проведенных экспериментов, сравнения полученных результатов с расчетными и логических рассуждений сделано заключение, что наличие легирующих элементов оказывает одинаковое влияние на толщины слоя нитридов и α – твердого раствора при различных условиях протекания процесса. То есть на диффузионные процессы в твердом теле внешняя среда влияет только значением концентрации азота на поверхности, активируя тем самым процесс встречной диффузии элементов материала основы, имеющих большое сродство к азоту. А это влияние уже учтено кинетическим коэффициентом. То есть предлагаемые формулы по влиянию легирующих элементов на толщины фаз слоя в соответствии с принципом подобия [9] применимы при расчете толщин слоев для любых технологических вариантов проведения процесса азотирования. Это стало возможным только при использовании приведенного кинетического коэффициента для каждого вида обработки.

При расчете толщины слоя нитридов и α – твердого раствора в зависимости от процентного содержания легирующих элементов было показано, что ошибка расчетных величин по отношению к экспериментальным составляет не более 9 %, что меньше, даже разницы расчетных и экспериментальных данных, вносимых колебаниями химического состава в обрабатываемых сталях (Таблица 4).

Таблица 4 – Достоверность расчетных результатов

Марка стали	Толщина α -слоя экспериментальная, мкм	Толщина α -слоя расчетная, мкм	Погрешность, %
10	650	620	4,6
35	550	528	4,0
80	500	520	4,0
35ХГМ	400	430	7,5
30Х2МНЮА	400	414	3,5
25ГФС	480	471	1,9
40Х5МФС	160	157	1,8
X	400	430	7,5
30Х3М	385	350	9,2
35Х2Н4М	350	325	7,1
35ХГН2	400	419	4,7
A45Г2	500	481	3,8
AC15Г	650	620	4,6

Контрольные эксперименты (соляная ванна, содержащая 38 % CNO^- , 570°C ; 1,5 ч.) и расчет толщины слоя α – твердого раствора проводился по среднему содержанию легирующих элементов в сталях, в соответствии со справочными данными. Рассчитанная толщина α – твердого раствора не только определяет эффективность технологического процесса азотирования, но и может успешно применяться для расчета распределения азота в слое и расчета твердости [10].

Заключение

Результатом данной работы явилось создание математической модели расчета толщин фаз азотированного слоя, в том числе при наличии в стали легирующих элементов, обеспечивающая более высокую достоверность по сравнению с ранее разработанными методиками. Важным этапом работы является экспериментальное определение порядка образования фаз азотированного слоя и определение величин кинетических коэффициентов при различных способах насыщения. Эти кинетические коэффициенты интегрально связывают процессы, протекающие в насыщающей среде, на обрабатываемой поверхности и в обрабатываемом материале.

При расчете толщины азотированного слоя в зависимости от процентного содержания легирующих элементов, ошибка расчетной величины по отношению к экспериментальной составляет не более 9%, что меньше, чем влияние колебания химического состава в обрабатываемых сплавах на толщину слоя, и является приемлемым для осуществления предварительного расчета.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов – М.: Metallurgiya, 1985. – 256 с.
2. Лахтин Ю.М. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Х.Й. Шпис и др. – М.: Metallurgiya, 1991. – 320 с.
3. Mittemeijer E.J. Thermodynamics, kinetics and process control of nitriding. / E.J. Mittemeijer, M.A.J Somers // Surface Engineering. – 1997. – 13. – p. 483-497.
4. Torchan L. Control of nitride layers growth kinetics in the binary Fe-N system. / L. Torchan, P. Bilger, J. Dulcy et al. // Metall. Trans.. – 1996. – 27. – p. 1823-1835.
5. Torchan L., Bilger P., Dulcy J., Gantois M. “Application of a mathematical model of iron nitride layer growth during gas phase nitriding”. Proceeding of the Second ASM Heat Treatment and Surface Engineering. Dortmund (Germany), 1-3 June 1993
6. Ratajski J. Model of growth kinetics of nitride layers in the binary Fe – N system. //Nitriding technology. Proceedings the 9th international seminar. Warsaw, Poland 2003. P. 149-159.
7. Крукович М.Г. Моделирование процесса азотирования. / М.Г. Крукович // МиТОМ. – 2004. – 1. – с. 24-31.
8. Зинченко В.М. Азотный потенциал / В.М. Зинченко, В.Я. Сыропятов, Б.А. Прусаков и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 71 с.
9. Крукович М.Г. Применение принципа подобия при моделировании кинетики роста азотированных слоев на сталях. / М.Г. Крукович, А.Д. Федотова // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2019. – 30. – с. 55-60.
10. Крукович М.Г. Эмпирическое моделирование распределения твердости α - твердого раствора азотированного слоя. / М.Г. Крукович, А.Д. Федотова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – 12-1 (102). – с. 38-42.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Laxtin Yu.M. Ximiko-termicheskaya obrabotka metallov [Chemical heat treatment of metals] / Yu.M. Laxtin, B.N. Arzamasov – М.: Metallurgiya, 1985. – 256 p. [in Russian]
2. Laxtin Yu.M. Teoriya i texnologiya azotirovaniya [Theory and technology of nitriding] / Yu.M. Laxtin, Ya.D. Kogan, X.J. Shpis et al. – М.: Metallurgiya, 1991. – 320 p. [in Russian]
3. Mittemeijer E.J. Thermodynamics, kinetics and process control of nitriding. / E.J. Mittemeijer, M.A.J Somers // Surface Engineering. – 1997. – 13. – p. 483-497.
4. Torchan L. Control of nitride layers growth kinetics in the binary Fe-N system. / L. Torchan, P. Bilger, J. Dulcy et al. // Metall. Trans.. – 1996. – 27. – p. 1823-1835.
5. Torchan L., Bilger P., Dulcy J., Gantois M. “Application of a mathematical model of iron nitride layer growth during gas phase nitriding”. Proceeding of the Second ASM Heat Treatment and Surface Engineering. Dortmund (Germany), 1-3 June 1993
6. Ratajski J. Model of growth kinetics of nitride layers in the binary Fe – N system. //Nitriding technology. Proceedings the 9th international seminar. Warsaw, Poland 2003. P. 149-159.
7. Krukovich M.G. Modelirovanie processa azotirovaniya [Modeling the nitriding process]. / M.G. Krukovich // MiTOM [MiTOM]. – 2004. – 1. – p. 24-31. [in Russian]
8. Zinchenko V.M. Azotnyj potencial [Nitrogen potential] / V.M. Zinchenko, V.Ya. Sy'ropyatov, B.A. Prusakov et al. – М.: Mashinostroenie, 2003. – 71 p. [in Russian]
9. Krukovich M.G. Primenenie principa podobiya pri modelirovanii kinetiki rosta azotirovanny'x sloev na stalyax [Application of the principle of similarity in modeling the kinetics of growth of nitrided layers on steels]. / M.G. Krukovich, A.D. Fedotova // Novy'e materialy' i texnologii v mashinostroenii [New materials and technologies in mechanical engineering]. – 2019. – 30. – p. 55-60. [in Russian]
10. Krukovich M.G. E'mpiricheskoe modelirovanie raspredeleniya tverdsti α - tverdogo rastvora azotirovannogo sloya [Empirical modeling of hardness distribution of α - solid solution of a nitrided layer]. / M.G. Krukovich, A.D. Fedotova // Mezhdunarodny'j nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International research journal]. – 2020. – 12-1 (102). – p. 38-42. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.017>

**«КЛАСТЕР» КАК НОВАЯ ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ ФОРМА АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Научная статья

Сазыкина Е.В.*

ORCID: 0000-0002-3575-3710,

Московский Архитектурный Институт, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (1991elena[at]gmail.com)

Аннотация

В статье предлагается использование определения «кластер» для обозначения новой разновидности архитектурного объекта – многофункционального комплекса, включающего производственную составляющую. Кластер позиционируется как архитектурно-типологический ответ на выявленное стремление современного производства к объединению с другими функциями. Эта тенденция обусловлена как некоторыми технологическими особенностями современного производства, так и необходимостью изменения социального восприятия объектов промышленности. Автор обосновывается выбором предлагаемого термина, а также подтверждается эффективность подобных структур как формы пространственной организации современной промышленности. Приводится общая структура функционального состава кластера и формы его производственных элементов.

Ключевые слова: кластер, промышленная архитектура, многофункциональный комплекс, реиндустриализация, проектирование промышленных предприятий.

**"CLUSTER" AS A NEW TYPOLOGICAL FORM OF ARCHITECTURAL AND SPATIAL ORGANIZATION
OF INDUSTRIAL ACTIVITY**

Research article

Sazykina E.V.*

ORCID: 0000-0002-3575-3710,

Moscow Architectural Institute, Moscow, Russia

* Corresponding author (1991elena[at]gmail.com)

Abstract

The article suggests the use of the term "cluster" to designate a new kind of architectural object - a multifunctional complex that includes a production component. A cluster is positioned as an architectural and typological response to the revealed desire of modern production to combine with other functions. This trend is due to some technological features of modern production, as well as the need to change the social perception of industrial facilities. The author substantiates the choice of the proposed term, and also confirms the effectiveness of such structures as a form of the spatial organization of modern industry. The article also provides the general structure of the functional composition of the cluster and the forms of its production elements.

Keywords: cluster, industrial architecture, multifunctional complex, reindustrialization, design of industrial enterprises.

В последнее десятилетие наше государство проводит политику, направленную на активную поддержку промышленного сектора. Программа импортозамещения, начатая еще в 2014 году [6], является одним из конкретных шагов, предпринятых правительством для формирования Россией собственной мощной производственной базы. Необходимость индустриального развития страны непосредственно связана с наращиванием военных мощностей и обозначившейся потребностью самообеспечения государства. Рост обрабатывающих отраслей промышленности должен сбалансировать уже сложившуюся экономику с мощным добывающим сектором и является в настоящее время необходимым условием развития структуры современной индустрии.

Данная политика коррелирует с идеями реиндустриализации [1], [3], которые становятся все более популярными в развитых странах. При этом современные передовые производства стремятся подчеркнуть свое отличие от промышленности конца XX века как в технологическом, так и в социальном аспектах. Нужно заметить, что это находит отражение даже в области терминологии.

Понятие «реиндустриализация» нередко заменяют на «неоиндустриализация», стараясь подчеркнуть таким определением новый характер организации промышленности. Уже прочно вошли в обиход понятия «технопарк», «индустриальный парк», в которых за счет лексической составляющей «парк» акцентируется экологичность и безопасность производственного процесса [8].

Сегодня промышленность ищет новые возможные формы интеграции в пространство жизнедеятельности человека, которые соответствовали бы существующим представлениям о комфортной и здоровой среде.

Анализируя опыт проектирования современных промышленных объектов, можно заметить в их архитектурных решениях тяготение к объединению производственных структур с другими функциональными элементами. Таким образом, современное производство начинает проектироваться не как самостоятельный элемент, но как составная часть многофункционального объекта. В частности, структуры технопарков, получившие сейчас широкое распространение, являются отличным примером объединения научной, лабораторной и производственной деятельности.

Проиллюстрировать описанную тенденцию объединения промышленности с другими функциональными элементами можно проектом, разработанным компанией SPARK Architects для Сингапура [10], в котором в единой структуре соединены агропромышленный и жилой комплексы, дополненные общественными и торговыми зонами. При

этом жилье позиционируется в качестве социального, рассчитанного на пенсионеров, а работа на фермах агрокомплекса предлагается жителям, с одной стороны, как вариант досуга, а с другой, как возможность дополнительного заработка.



Рис. 1 – Жилой агрокомплекс по проекту компании SPARK Architects, Сингапур

Хорошо известен проект мусороперерабатывающего завода Amager Bakke в Копенгагене [9], созданный архитектурным бюро BIG и открытый в 2017 году. Здесь промышленный объект совмещен со спортивным комплексом, включающим горнолыжный склон и зону для скалолазания.

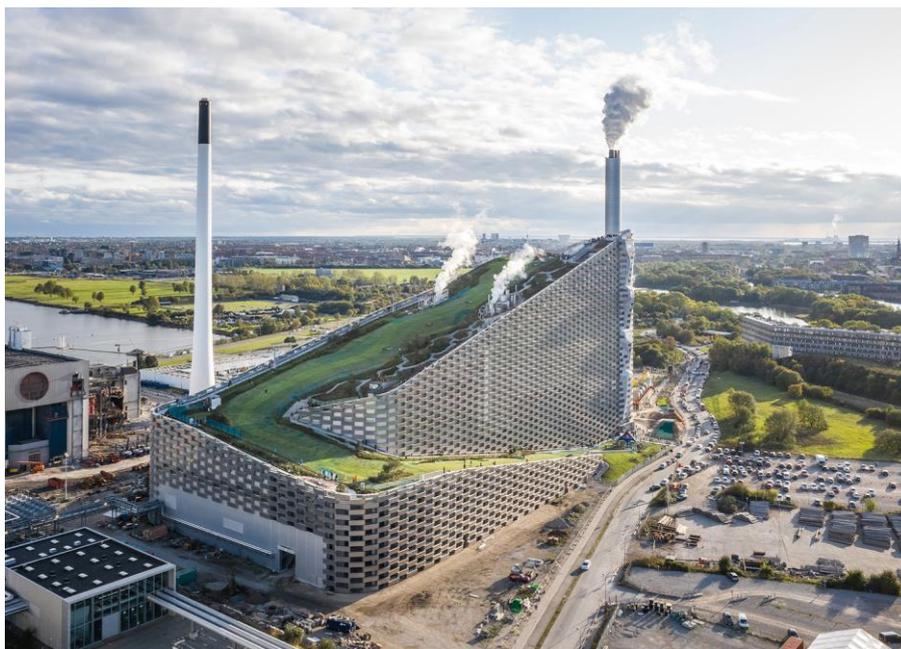


Рис. 2 – Мусоросжигательный завод Amager Bakke с горнолыжным спуском на кровле, Копенгаген, Дания

Подобные многофункциональные структуры не вписываются в сложившуюся архитектурно-строительную типологию [2]. Автором статьи предлагается ввести понятие «кластер» для обозначения новой разновидности объекта – МФК (многофункционального комплекса), имеющего производственную составляющую.

Границы понятия «кластер» достаточно широки, не существует его однозначного и строгого определения [7]. Само слово происходит от английского “cluster” – рой, скопление, группа и используется во многих областях.

Данный термин начинает широко использоваться с 90-х годов XX века преимущественно в области экономики. Майкл Портер, основоположник теории кластеров, описывает их как группу взаимосвязанных компаний, поставщиков услуг, фирм в родственных областях, а также связанных с их деятельностью организаций (это могут быть университеты, торговые объединения, агентства по стандартизации), ведущих совместную работу, которая при этом не исключает возможности конкуренции [5]. В контексте данной формулировки кластеры могут включать в себя компании «готового» продукта или сервиса; поставщиков специализированных факторов производства, комплектующих изделий, механизмов, сервисных услуг; финансовые институты; фирмы в сопутствующих отраслях; фирмы, работающие с каналами сбыта и потребления; производителей побочных продуктов; специализированные инфраструктуры; организации, обеспечивающие специальное обучение, образование, поступление информации, проведение исследований и предоставляющие техническую поддержку; предпринимательские объединения.

По смысловому содержанию, для определения, предлагаемого автором статьи, наиболее соответствующей является терминология итальянской экономической школы, где понятие «кластер» вытекает из определения индустриального района [7]. В. П. Третьяк в своей книге «Кластеры предприятий» предоставляет такое определение: «Многофункциональный комплекс, объединяющий сконцентрированную на некоторой территории группу взаимосвязанных организаций и предприятий, включающую сеть поставщиков продукции, комплектующих, специализированных услуг, производителей, потребителей, элементов инфраструктуры, исследовательских институтов, органов местной власти и иных организаций, а также объектов жилого, рекреационного и обслуживающего назначения, взаимодополняющих друг друга и усиливающих конкурентные преимущества отдельных компаний и кластера в целом».

Кластер как архитектурно-типологический объект в соответствии с предложением автора обозначит форму развития многофункциональных структур, в которых в едином планировочном решении сочетаются производственные объекты с иными видами деятельности человека.

Эффективность архитектурно-пространственной организации производства в формате кластера связана, с одной стороны, с возможными пространственным объединением различных сфер жизнедеятельности человека, что подразумевает экономное использование территории, инфраструктуры, транспортных сетей, инженерных коммуникаций, энергетики и т.д. С другой стороны, это способствует повышению «открытости» и демократичности производственной деятельности в ее социальном аспекте и позиционирует промышленность как экологически нейтральный объект, который может пространственно близко существовать с другими функциями и видами деятельности человека.

В Таблице 1 представлена обобщенная структура функционального состава кластера. Принципиально она делится на две основные части: производственную и дополнительную. Первая включает площади и помещения производственной деятельности и процессов, ему сопутствующих. Вторая отражает спектр возможного дополнительного функционального наполнения кластера.

Таблица 1 – Общая структура функционального состава кластера

Функциональный состав кластера	1. Производственная часть	1.1 Производственная группа	Производственные цеха	Специализированные цеха (механосборочные, пищевые, прядильные, ткацкие и т.д.)
				Универсальные производственные площади
			Производственно-вспомогательные помещения	Цеха подсобно-вспомогательных производств (ремонтно-механические, электроремонтные, тарные)
				Инженерное обеспечение (насосные, сортировочные станции, авторемонтные мастерские)
				Очистные сооружения
				Энергетические объекты
		1.2 Обслуживающая группа (объекты, сопутствующие производственному процессу)	Деловая группа помещений	Помещения административно-деловой функции (офисные, конторские, банковские)
				Помещения органов управления
			Хозяйственная группа помещений	Медицинские и лечебно-оздоровительные помещения
				Технические и бытовые помещения (пункты охраны, бытовые услуги, ремонтные предприятия)
			Сопутствующие объекты	Помещения микропредприятий (галантерейные, пошивочные, обувные, кондитерские, полиграфические)
				Площади универсального функционального назначения
				Складские помещения
Объекты коммунального и транспортного назначения	Гаражи, стоянки, депо			

Окончание таблицы 1 – Общая структура функционального состава кластера

Функциональный состав кластера	2. Дополнительная функциональная часть	2.1 Общественно-рекреационная группа	Досуговая и культурно-бытовая группа	Объекты общественного питания
				Культурно-просветительские объекты (кинотеатры, клубы, досуговые центры)
				Выставочные помещения
				Спортивные объекты
			Учебно-образовательная группа	Помещения детских начальных образовательных учреждений
				Помещения классов, училищ, курсов повышения квалификации
			Научно-техническая группа	Помещения институтов, НИИ
				Лабораторные помещения
			Торговая группа	Крупные торговые предприятия (ТЦ, супермаркеты, рынки)
				Небольшие торговые точки (минимаркеты, бутики, киоски)
		2.2 Жилая группа	Индивидуальный жилой дом	Общежития
			Многоквартирный дом	
			Временное жилье (гостиничного типа)	
			Жилье специализированного типа	
		2.3 Группа открытых рекреационных пространств и озеленения	Рекреационная группа	Детские площадки
				Открытые спортивные площадки
				Открытые сцены
			Озеленение и ландшафтный дизайн	Парки, скверы
				Малые архитектурные формы

Рассматривая существующий опыт проектирования и строительства, можно заметить большое разнообразие структур, подходящих под определение кластера. Причем значимость производственной составляющей в качестве их пространственного элемента может заметно варьироваться.

Формы производственных элементов кластера можно представить следующим образом:

- производственное помещение (или пространство, состоящее из нескольких помещений) в составе здания;
- производственный этаж (или несколько этажей) в составе здания;
- отдельно стоящее здание в составе комплекса;
- группа зданий и сооружений в составе комплекса.

Производство при этом может быть как основной функцией, так и дополнительной.

Структура таких объектов учитывает характер современного производства и общества. Однако в настоящий момент возрождение индустрии в принципиально новом формате, соответствующем духу неоиндустриализации, еще не достигло достаточного масштаба, чтобы можно было провести полноценную классификацию кластеров на примере реальной проектной практики. Новые тенденции в промышленной архитектуре только начинают складываться, не носят массовый характер и проявляются в отдельно взятых проектах.

Однако на примере студенческих курсовых и дипломных работ, выполненных на кафедре «Архитектура промышленных сооружений» Московского Архитектурного Института (государственной академии), можно провести следующую классификацию структур, соответствующих определению кластера:

- автономные кластеры, расположенные в экстремальных условиях;
- кластеры, объединяющие инновационное производство с научно-образовательной и коммерческой деятельностью (технопарки, бизнес инкубаторы);
- кластеры, основанные на перепрофилировании существующих промышленных территорий;
- кластеры, ориентированные на определенную категорию населения.

Заключение

Обобщив все вышесказанное, можно сделать вывод о том, что кластер как новая разновидность архитектурного объекта (т.е. МФК, объединяющий группу организаций и предприятий и включающий промышленную составляющую, дополненную полезными для городской среды функциями) является архитектурно-типологическим ответом на стремление современного производства к пространственному объединению с другими видами деятельности человека.

Безусловно, проектирование такого рода объектов столкнется с необходимостью модификации существующей нормативной базы. Но совершенствование технологической составляющей производственного процесса уже сейчас позволяет минимизировать санитарно-защитную зону, что дает возможность пространственно внедрить определенные виды производств в многофункциональные структуры.

Предлагаемая автором форма интеграции промышленности в городскую среду является взглядом, описывающим потенциально вероятное развитие промышленной архитектуры, с учетом экономических характеристик современного производства и социальных особенностей общества.

Очевидно, что архитектурно-пространственному выражению новых тенденций должны предшествовать, в первую очередь, изменения материально-технической базы производства, сопровождаемые корректировками нормативно-правовой документации.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Акаев, А. А. Технологическая модернизация промышленности и инновационное развитие – ключ к экономическому возрождению России в XXI веке / А. А. Акаев, И. Е. Ануфриев, Г. Н. Попов // Инновации. – 2010. – № 11. – С. 15-28.
2. Архитектурная типология промышленных предприятий / под ред. И. С. Николаева. – Москва: Стройиздат, 1975. – 320 с. – Текст : непосредственный.
3. Интеграция производства, науки и образования и реиндустриализация российской экономики: сборник материалов Международного конгресса «Возрождение производства, науки и образования в России: вызовы и решения» / под общ. ред. С. Д. Бодрунова. – Москва : ЛЕНАНД, 2015. – 464 с.
4. Куприянов, С. В. Кластер как форма организации и современного развития промышленности (теория и методология) : монография / С. В. Куприянов, Е. А. Стрябкова. – Белгород : изд-во БГТУ, 2007. – 97 с.
5. Портер, М. Конкуренция / М. Портер; пер. с англ. О. Л. Пелявский, Е. Л. Усенко, И. А. Шишкина, ред. Я. В. Заболотский. – Москва : Вильямс, 2001. – 608 с.
6. Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности : постановление от 15 апреля 2014 года № 328. – Москва : [б. и.], 2014. – 167 с.
7. Третьяк, В. П. Кластеры предприятий / В. П. Третьяк. –Изд. 2-е, доп. – Иркутск : Изд-во Балт. Гос. Ун-та экономики и права, 2006. – 219 с. – Текст : непосредственный.
8. Черкасов, Г. Н. Социокультурные аспекты развития промышленной архитектуры / Г. Н. Черкасов, М. М. Кабаева. // Academia. Архитектура и строительство. - 2011. - №4. - С. 18-30. : цв. ил.
9. Amager Ressource Center. – [Electronic resource]. – URL : <https://www.a-r-c.dk/> (accessed: 03.03.2020).
10. Sparkarchitects.com // Portfolio. – Homefarm. – [Electronic resource]. – URL : http://sparkarchitects.com/portfolio_page/homefarm/ (accessed: 03.03.2020).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Akaev, A. A. Technologischeskaya modernizatsiya promychlennosti i innovazionnoe razvitiye – klusch k vozrogdeniju Rossii v XXI veke [The technological modernization of industry and the innovative development as a key of the russian economic revival in the XXI century] / A. A. Akaev, I. E. Anufriev, G. N. Popov. // Innovazii. – 2010. – № 11. – P. 15-28. [in Russian]
2. Arhitekturnaja tipologija promichlennyh predpriyatij [Architectural typology of industrial enterprises] / ed. I. S. Nikolaev. – Moscow: Stroyizdat, 1975. – 320 p. . [in Russian]
3. Integratsia proizvodstva, nauki i obrazovania i reindustrialisatsia rossijskoi ekonomiki: sbornik materialov Mejdunarodnogo kongressa “Vozrojdienie proizvodstva, nauki i obrazovanija v Rossii: vyzovy i rechenija [Integration of production, science and education and the reindustrialization of Russian economy: materials collection of the International Congress "Revival of production, science and education in Russia: challenges and solutions"] / ed. S. D. Bodrunova. – Moscow : LENAND, 2015. – 464 p. . [in Russian]
4. Kupriyanov, S. V. Klaster kak forma organisatsii i sovremennogo razvitija promichlennosti (teoria i metodologija) [Cluster as a form of organization and modern industrial development (theory and methodology)] : monograph / S. V. Kupriyanov, E. A. Stryabkova. – Belgorod : edition BSTU, 2007. – 97 p. . [in Russian]
5. Porter, M. Konkurentsija [Rivalry] / M. Porter; trans. from English O. L. Pelyavsky, E. L. Usenko, I. A. Shishkina, ed. Ya. V. Zabolotsky. – Moscow : Williams, 2001. – 608 p. . [in Russian]
6. Razvitie promichlennosti i povichenie ee konkurentnosposobnoti : postanovlenie ot 15 aprelija 2014 goda № 328. [Industrial development and its competitiveness increasing : the resolution of April 15, 2014 No. 328.] – Moscow : [without publ. h.], 2014. – 167 p. . [in Russian]
7. Tretyak, V. P. Klasterij predpriyatij [Clusters of enterprises] / V. P. Tretyak. –2nd edition, add. – Irkutsk : Publishing house of Balt. State University of Economics and Law 2006. – 219 p. [in Russian]
8. Cherkasov, G. N. Sotsiokulturnye aspekty razvitija promychlennoi arhitektury [Social and cultural of the industrial architecture development] / G. N. Cherkasov, M. M. Kabaeva. // Academia. Arhitektura i stroitelstvo. - 2011. - №4. - P. 18-30. : col. illustr. [in Russian]
9. Amager Ressource Center. – [Electronic resource]. – URL : <https://www.a-r-c.dk/> (accessed: 03.03.2020).
10. Sparkarchitects.com // Portfolio. – Homefarm. – [Electronic resource]. – URL : http://sparkarchitects.com/portfolio_page/homefarm/ (accessed: 03.03.2020).

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.018>

КОНСТРУИРОВАНИЕ ПЛИТ ДЛЯ ОБЛИЦОВКИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ

Научная статья

Арьков Д.П.^{1,*}, Сухов А.А.², Никифорова Д.Н.³, Антясова Е.А.⁴, Жихарев А.Г.⁵

¹ ORCID: 0000-0001-5675-351X;

² ORCID: 0000-0002-7600-752X;

³ ORCID: 0000-0002-7266-9796;

⁵ ORCID: 0000-0002-0039-0761;

^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук, Волгоград, Россия

* Корреспондирующий автор (arkov-d[at]vfanc.ru)

Аннотация

В работе рассмотрена возможность замены стальной напряженной арматуры в железобетонных канальных плитах на композитную стеклопластиковую. Стальная арматура в конструкциях со временем подвергается коррозии, теряет свойства, данные обстоятельства приводят к потере эксплуатационных свойств конструкции. Композитная арматура обладает рядом преимуществ перед стальной, однако есть и отрицательные свойства, например деформация стеклопластика составляет до 2,8%, а металла 25%. В этой связи актуальной является задача разработки и проверки теоретическим расчетом конструкций плит для облицовки оросительных каналов мелиоративных систем с использованием в качестве напряженной композитной неметаллической арматуры. На примере доказана возможность использования неметаллической композитной арматуры в качестве рабочей напряженной арматуры плиты канальной.

Ключевые слова водопроводящие сооружения, мелиоративные системы, расчёт на прочность, плиты, композитная арматура, напряжения.

CONSTRUCTION OF PLATES FOR LINING IRRIGATION CHANNELS OF RECLAMATION SYSTEMS USING COMPOSITE REINFORCEMENT

Research article

Arkov D.P.^{1,*}, Sukhov A.A.², Nikiforova D.N.⁴, Antyasova E.A.⁴, Zhikharev A.G.⁵

¹ ORCID: 0000-0001-5675-351X;

² ORCID: 0000-0002-7600-752X;

³ ORCID: 0000-0002-7266-9796;

⁵ ORCID: 0000-0002-0039-0761;

^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

* Corresponding author (arkov-d[at]vfanc.ru)

Abstract

The current article examines the possibility of replacing steel stressed reinforcement in reinforced concrete channel plates with composite fiberglass. Steel reinforcement in structures undergoes corrosion over time, loses properties, these circumstances lead to the loss of operational properties of structures. Composite reinforcement has a number of advantages over steel, but there are also negative properties, for example, the deformation of fiberglass is up to 2.8%, while metal is 25%. In this regard, the task of developing and testing by theoretical calculation of plate designs for lining irrigation channels of reclamation systems using non-metallic composite reinforcement as a stressed one can be considered urgent. The possibility of using non-metallic composite reinforcement as a working stressed reinforcement of a hollow-core slab is proved by example.

Keywords water supply structures, reclamation systems, strength calculation, plates, composite reinforcement, stresses.

Введение

Оросительные каналы выполняют важнейшую функцию системы полива, а именно транспортировку воды к орошаемым землям. Однако необходимо отметить, что оросительные каналы, построенные в 60-80 годы прошлого века, имеют высокий физический и моральный износ. Возрастающий износ каналов приводит к ежегодному увеличению затрат на текущий ремонт, что в свою очередь требует более совершенных и экономичных вариантов их восстановления [1].

Использование стальной арматуры регулируется ГОСТами и СНиПами, так как со временем она подвергается коррозии, её механические свойства снижаются, что в свою очередь приводит к потере эксплуатационных свойств конструкции. Арматура из композита не подвержена коррозии. Однако появление трещин в бетоне не является только следствием коррозии. При усилии на разрыв деформация стеклопластика составляет до 2,8%, а металла - 25%.

На сегодняшний день совершенствование конструкций для облицовки мелиоративных систем за счёт применения новых материалов – перспективная задача в области мелиорации. В этой связи актуальной является задача разработки и расчета конструкций плит для облицовки оросительных каналов мелиоративных систем и использованием в качестве напряженной композитной неметаллической арматуры.

Целью разработки новых типов плит для облицовки оросительных каналов мелиоративных систем являлось снижение их стоимости и увеличение несущей способности, на основе теоретического и экспериментального изучения их работы.

Возможность применения неметаллической композитной арматуры (НКА) в конструкциях ограничивается температурой стеклования полимерной матрицы (температурой, при которой полимерная матрица необратимо меняет свои физико-механические свойства). Температура стеклования для НКА зависит от типа матрицы и находится в диапазоне от 70 до 175 градусов [7], [8], [9]. Данная проблема не является актуальной для конструкций мелиоративных каналов.

Для НКА коэффициент надежности по материалу установлен только в европейских нормах. В итальянских нормах CNR-DT 203 установлено значение коэффициента $\gamma=1,5$ для расчетов по первому предельному состоянию и 1,0 для второго. В бюллетене fib и ModelCode 2010 предложено для первого предельного состояния принимать значение коэффициента надежности γ не менее 1,25. В нормах АСІ коэффициент γ_R как таковой отсутствует, однако нормативное (гарантированное производителем) значение определяется с обеспеченностью 0,9986 (3 σ), при этом дополнительно учитывается обобщенный коэффициент надежности (запаса) $\phi=0,5-0,7$.

Методы и принципы исследования

Для исследования возможности применения НКА рассмотрена плита марки ПКН60.20, форма и размеры плиты, а также её показатели материалоемкости приняты в соответствии с [2], [3], таблица 1.

Определение прочности и трещиностойкости плит по достижении бетоном прочности на сжатие в проектном возрасте выполняют нагружением по [4].

Таблица 1 – Показатели материалоемкости плиты ПКН60.20

Марка плиты	Основные размеры плиты, м				Расход материала		Масса плиты (справочная), т
	l	b	a_1	a_2	Бетон, м	Сталь, кг	
ПКН60.20	6000	2000	1250	1350	0,72	29,7	1,80

Бетон тяжелый класса В22,5 ($R_b = 12,5$ МПа), напрягаемая арматура класса Вр-II ($R_s = 1045$ МПа), 7 стержней в нижней части, 6 с веру.

Схема опирания и нагружения плиты при испытании ее нагружением приведена на рисунке 1 [5].

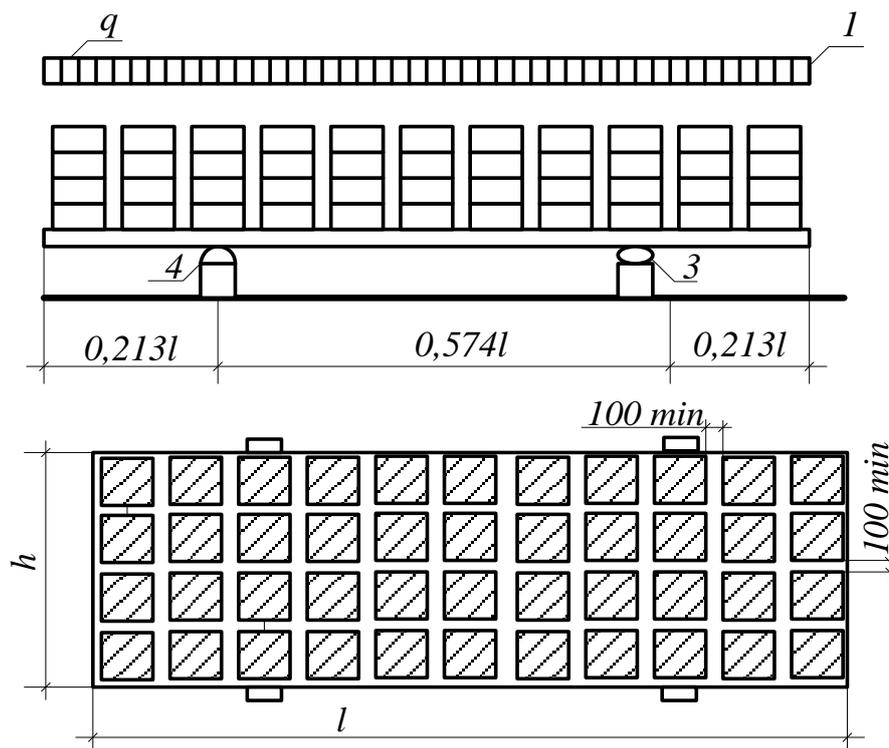


Рис. 1 – Схема нагружения плиты при испытании:
1 – теоретическая схема нагрузки; 2 – нагрузка; 3 – подвижная опора; 4 – неподвижная опора

Контрольная нагрузка при испытании плиты на прочность и трещиностойкость $q = 1,62$ кПа (165 кг/м²), нагрузка при определении ширины раскрытия трещин плиты равна 85% контрольной. Контрольная ширина раскрытия трещин при испытании плиты по трещиностойкости не должна превышать 0,2 мм. Положение стержней напрягаемой арматуры и арматурных каркасов представлено на рисунке 2.

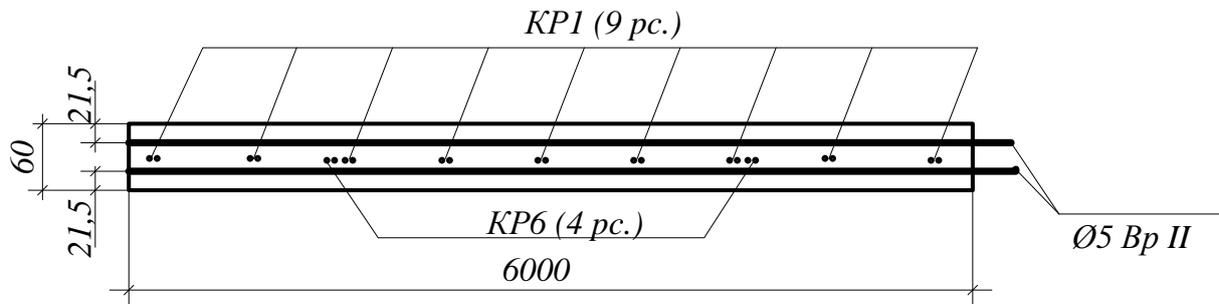


Рис. 2 – Армирование плиты ПКН60.20, продольный разрез

Спецификация и выборка напрягаемой арматуры на одну плиту приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Спецификация и выборка напрягаемой арматуры на одну плиту

Марка плиты	Позиция	Диаметр, мм	Длина, мм	Количество	Масса, кг	
					одной позиции	всего
ПКН60.20	I	5ВрII	6140	13	0,95	12,35

Напряжения в напрягаемой арматуре, контролируемые по окончании натяжения 804,1МПа. Для нахождения изгибающего момента и поперечной силы при расчёте необходимо учитывать собственный вес плиты, определяемый по формуле 1, где γ_b – удельный вес железобетона, b – длина плиты, h – ширина, γ_f – коэффициент надёжности по нагрузке.

$$q_{\text{constr}} = \gamma_b \times b \times h \times \gamma_f = 25 \text{ кН/м}^3 \times 2 \text{ м} \times 0,06 \text{ м} \times 1,1 = 3,3 \text{ кН/м} \quad (1)$$

Суммарная нагрузка на плиту будет определяться по формуле 2:

$$q = q_{\text{constr}} + q_{\text{исп}} = 3,24 + 3,3 = 6,54 \text{ кН/м} \quad (2)$$

Используя известные выражения строительной механики были рассчитаны: наибольший изгибающий момент, поперечные силы. Графически представлены на рисунке 3.

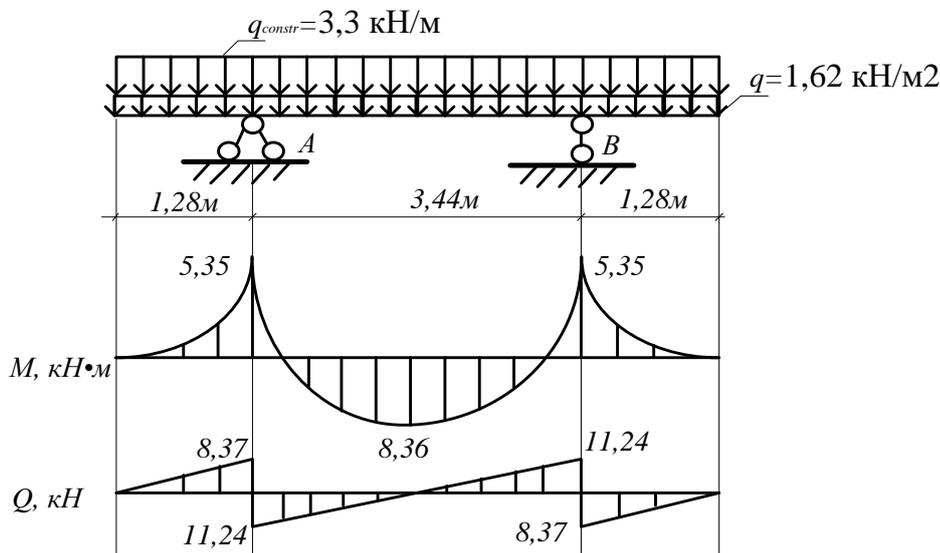


Рис. 3 – Расчётная схема, эпюры изгибающих моментов и поперечных сил

Основные результаты

Основные прочностные характеристики композитной арматуры представлены в таблице 3.

Как наиболее распространённую, геометрически схожую с Вр -II принимаем стеклопластиковую арматуру по [2], [6], диаметром 4,77мм., площадью поперечного сечения $S = 17,83 \text{ мм}^2$ $R_s = 1100 \text{ Н/мм}^2$. Определяем h_0 -рабочую высоту сечения по формуле (3):

$$h_0 = h - a_{sp} = 60 - 21,5 = 38,5 \text{ мм} \quad (3)$$

Таблица 3 – Характеристики НКА при растяжении

Наименование показателя	Ед. Изм.	Стеклокомп. АСК	Углекомп. АУК	Арамидокомп. ААК
Предел прочности при растяжении	МПа	450-1600	600-3500	1000-2500
Модуль упругости при растяжении	ГПа	35-60	100-580	40-125
Предельная относительная деформация	%	1,2-3,7	0,5-1,7	1,9-4,4

При расчете на прочность напряженных конструкций с композитной арматурой необходимо учитывать предварительные напряжения, а также их потери [4]. Для стеклопластиковой арматуры предварительные напряжения находятся по формуле 4:

$$\sigma_{fp} = 0,45 \cdot R_{f,n} = 0,45 \cdot 1100 = 495 \text{ МПа} \quad (4)$$

потери от релаксации: $\sigma_{fp2} = 0,2 \cdot \sigma_{fp} = 0,2 \cdot 495 = 99 \text{ МПа}$,

потери от температурного перепада: $\sigma_{fp3} = 1,25 \cdot \Delta t = 1,25 \cdot 65 = 78 \text{ МПа}$,

потери от деформации стальной формы: $\sigma_{fp4} = 30 \text{ МПа}$

Предварительное напряжение с учетом всех потерь найдем по формуле (5):

$$\sigma_{sp} = 495 - 99 - 78 - 30 = 288 \text{ МПа} \quad (5)$$

Расчет по прочности нормальных сечений бетонных конструкций с НКА следует производить в зависимости от соотношения между значением относительной высоты сжатой зоны $\xi = \frac{x}{h_0}$, определяемым из соответствующих условий равновесия, и значением граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R , при котором предельное состояние элемента наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре напряжения, равного расчётному сопротивлению R_s

Значение ξ_R определим по формуле:

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_0} = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{b2}}} \quad (6)$$

где $\omega = 0,8$; ε_{b2} принимаем по [4] равной 0,0035; $\varepsilon_f = \frac{R_s + 400 - \sigma_{sp}}{E_s}$.

Подставляя в выражение (6) необходимые величины рассчитали, что $\xi_R = 0,099$.

При расчете элемента в стадии предварительного обжатия усилие в напрягаемой арматуре вводится в расчет как внешняя продольная сила, равная:

$$N_p = (\sigma'_{sp} - 330)A'_{sp} + \sigma_{sp} \cdot A_{sp} \quad (7)$$

где σ'_{sp} и σ_{sp} - предварительные напряжения с учетом первых потерь в арматуре с соответствующей площадью A'_{sp} и A_{sp} .

Подставляя в выражение (7) необходимые величины рассчитано усилие от предварительного обжатия $N_p = 71248,68 \text{ Н}$.

Учитывая величину $\xi_R = 0,099$ высота сжатой зоны бетона определяется по следующей формуле:

$$x = \frac{N_p + R_s A_s \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R}}{R_b b + \frac{2 R_s A_s}{h_0 (1 + \xi_R)}} \quad (8)$$

Подставив значения найдена высота сжатой зоны $x = 6,8 \text{ мм}$.

Определив высоту сжатой зоны остается проверить выполнение условия прочности по моментам, момент от расчетной нагрузки равен:

$$M_r = R_s \cdot A_s \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) = 17,45 \cdot 7 \cdot 1100 \cdot (38,5 - 6,8) = 4,35 \cdot 10^6 \text{ Нмм} \quad (9)$$

$M_r = 4,3 \text{ кНм} < M = 8,36 \text{ кНм}$.

Условия прочности не выполняется, если принять стеклопластиковую арматуру диаметром 8 мм., то

$$M_r = R_s \cdot A_s \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) = 40,7 \cdot 7 \cdot 1100 \cdot \left(38,5 - \frac{16,7}{2} \right) = 9,45 \cdot 10^6 \text{ Нмм}$$

$M_r = 9,45 \text{ кНм} > M = 8,36 \text{ кНм}$ - условие прочности выполняется.

Для выбранной канальной плиты толщиной 60 мм возможно произвести замену стальной напрягаемой арматуры марки Вр-II диаметром 5мм., на композитную стеклопластиковую арматуру Ø8мм., в верхней и нижней зонах.

Заключение

В связи с тем, что антикоррозийная стойкость стеклопластиковой арматуры несравнимо выше стальной, может быть уменьшен защитный слой бетона и, соответственно, толщина плиты. Полимерные стержни обладают меньшим весом по сравнению с металлом. Их применение позволяет снизить нагрузку на основание. Материал не вступает в реакцию с водой и не поддается коррозии.

По прогнозам экспертов, со временем стеклопластиковая арматура не заменит полностью стальную в конструкциях, но займет определенный сегмент, так как обладает многими достоинствами.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Абдразаков Ф. К. Ресурсосберегающие технологии и машины для интенсификации мелиоративного производства / Ф. К. Абдразаков. Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, 2019. 164 с.
2. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования в бетонных конструкциях. - Введ. 01.01.2014. М. : Стандартинформ, 2014. – 37с.
3. ГОСТ 22930-87. Плиты железобетонные предварительно напряженные для облицовки оросительных каналов мелиоративных систем. Технические условия. - Введ. 01.01.1988. М. : Государственный строительный комитет, 1988. – 14с.
4. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. - Введ. 13.07.2015. М. : Стройиздат, 2015. – 163с.
5. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. - Введ. 01.09.2018. М. : Стандартинформ, 2019. – 16с.
6. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. правила проектирования. - Введ. 01.12.2012. М. : Минстрой России, 2017. – 52с.
7. Kumahara, S. Tensile Strength of Continuous Fiber Bar under High Temperature / S. Kumahara, Y. Masuda, Y. Tanano // International Symposium on Fiber-Reinforcement-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, American Concrete Institute, 1993.
8. Wang, N. Collapse of Continuous Fiber Composite Beamat Elevated Temperatures / N. Wang, J.T. Evans, // Journal of Composites, pp. 56-61, 26(1) 1996.
9. Karbhari, V.M. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure / V.M. Karbhari, J.W. Chin, D. Dunston, et al. // Journal of Composites for Construction, pp. 238-247, 7(3) 2003.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Abdrazakov F. K. Resursosberegajushhie tekhnologii i mashiny dlja intensivifikacii meliorativnogo proizvodstva [Resource-saving technologies and machines for the intensification of reclamation production] / F. K. Abdrazakov. Saratov: Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, 2019. 164 p. [in Russian]
2. GOST 31938-2012. Armatura kompozitnaja polimernaja dlja armirovanija v betonnykh konstrukcijakh [Composite polymer reinforcement for reinforcement in concrete structures. - introduced. 01.01.2014. Moscow : Standartinform, 2014– 37p. [in Russian]
3. GOST 22930-87. Plity zhelezobetonnye predvaritel'no naprjazhennye dlja oblicovki orositel'nykh kanalov meliorativnykh sistem. Tekhnicheskie uslovija [Prestressed reinforced concrete slabs for lining irrigation channels of reclamation systems. Technical conditions]. - introduced. 01.01.1988. Moscow : State Construction Committee, 1988– 14 p. [in Russian]
4. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija [Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions]. - introduced. 13.07.2015. Moscow : Stroyizdat, 2015– 163 p. [in Russian]
5. GOST 8829-2018. Izdelija stroitel'nye zhelezobetonnye i betonnye zavodskogo izgotovlenija. Metody ispytaniij nagruzeniem. Pravila ocenki prochnosti, zhestkosti i treshhinostojkosti [Reinforced concrete and factory-made concrete construction products. Methods of loading tests. Rules for assessing strength, stiffness and crack resistance]. - introduced. 01.09.2018. Moscow : Standartinform, 2019– 16p. [in Russian]
6. SP 295.1325800.2017. Konstrukcii betonnye, armirovannye polimernojj kompozitnoj armaturoj. pravila proektirovanija [Concrete structures reinforced with polymer composite reinforcement. design regulations]. - introduced. 01.12.2012. Moscow : Ministry of Construction of Russia, 2017. - 52 p. [in Russian]
7. Kumahara, S. Tensile Strength of Continuous Fiber Bar under High Temperature / S. Kumahara, Y. Masuda, Y. Tanano // International Symposium on Fiber-Reinforcement-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, American Concrete Institute, 1993.
8. Wang, N. Collapse of Continuous Fiber Composite Beamat Elevated Temperatures / N. Wang, J.T. Evans, // Journal of Composites, pp. 56-61, 26(1) 1996.
9. Karbhari, V.M. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure / V.M. Karbhari, J.W. Chin, D. Dunston, et al. // Journal of Composites for Construction, pp. 238-247, 7(3) 2003.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.019>**ОЦЕНКА ГЕНЕТИЧЕСКОГО И РЕПРОДУКТИВНОГО РИСКА КОРОВ ГОЛШТИНСКОЙ ПОРОДЫ**

Научная статья

Бакай Ф.Р.¹, Лепёхина Т.В.², Кровикова А.Н.^{3,*}¹ ORCID: 0000-0002-7417-4308;² ORCID: 0000-0003-2490-5974;³ ORCID: 0000-0003-0355-3156;^{1, 2, 3} Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина, Москва, Россия

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

Аннотация

Данная работа и ее практическое значение состоит в обосновании возможности и необходимости индивидуальной цитогенетической оценки высокопродуктивных коров. Представленные индивидуальные подходы к цитогенетической оценке практически пригодны для тестирования по уровню неконституциональной кариотипической изменчивости. Установленные параметры могут быть использованы как породные нормативы для голштинского скота. Уровни генетического риска (низкий, средний и высокий), представленные в статье показывают, что оценка по кариотипическому статусу подтверждают наличие больших или меньших нарушений репродуктивных функций у высокопродуктивных коров. Высокий уровень генетического риска, по сравнению с низким и средним, свидетельствуют о повышении вероятности нарушения воспроизводительных функций. Как показали результаты исследований, если подразделять коров на тяжелые поражения репродуктивных функций (аборт, мертворождения), различия в связи с уровнем генетического риска становятся более заметными. Наиболее ярко это выражено в группе с высоким генетическим риском из 64 коров с сервис-периодом более 121 суток отмечены у 5 коров (7,81 %) случаи мертворожденных телят при продолжительном индифференс-периоде до 51 суток. У коров с индифференс -периодом от 51 суток и выше такие нарушения как мертворождения и аборты выявлены у 7 голов, что составило (10,94 %).

Ключевые слова: крупно рогатый скот, голштинская порода, продуктивность, сервис-период, индифференс-период, кариологический мониторинг, хромосома, абберации.

AN ASSESSMENT OF GENETIC AND REPRODUCTIVE RISK OF HOLSTEIN CATTLE

Research article

Bakay F.R.¹, Lepyokhina T.V.², Krovikova A.N.^{3,*}¹ ORCID: 0000-0002-7417-4308;² ORCID: 0000-0003-2490-5974;³ ORCID: 0000-0003-0355-3156;^{1, 2, 3} Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology, Moscow, Russia

* Corresponding author (anna.krovikova[at]mail.ru)

Abstract

The practical significance of the current article lies in substantiating the possibility and necessity of an individual cytogenetic assessment of high-producing cows. The presented individual approaches to cytogenetic assessment are virtually suitable for testing by the level of unconstitutional karyotypic variability. The established parameters can be used as breed standards for Holstein cattle. The levels of genetic risk (low, medium, and high) presented in the article show that the karyotypic status assessment confirms the presence of greater or lesser reproductive function disorders in high-producing cows. Compared with low and medium, the high level of genetic risk indicates an increase in the likelihood of reproductive dysfunction. As the research results demonstrate, if cows are divided into severe lesions of reproductive functions (abortion, stillbirths), differences in connection with the level of genetic risk become more noticeable. This is most pronounced in the group with a high genetic risk of 64 cows with a service period of more than 121 days, cases of stillborn calves with a prolonged indifference period of up to 51 days were noted in 5 cows (7.81%). In cows with an indifferent period of 51 days and above, such disorders as stillbirths and abortions were detected in 7 heads, which amounted to (10.94%).

Keywords: cattle, Holstein breed, productivity, service period, indifference period, karyological monitoring, chromosome, aberrations.

Актуальность

Полученный успех в животноводстве при использовании голштинской породы для улучшения хозяйственно-полезных признаков коров черно-пестрой породы ни у кого не вызывает сомнения [11], [6], [7], [9]. При увеличении продуктивности у коров наблюдается интенсивность функционирования всего организма, «лактационная доминанта» т.е. высокая молочная продуктивность имеет место быть и это как правило связано с нарушениями репродуктивных функций [11], [4], [5]. В племенной работе важно учитывать все признаки, но также важно использовать для воспроизводства только таких коров, которые способны передать потомству, как высокую продуктивность, так и отсутствие нарушений воспроизводительных качеств. Особые требования предъявляются к племенным быкам, однако негативная информация в отношении накопления генетического груза и передача их возможна и от коров, своему потомству [8]. О влиянии генотипа на продуктивные и репродуктивные функции коров указывалось в работах Бакай А.В. с его соратниками [4], [5], [7].

Желание селекционеров получить высокую продуктивность, обязывает их работать над генетическим совершенствованием стада. Поэтому оценка генотипического статуса коров важна и актуальна. Цитогенетическая оценка коров, вначале ставившая цель установления определенной структуры нормального кариотипа животных, в

настоящее время переносит свой интерес к изучению частоте и спектра встречаемости и причин возникновения нарушений кариотипа. А далее выяснение их связи с воспроизводительными качествами коров. При известном перечне признаков неконституциональной кариотипической изменчивости у коров, необходимо найти способы классификации высокопродуктивных коров по уровням кариотипических характеристик с определенной целью выработки подходов к оценке кариотипического статуса.

Цель работы заключалась в изучении кариотипической нестабильности у коров голштинской породы.

Материал и методы исследований

Для исследования кариотипической изменчивости у коров голштинской породы с продуктивностью более 8000 кг молока за лактацию проводили индивидуальный кариологический мониторинг. Для сравнительного анализа цитогенетических показателей, коров с нарушениями репродуктивных функций разделили на группы. Животные находились в равных условиях, были в возрасте 5 лет и принадлежали по происхождению к ведущим линиям голштинской породы. Исследования и анализ хромосом проводили в лейкоцитах периферической крови. Кровь для исследований брали до утреннего кормления коров из яремной вены. В стерильные гепаринизированные флаконы. Для культивирования лимфоцитов крови *in vitro* с целью получения делящихся клеток и последующего анализа метафазных хромосом использовали тест – набор «Лимфокар». Лейкоциты помещали в среду, где находился фитогемагглютинин (ФГА). Культивирование клеток строго по инструкции при температуре 37-38 градусов в термостате, в присутствии антибиотиков. Культивирование продолжалось 72 часа, за 1,5 часа во флаконы с культурой клеток вводили колхицин (0,004% водный раствор, 0,2 мл на каждый флакон). Каждый флакон был подписан с присвоением индивидуального номера коровы. После снятия культуры, дальнейшая обработка – гипотонизацию, и фиксацию клеток на стеклах осуществляли по прописи. Предварительно все обезжиренные стекла были охлаждены в морозильной камере. Препараты окрашивали. Рутинная окраска, красителем Гимза (азур-эозин), время окраски 45 минут. Изучали метафазные пластинки под микроскопом МБИ -15. Микроскопирование проводили под увеличением 1300-1500 крат исключительно с масляной иммерсией. Подсчитывали уровень: анеуплоидии, полиплоидии, структурные нарушения хромосом и ассоциации хромосом. У каждого животного просматривали и анализировали не менее 100 метафаз. Метафазные пластинки с видимым разбросом хромосом фотографировали. За оценку генетического риска было принято трехбалльное ранжирование каждого уровня основных составляющих оценок признаков: Н - низкий 1 балл; С - 2 балла средний; В - 3 балла высокий. Таким образом, можно видеть, что генетический риск в баллах является обычным количественным признаком. Классифицировали признаки по внутригрупповой изменчивости признака. Средний класс представляли коровы со значениями генетического риска в пределах $\pm 0,5\sigma$ от средней арифметической; к низкому уровню генетического риска отнесены коровы со значениями от $-0,5\sigma$ и более чем $-1,5\sigma$; к высокому уровню особи со значением более $+1,5\sigma$ и выше. В категорию генетических факторов мы отнесли кариотипический статус коров, фенотипическими факторами в наших исследованиях были признаны продолжительность сервис-периода, индифференс-периода (от отела до первой охоты), а также интервал от первого до плодотворного осеменения. Для оценки генетического и репродуктивного риска высокопродуктивные коровы, имевшие различные воспроизводительные качества, были сформированы в группы в зависимости от продолжительности сервис-периода. Первая группа коров имела сервис – период до 120 суток, что при высокой продуктивности в настоящее время явление известное. Вторую группу коров представляли животные с сервис-периодом от 121 суток и выше. Для более полного анализа в пределах групп коровы были распределены на подгруппы в зависимости от продолжительности индифференс-периода. 1-я подгруппа коровы имели индифференс-период до 50 суток и без нарушений; 2-я подгруппа индифференс период более 51 суток и без нарушений репродуктивных функций; 3-я подгруппа индифференс-период до 50 суток с наличием аборт и мертворождений; 4-я подгруппа-коровы имели индифференс -период более 51 суток и наблюдались случаи мертворождений и абортов. В пределах группы отдельно вели учет частоты возникновения абортов и мертворождений. Статистическая обработка, полученных данных проведена на компьютере, с вычислением общепринятых показателей проводили по формулам и алгоритмам.

Результаты исследований

Для того, чтобы подойти к обобщенной оценке кариотипических нарушений, которую мы определили как генетический риск, рассмотрели распределение коров по продолжительности сервис-периода в зависимости от уровня генетического риска таблице 1.

Таблица 1 – Распределение высокопродуктивных коров по продолжительности сервис-периода в зависимости от генетического риска

Группы по продолжительности сервис-периода, сутки	n	Уровень генетического риска					
		Низкий		Средний		Высокий	
		N	%	n	%	n	%
до 120 сут.	80	45	56,25	27	33,75	8	10,00
121 сут и выше	80	2	2,50	14	17,50	64	80,00

Каждая группа животных состояла из 80 коров (таблица 1) оказалось, что принадлежность коров к различным уровням генетического риска подтверждается, тем, что в группе коров с продолжительностью сервис-периода до 120 суток оказалось 45 коров, с низким уровнем генетического риска, что составило 56,25%. Среди 80 коров средний уровень генетического риска имели 27 коров (33,75 %). Высокий уровень имели 8 коров (10,00 %). Здесь мы можем убедиться, что максимальные значения отдельных аномалий вовсе не приводят неизбежно к максимальному

генетическому риску, то есть наиболее выраженному ухудшению воспроизводительных качеств. Животные с нормальными репродуктивными функциями могут иметь иногда высокие значения частных цитогенетических аномалий. И наоборот, при высоких значениях генетического риска нами выявлено 64 коровы (80,00 %), сервис-период которых составлял более 121 суток. И только 2 (2,50 %) коровы из 80 имели низкий уровень генетического риска. Часто у одних и тех же особей одни аномалии выражены сильнее, чем другие, что затрудняет определение генетической полноценности таких животных в этом случае комплексная оценка – уровень генетического риска дает возможность лучшей дифференциации особей по способности образовывать цитогенетически не полноценные клетки. В связи с этим мы рассмотрели распределение коров с разным уровнем генетического риска (низкий, средний и высокий) и выделили подгруппы по продолжительности индифференс-периода у коров с разной продолжительностью сервис-периода (таблица 2).

Таблица 2 – Репродуктивная характеристика коров в связи с уровнем генетического риска

Группы по продолжительности сервис-периода, сутки	Группы по продолжительности индифференс-периода, сут.	Уровень генетического риска					
		низкий (n=45)		средний (n=27)		высокий (n=8)	
		n	%	n	%	n	%
до 120 сут.	До 50 сут - без аборт / без мертворождений	40	88,89	21	77,79	1	12,5
	от 51 сут - без аборт / без мертворождений	5	11,11	4	14,81	6	75,0
	До 50 сут – с абортами / с мертворождениями	-	-	1	3,70	-	-
	До 51 сут – с абортами / с мертворождениями	-	-	1	3,70	1	12,5
121 сут. и выше	Группы по продолжительности индифференс-периода, сут.	низкий (n=2)		средний (n=14)		высокий (n=64)	
		n	%	n	%	n	%
	До 50 сут - без аборт / без мертворождений	-	-	5	35,72	3	4,69
	от 51 сут - без аборт / без мертворождений	-	-	4	28,57	49	76,56
	До 50 сут – с абортами / с мертворождениями	-	-	4	28,57	5	7,81
До 51 сут – с абортами / с мертворождениями	2	100	1	7,14	7	10,94	

Как показали результаты исследований, если подразделять коров на тяжелые поражения репродуктивных функций (аборт, мертворождения), различия в связи с уровнем генетического риска становятся более заметными. Наиболее ярко это выражено в группе с высоким генетическим риском из 64 коров с сервис-периодом более 121 суток отмечены у 5 коров (7,81 %) случаи мертворожденных телят при продолжительном индифференс-периоде до 51 суток. У коров с индифференс-периодом от 51 суток и выше такие нарушения как мертворождения и аборты выявлены у 7 голов, что составило (10,94 %). В этой же группе, но в подгруппе мы наблюдаем удлиненный индифференс-период от 51 суток и выше у 49 голов. Распределение коров в группе с продолжительностью сервис-периода более 121 суток со средним уровнем генетического риска было следующим: в первой подгруппе 5 коров, во второй 4 коровы, в третьей также 4 коровы и в четвертой 1 голова. С низким уровнем генетического риска оказалось всего 2 головы, однако и они имели нарушения в виде абортов и мертворождений.

Более благополучная картина в отношении падежа и абортов сложилась в первой группе коров с продолжительностью сервис-периода до 120 суток. У этих коров не наблюдались ни аборты, ни мертворожденные телята. Большая часть коров приходила в охоту до 50 суток и 40 коров не имели нарушений, равно как и 5 коров из подгруппы с продолжительностью индифференс-периода более 51 суток. В группе со средним уровнем генетического риска из 27 коров (со средним уровнем генетического риска) 21 имели индифференс -период до 50 суток, 4 коровы были осеменены позже, но отелы прошли благополучно. И только 1 корова с индифференс-периодом до 50 суток имела аборт и одна корова отелилась, но теленок родился мертвым в группе с индифференс-периодом более 51 суток. Материалы таблицы 2 более убедительно говорят о роли кариотипических дефектов в этиологии ухудшения воспроизводительных качеств коров. Так оплодотвориться после первого осеменения коровы с низким уровнем генетического риска имеют вдвое больше шансов, чем коровы со средним уровнем генетического риска. Носительство высокого и даже среднего генетического риска увеличивает вероятность ухудшения воспроизводительных способностей у высокопродуктивных коров.



Рис. 1 – Кариотип коровы, анеуплоидия



Рис. 2 – Кариотип коровы с нарушениями

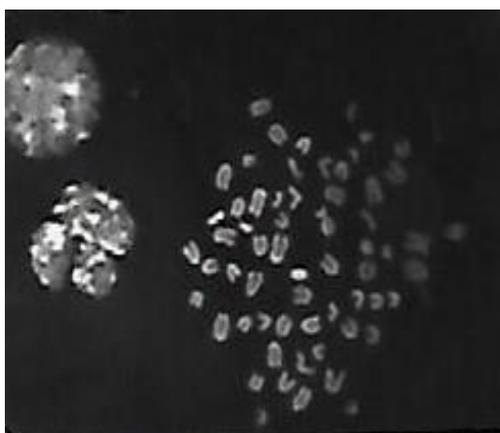


Рис. 3 – Ассоциации хромосом

Таким образом, необходимо проводить индивидуальное цитогенетическое тестирование коров для выявления кариотипической нестабильности, которая вносит огромный вклад в снижение воспроизводства. Индивидуальная цитогенетическая оценка призвана дифференцировать животных, которые имеют высокий уровень генетического риска, поскольку высокопродуктивные коровы с различными воспроизводительными качествами различаются по уровню генетического риска.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Алексеевич, Л.А. Генетика одомашненных животных / Л.А. Алексеевич, Л.В. Барабанова, И.Л. Суллер. – С.П. Ломоносов. – 2000. – 318 с.

2. Бакай, А. Показатели плодовитости высокопродуктивных коров и их связь с продуктивностью / А. Бакай, А. Голубев // Главный зоотехник. – 2011. – № 12. – С. 6-8.
3. Бакай, А.В. Воспроизводительные качества коров черно-пестрой породы с разным уровнем кариотипической нестабильности / А.В. Бакай, Ф.Р. Бакай, К.С. Мехтиева // Международный научно-исследовательский журнал. - 2021. - № 1-2 (103). - С. 94-97.
4. Бакай, А.В. Корреляция между показателями кариотипической нестабильности у коров с разными формами нарушений репродуктивных функций / А.В. Бакай, Н.М. Костомахин, Ф.Р. Бакай // Главный зоотехник. - 2018. - № 11. - С. 23-33.
5. Бакай, А.В. Цитогенетическая оценка племенных животных / А.В. Бакай, А.С. Семёнов // Сб. науч. Тр. – М.: МГАВМиБ, 2002. – С.33-36.
6. Бакай, Ф.Р. Анализ показателей молочной продуктивности у коров голштинской породы / Ф.Р. Бакай, К.С. Мехтиева, Ю.С. Козлов // Символ науки: международный научный журнал. - 2021. - № 5. - С. 43-44.
7. Иолчиев Б.С. Изучение кариотипов крупного рогатого скота и их гибридов с европейским зубром / Б.С. Иолчиев, П.М. Кленовицкий, Н.И. Стрекозов // Материалы научно-практической конференции «Повышение конкурентоспособности животноводства и задачи кадрового обеспечения». – Быково, Московской области. – 2001. – С. 35-36.
8. Кленовицкий П.М. Введение в прикладную цитогенетику одомашненных животных / П.М. Кленовицкий, Б.С. Иолчиев, А.А. Никишов и др. //Дубровицы, 2003 - С.56.
9. Кленовицкий П.М. Хромосомы одомашненных животных и родственных им видов / П.М. Кленовицкий, А.А. Никишов, Б.С. Иолчиев и др. – Дубровицы, ВИЖ. – 2002. – 75 с.
10. Мехтиева, К.С. Кариотипическая нестабильность у коров черно-пестрой породы с легкой и тяжелой формой отела / К.С. Мехтиева // Новейшие достижения и успехи развития сельскохозяйственных наук. сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. - 2016. - С. 8-10.
11. Мехтиева, К.С. Характеристика хозяйственно-биологических и воспроизводительных качеств коров черно-пестрой породы разных генераций: Дис. Кандидата биологических наук: 06.02.01 / К.С. Мехтиева; ФГБОУ ВО Московская Государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина. – Москва, 2017.- 128.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Alekseevich, L.A. Genetika odomashnennyh zhivotnyh [Genetics of Domesticated Animals] / L.A. Alekseevich, L.V. Barabanova, I.L. Suller. – S.P. Lomonosov. – 2000. – p. 318 [in Russian]
2. Bakaj, A. Pokazateli plodovitosti vysokoproduktivnyh korov i ih svyaz' s produktivnost'ju [Indicators of Fertility of Highly Productive Cows and Their Relationship With Productivity] / A. Bakaj, A. Golubev // Glavnij zootehnik [Chief Zootechnician]. – 2011. – № 12. – pp. 6-8. [in Russian]
3. Bakaj, A.V. Vosproizvoditel'nye kachestva korov cherno-pestroj porody s raznym уровнем kariotipicheskoj nestabil'nosti [Reproductive ability of cows taking into account parasitic factors] / A.V. Bakaj, F.R. Bakaj, K.S. Mehtieva // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. - 2021. - № 1-2 (103). - pp. 94-97. [in Russian]
4. Bakaj, A.V. Korreljacija mezhdu pokazateljami kariotipicheskoj nestabil'nosti u korov s raznymi formami narushenij reproduktivnyh funkcij [Correlation Between Indicators of Karyotypic Instability in Cows With Different Forms of Reproductive Disorders] / A.V. Bakaj, N.M. Kostomahin, F.R. Bakaj // Glavnij zootehnik [Chief Zootechnician]. - 2018. - № 11. - pp. 23-33. [in Russian]
5. Bakaj, A.V. Citogeneticheskaja ocenka plemennyh zhivotnyh [Cytogenetic Assessment of Breeding Animals] / A.V. Bakaj, A.S. Semjonov // Sb. nauch. Tr. [Collection of Scientific Works] – М.: МГАВМиБ, 2002. – pp. 33-36. [in Russian]
6. Bakaj, F.R. Analiz pokazatelej molochnoj produktivnosti u korov golshtinskoj porody [Analysis of Milk Productivity Indicators in Holstein Cows] / F.R. Bakaj, K.S. Mehtieva, Ju.S. Kozlov // Simvol nauki: mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal [Symbol of Science: International Scientific Journal]. - 2021. - № 5. - pp. 43-44. [in Russian]
7. Iolchiev B.S. Izuchenie kariotipov krupnogo rogatogo skota i ih gibridov s evropejskim zubrom [The Study of Karyotypes of Cattle and Their Hybrids With European Bison] / B.S. Iolchiev, P.M. Klenovickij, N.I. Strekozov // Materialy nauchno-prakticheskoi konferencii «Povyshenie konkurentnosposobnosti zhivotnovodstva i zadachi kadrovogo obespechenija» [Proceedings of the Scientific and Practical Conference “Increasing the Competitiveness of Animal Husbandry and the Tasks of Staffing”]. – Быково, Московской области. – 2001. – pp. 35-36. [in Russian]
8. Klenovickij P.M. Vvedenie v prikladnuju citogenetiku odomashnennyh zhivotnyh [Introduction to Applied Cytogenetics of Domesticated Animals] / P.M. Klenovickij, B.S. Iolchiev, A.A. Nikishov et al. // Dubrovicy, 2003 - p. 56. [in Russian]
9. Klenovickij P.M. Hromosomy odomashnennyh zhivotnyh i rodstvennyh im vidov [Chromosomes of Domesticated Animals and Related Species] / P.M. Klenovickij, B.S. Iolchiev, A.A. Nikishov et al.. – Dubrovicy, VIZh. – 2002. – p. 75 [in Russian]
10. Mehtieva, K.S. Kariotipicheskaja nestabil'nost' u korov cherno-pestroj porody s legkoj i tjazhelej formoj otela [Karyotypic Instability in Black-And-White Cows With Mild and Severe Calving] / K.S. Mehtieva // Novejschie dostizhenija i uspehi razvitiya sel'skohozjajstvennyh nauk. sbornik nauchnyh trudov po itogam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii. [In the Collection: The Latest Achievements and Successes of the Development of Agricultural Sciences. Collection of Scientific Papers on the Results of the International Scientific and Practical Conference.] - 2016. - pp. 8-10. [in Russian]
11. Mehtieva, K.S. Harakteristika hozjajstvenno-biologicheskij i vosproizvoditel'nyh kachestv korov cherno-pestroj porody raznyh generacij: Dis. Kandidata biologicheskijh nauk: 06.02.01 [Characteristics of Economic, Biological and Reproductive Qualities of Black-And-White Cows of Different Generations]: Candidate's thesis. Biological Sciences: 06.02.01 / K.S. Mehtieva //; FGBOU VO Moskovskaja Gosudarstvennaja akademija veterinarnoj mediciny i biotehnologii imeni K.I. Skrjabina. – Moskva, 2017.- 128. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.020>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА В СЕЛЕКЦИИ СУДАНСКОЙ ТРАВЫ**

Научная статья

Куколева С.С.*

ORCID: 0000-0002-0582-9024,

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, Саратов, Россия

* Корреспондирующий автор (lily74-88[at]mail.ru)

Аннотация

Главное назначение кластерного анализа – разделение множества исследуемых объектов, характеризующихся совокупностью признаков, на однородные в соответствующем понимании группы (кластеры). Положительным свойством кластерного анализа является возможность сжатия большого объема информации, ее систематизация, построение научно-обоснованной классификации, выявление внутренней связи между единицами исследуемой совокупности. Целью исследования является выделение перспективных образцов суданской травы по основным хозяйственным признакам на основе кластерного анализа для дальнейшего использования в селекции на гетерозис в условиях Саратовской области. Группировка образцов позволяет рассматривать состав каждого кластера, как довольно тождественный исходный материал по степени выраженности признаков. В 2015-2017 гг. оценивалось 32 образца суданской травы по 12 хозяйственно-ценным признакам, которые подверглись статистической обработке. На 22 шаге итерации с евклидовым расстоянием 14,4 образцы сгруппировали в 10 кластеров. Различия кластеров достоверны, кроме признака «массы 1000 зерен». По интенсивности стартового роста отличились 1 и 5 кластеры. Второй кластер характеризуется количеством различий по параметрам наибольшего листа, ширине флагового листа и урожайности зерна. По большинству признаков 3 и 4 кластеры значимо не различались. В 6-ом кластере отмечены различия по признакам: «выдвинутость ножки метелки», «высота при созревании», «длина соцветия» и «длина флагового листа». У 7-го кластера выявлены различия по ширине флагового листа, ширине соцветия и урожайности зерна. Восьмой кластер отличился по параметрам флагового листа и урожайности зеленой биомассы. В 9-ом кластере выявлены различия по признаку: «высота при созревании» и параметрам «соцветия», «наибольшего листа». Последний кластер выделился наибольшим количеством различий по параметрам наибольшего листа (по длине 8 и 6 по ширине), урожайности зерна и зеленой биомассы, выдвинутости ножки метелки. Полученные результаты используются при подборе компонентов скрещиваний в селекции сорго-суданковых гибридов.

Ключевые слова: суданская трава, кластерный анализ, кластер, урожайность, признак.

THE USE OF CLUSTER ANALYSIS IN THE SELECTION OF SORGHUM × DRUMMONDII

Research article

Kukoleva S.S.*

ORCID: 0000-0002-0582-9024,

Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn, Saratov, Russia

* Corresponding author (lily74-88[at]mail.ru)

Abstract

The main purpose of cluster analysis is to divide the set of objects under study characterized by a set of features into groups (clusters) that are homogeneous in the appropriate sense. A positive feature of cluster analysis is the ability to compress a large amount of information, systematize it, build a scientifically based classification, identify the internal relationship between the units of the population under study. The aim of the article is to identify promising samples of sorghum × drummondii according to the main economic characteristics based on cluster analysis for further use in breeding for heterosis in the conditions of Saratov Oblast. Grouping of samples allows for examining the composition of each cluster as fairly identical source material in terms of the severity of the indicators. During the period from 2015 to 2017, 32 samples of sorghum × drummondii were evaluated according to 12 economically valuable characteristics, which were subjected to statistical processing. At the 22nd iteration step with a Euclidean distance of 14.4, the samples were grouped into 10 clusters. Cluster differences were observed to be significant, except for the "1,000 Seed Weight" feature. The study distinguished clusters 1 and 5 based on the intensity of the initial growth. The second cluster is characterized by the number of differences in the parameters of the largest leaf, the width of the flag leaf, and grain yield. Clusters 3 and 4 did not differ significantly in most features. In the 6th cluster, differences were noted according to the following indicators: "the extension of the panicle leg", "height at maturity", "inflorescence length" and "length of the flag leaf". The 7th cluster revealed differences in the width of the flag leaf, the width of the inflorescence, and grain yield. The 8th cluster distinguished itself by the parameters of the flag leaf and the yield of green biomass. In the 9th cluster, differences were revealed on the basis of: "height at maturity" and the parameters of "inflorescence", "largest leaf". The last cluster was distinguished by the greatest number of differences in the parameters of the largest leaf (in length 8 and 6 in width), grain yield and green biomass, the extension of the panicle leg. The results obtained are used in the selection of components of crosses in the selection of grass sorghum hybrids.

Keywords: sorghum × drummondii, cluster analysis, cluster, yield, trait.

Введение

Суданская трава за счет относительно невысоких требований к почвенному плодородию и своей засухоустойчивости формирует стабильные и высокие урожаи кормовой массы, которую можно использовать для приготовления сенажа, сена, силоса, травянистой муки, зерносенажа, а также на зеленую массу, подкормку и выпас.

Евклидово расстояние — одно из наиболее известных расстояний, которое доступно для восприятия и понимания в случае количественных признаков и часто применяется в селекции разных сельскохозяйственных культур, в том числе

и суданской травы [3, С. 127-129]. Применение кластерного анализа в селекционной практике отмечено в публикациях при изучении сорговых культур и кукурузы [4, С. 8], [6, С. 75], [1, С. 30].

Целью исследования являлось выделение перспективных сортов и линий суданской травы по основным хозяйственным признакам на основе кластерного анализа для дальнейшего использования в селекции на гетерозис в условиях Саратовской области.

Материал и методы исследований

Проведен кластерный анализ 32 образцов суданской травы по 12 признакам: стартовый рост, высота растений при созревании, длина метелки, ширина метелки, длина наибольшего листа, ширина наибольшего листа, выдвинутость ножки, длина флагового листа, ширина флагового листа, урожайность зеленой биомассы, урожайность зерна, масса 1000 зерен. Высевали в оптимальные сроки 2015-2017 гг. на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» сеялкой СКС-6-10. Почва опытного поля представлена слабовыщелоченным южным маломощным чернозёмом, среднесуглинистым по гранулометрическому составу. То есть, почва опытного поля является типичной для зоны сухих чернозёмных степей Юго-Востока России. Наиболее благоприятный для формирования продуктивности был 2017 год (гидротермический коэффициент (ГТК) в период вегетации составил 0,91); «засушливыми» характеризовались 2015 (ГТК=0,41), 2016 (ГТК=0,64) годы.

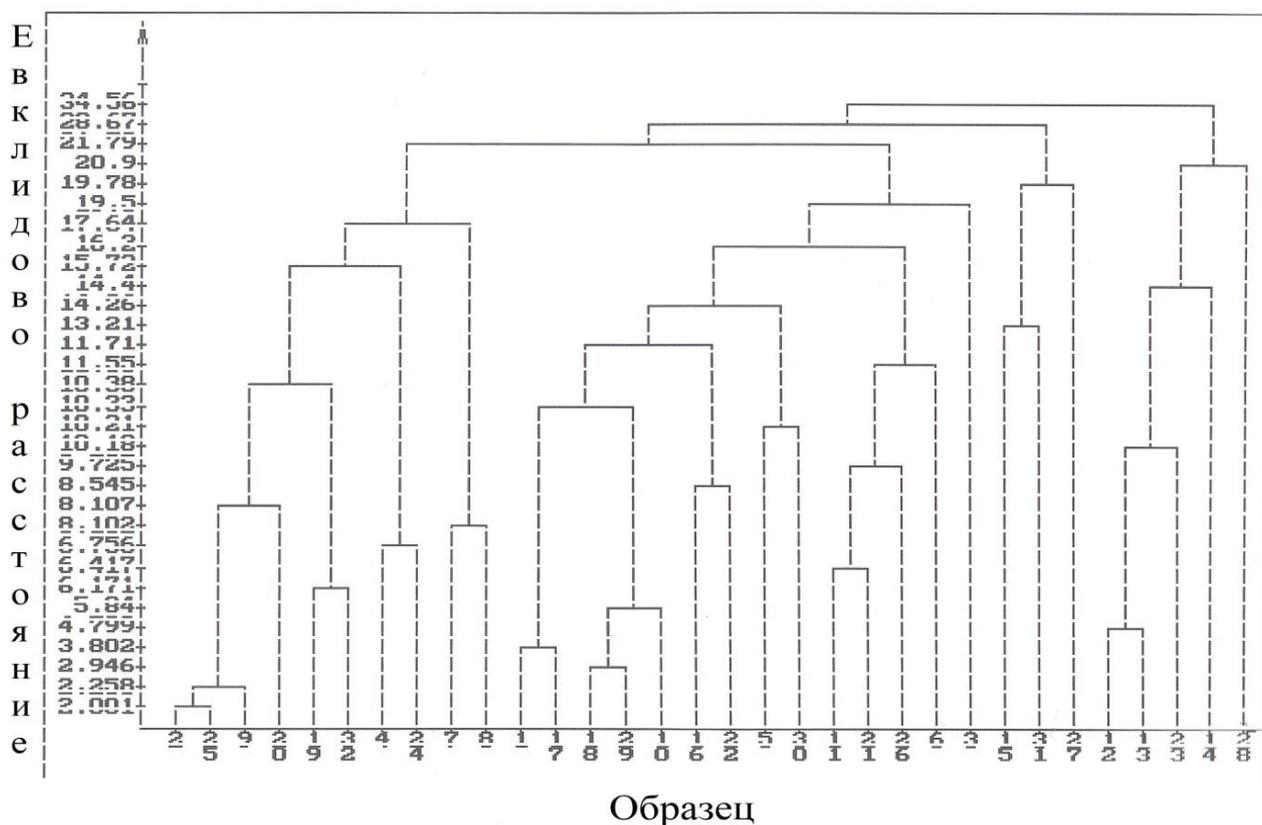
Площадь делянки составила 7,7 м². Повторность – трехкратная. Густота стояния растений в фазу всходов корректировалась вручную (150 тыс. раст./га).

Агротехника выращивания – зональная, разработанная научными учреждениями Нижнего Поволжья. Оценка хозяйственно-ценных признаков образцов суданской травы проведена согласно методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [5] и широкого унифицированного классификатора СЭВ и международного классификатора СЭВ [7]. Результаты исследования подвергались статистической обработке в программе Agros версии 2.09 дисперсионным и кластерным анализами [2].

Результаты и их обсуждение

На 22 шаге итерации (минимум евклидовых расстояний равен 14,4) сорта и линии суданской травы сгруппировали в 10 кластеров (см. рисунок 1). Выявлен следующий состав кластеров:

- 1) Чишминская ранняя, Росинка, Якташ, Ташебинская, Туран 2, Сарват.
- 2) Кинельская 100, Мечта Поволжья.
- 3) Л-143, МEB-728.
- 4) Зональская 6, Don Salvador, Славянка, JS-722, Юбилейная 20, Элегия, Лаура, Зерноградская, Пензенская 34.
- 5) Саратовская 1183, Фаина, Ciral, Л-106.
- 6) Краснодарская 75.
- 7) Камышинская 51, Александрина.
- 8) Агун.
- 9) Землячка, Аллегория, Анастасия, Амбиция.
- 10) Фиолета.



Образец

Рис. 1 – Кластеризация образцов суданской травы по минимуму евклидовых расстояний (средние за 2015-2017гг.)

Примечание: Зональская 6, 2; Чишиминская ранняя, 3; Краснодарская 75, 4; Кинельская 100, 5; зерноградская, 6; Л-106, 7; Л-143, 8; МЕВ-728, 9; Якташ, 10; Юбилейная 20, 11; Саратовская 1183, 12; Землячка, 13; Аллегория, 14; Амбиция, 15; Камышинская 51, 16; Элегия, 17; Don Salvador, 18; Славянка, 19; Туран 2, 20; Ташебинская, 21; Фаина, 22; Лаура, 23; Анастасия, 24; Мечта Поволжья, 25; Росинка, 26; Ciral, 27; Agun, 28; Фиолета, 29; JS-722, 30; Пензенская 34, 31; Александрина, 32; Сарват

Распределения образцов суданской травы по кластерам проверили с использованием дисперсионного анализа методом неорганизованных повторений. По всем признакам отмечается нулевая гипотеза, то есть различия кластеров достоверны, кроме признака массы 1000 зерен (см. таблицу 1).

По интенсивности стартового роста отличились 1 кластер (4 различия) и 5 кластер (3 различия). Высота растений через 30 дней после всходов составила 68,5-104,0 см.

Второй кластер выделился количеством различий по параметрам наибольшего листа (9 по длине и 6 по ширине), ширине флагового листа (6 различий) и урожайности зерна (3 различия). В кластер вошли растения с короткими и узкими листьями (наибольший: длина – 31,4 см, ширина – 2,5 см; флаговый: ширина – 1,8 см) и низкой урожайностью зерна (1,7 т/га).

По большинству признаков 3 и 4 кластера значимо не различались.

У 6-ого кластера отмечены различия по признакам: «выдвинутость ножки метелки» (8 различий), «высота при созревании» (3 различия), «длина соцветия» (5 различий) и «длина флагового листа» (5 различий). В кластер входит группа растений, отличающаяся наибольшей выдвинутостью ножки метелки (28,7 см), средней высотой при созревании (165,3 см), средним соцветием (23,6 см) и коротким флаговым листом (16,5 см).

У 7-го кластера выявлены различия по ширине флагового листа (7 различий), ширине соцветия (4 различия) и урожайности зерна (3 различия). У растений данного кластера преобладают широкие флаговые листья (2,9 см), более узкие метелки (12,6 см) и низкая урожайность зерна (1,7 т/га).

Образцы 8-го кластера характеризуются различиями по параметрам флагового листа (8 по длине и 6 по ширине) и урожайности зеленой биомассы (9). Растения этого кластера обладают высокими показателями длины и ширины флагового листа (32,9 см и 2,8 см, соответственно) и низкой урожайностью зеленой биомассы (6,4 т/га).

9 кластер отличился от других кластеров по признакам: «высота при созревании» (9 различий) и параметрам «соцветия» (6 по длине и 6 по ширине), «наибольшего листа» (6 по длине и 5 различий по ширине). Растения этого кластера характеризуются высокорослостью (254,3 см), наибольшими параметрами соцветия (длина – 36,1 см, ширина – 19,7 см) и наибольшего листа (длина 52,2 см, ширина 4,0 см).

10 кластер выделился наибольшим количеством различий по параметрам наибольшего листа (по длине 8 и 6 по ширине), урожайности зерна (9) и зеленой биомассы (8), выдвинутости ножки метелки (8). В этот кластер вошли образцы, формирующие высокую продуктивность и параметры наибольшего листа, а также имеющие короткую выдвинутость ножки.

Таблица 1 – Дисперсионный анализ, средних значений признаков образцов суданской травы, сгруппированных по кластерам, 2015-2017 гг.

Кластер	Стартовый рост, см	Высота при созревании, см	Соцветие, см		Наибольший лист, см		Флаговый лист, см		Выдвинутость ножки, см	Урожайность, т/га		Масса 1000 зерен, г
			длина	ширина	длина	ширина	длина	ширина		зеленой биомассы	зерна	
1	104,00с	178,92а	32,97bcde	18,85de	40,70b	2,97ab	22,38abcd	2,06ab	25,20de	10,75b	1,72а	16,77
2	87,40abc	170,15а	28,20abcd	17,40bcde	31,40а	2,50а	24,35cd	1,75а	21,95cd	14,05с	1,69а	13,80
3	75,95ab	167,85а	34,75de	18,80cde	42,15bc	2,90ab	28,90de	2,45def	18,20bc	16,95cd	1,80ab	14,30
4	84,43abc	178,01а	27,64bcd	15,29abcd	45,04bc	2,98ab	21,09abc	1,83а	16,98bc	14,44с	2,24ab	15,62
5	68,48а	169,43а	25,03а	13,28ab	43,12bc	3,12bc	17,33ab	1,88а	13,27ab	16,02cd	3,37с	12,50
6	90,40bc	165,30а	23,60а	14,20ab	39,20b	3,60cdef	16,50а	2,40cde	28,70e	15,80cd	2,73abc	17,00
7	87,00abc	213,80bc	25,10а	12,55а	44,90bcd	4,05efg	22,25abcd	2,87g	17,40bc	18,75d	1,68а	12,90
8	73,60ab	184,00а	25,10а	14,70abcd	49,20cd	4,10fg	32,90e	2,76fg	21,30cd	6,40а	1,84ab	13,30
9	89,10bc	254,30d	36,12e	19,70e	52,15de	3,95defg	23,48bcd	2,35bcde	17,70bc	22,60ef	2,78bc	15,05
10	74,70ab	220,10с	33,50cde	13,00а	56,90e	4,20g	26,00cd	2,63efg	11,30а	24,60f	4,30d	11,20
F факт	3,86*	9,04*	3,59*	4,08*	6,22*	9,68*	3,38*	11,32*	7,93*	17,30*	5,12*	2,32
НСР _{0,05}	17,58	29,50	6,83	3,87	6,74	0,50	5,94	0,32	4,86	3,17	0,93	-

Выводы

Кластеризация сортов и линий суданской травы по минимуму евклидовых расстояний с учетом значений морфологических признаков и урожайности позволяет их сгруппировать в определенные классы по обобщенной мере сходства. Образцы (всего 32) распределены по 10 кластерам. Достоверность их распределения по группам подтверждена дисперсионным анализом. Полученные результаты используются при подборе компонентов скрещиваний (родительских форм) в селекции сорго-суданковых гибридов. В качестве исходного материала рекомендуется включать сорта и линии входящие в 7, 9 и 10 кластеры: Камышинская 51, Александрина, Землячка, Аллегория, Анастасия, Амбиция, Фиолета.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Гудова Л.А. Кластерный анализ по минимуму евклидовых расстояний в селекции кукурузы / Л.А. Гудова // Междунар. науч.-практ. конф. «Эффективные решения в приоритетных отраслях АПК в засушливых регионах». Саратов. – 2020. – С. 30-35.
2. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов // М.: Альянс. – 2011. – 352 с.
3. Корнева С.П. Использование кластерного анализа для повышения эффективности отборов в расщепляющихся гибридных популяциях / С.П. Корнева // Молодые ученые сибирского региона – аграрной науке, материалы межрегион. конф. молодых ученых. Омск. – 2004. – С. 127-131.
4. Куколева С.С. Скрининг сортообразцов суданской травы в условиях Саратовской области / С.С. Куколева, Д.С. Семин, О.П. Кибальник, В.И. Старчак // Зерновое хозяйство России. – 2016. – №4(46). – С. 8-11.
5. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М. – 1989. – 194 с.
6. Семин Д.С. Кластеризация исходного материала зернового сорго селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» / Д.С. Семин, О.П. Кибальник, И.Г. Ефремова и др. // Сб. мат. по итогам конф. «Инновационные агротехнологии в растениеводстве засушливых регионов России». Саратов. – 2019. – С.75-84.
7. Якушевский Е. С. Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ возделываемых видов рода *Sorghum Moench* // Е.С. Якушевский // Л. – 1982. – 34 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gudova L.A. Klasternyj analiz po minimumu evklidovyh rasstoyanij v selekcii kukuruzy [Cluster analysis by the minimum of Euclidean distances in corn breeding] / L.A. Gudova // Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Effektivnye resheniya v prioritetnyh otraslyah APK v zasushlivyh regionah» [collection of the International scientific and practical Conference "Effective solutions in priority sectors of agriculture in arid regions"]. Saratov. – 2020. – P. 30-35. [in Russian]
2. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)] / B.A. Dospekhov // M.: Al'yans. – 2011. – 352 p. [in Russian]
3. Korneva S.P. Ispol'zovanie klasternogo analiza dlya povysheniya effektivnosti otborov v rassheplyayushchihsya gibridnyh populyaciyah [The use of cluster analysis to improve the efficiency of selection in splitting hybrid populations] / S.P. Korneva // Molodye uchenye sibirskogo regiona – agrarnoj nauke, materialy mezhregion. konf. molodyh uchenyh [materials of the interregional conference of young scientists "Young scientists of the Siberian region – agricultural science"]. Omsk. – 2004. – P. 127-131. [in Russian]
4. Kukoleva S.S. Skriniring sortoobrazcov sudanskoj travy v usloviyah Saratovskoj oblasti / S.S. Kukoleva, D.S. Semin, O.P. Kibal'nik et al. // Zernovoe hozyajstvo Rossii. – 2016. – № 4 (46). – P. 8-11. [in Russian]
5. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Methodology of state variety testing of agricultural crops] M. – 1989. – 194 p. [in Russian]
6. Semin D.S. Klasterizaciya iskhodnogo materiala zernovogo sorgo selekcii FGBNU RosNIISK «Rossorgo» [Clustering of the source material of grain sorghum selection of RosNIISK "Rossorgo"] / D.S. Semin, O.P. Kibal'nik, I.G. Efremova et al. // Sb. mat. po itogam konf. «Innovacionnye agrotekhnologii v rastenievodstve zasushlivyh regionov Rossii» [Collection of materials on the results of the conference "Innovative agrotechnologies in crop production of arid regions of Russia"]. Saratov. – 2019. – P.75-84. [in Russian]
7. Yakushevskij E. S. Shirokij unificirovannyj klassifikator SEV i mezhdunarodnyj klassifikator SEV vozdel'yaemyh vidov roda *Sorghum Moench* [Wide unified classifier of SEV and international classifier of SEV of cultivated species of the genus *Sorghum Moench*] / E.S. Yakushevskij // L. – 1982. – 34 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.021>

ДИНАМИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДЫ УЗВ ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОМ ВЫРАЩИВАНИИ РЫБЫ И РАСТЕНИЙ

Научная статья

Ленченко С.О.^{1,*}, Львов Ю.Б.²

¹ ORCID: 0000-0001-8613-1105;

² ORCID: 0000-0002-1517-3604;

^{1,2} Всероссийский научно-исследовательский институт интегрированного рыбоводства – филиал Федерального исследовательского центра животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, пос. им. Воровского, Россия

* Корреспондирующий автор (svyat.lenchenko[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье представлены результаты исследований динамики гидрохимических показателей воды при интегрированном выращивании рыбы и растений. В УЗВ, объемом 1500 литров обитали следующие рыбы: *Acipenser gueldenstaedtii*, *Carassius gibelio*, *Tinca tinca*, *Cyprinus carpio*, на 36-ые сутки опыта к установке был подключен гроубокс, где выращивался салат *Lollo Rossa Lettuce*. На протяжении эксперимента вода в рыбоводной ёмкости не подменялась и не доливалась. Динамика изменений гидрохимических показателей воды при использовании аквапонного модуля после подключения гроубокса связана с тем, что растения развитой корневой системой потребляют азотистые соединения. Наблюдаются более активные процессы по движению углеводистых веществ в системе, стабилизируется pH. Накопление биогенов, наблюдаемое в эксперименте свидетельствовало о недостаточном количестве их утилизаторов – растений.

Ключевые слова: аквапоника, гидрохимические показатели, гроубокс, растения, рыба.

DYNAMICS OF HYDROCHEMICAL INDICATORS OF WATER IN A RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM IN INTEGRATED CULTIVATION OF FISH AND PLANTS

Research article

Lenchenko S.O.^{1,*}, Lvov Yu.B.²

¹ ORCID: 0000-0001-8613-1105;

² ORCID: 0000-0002-1517-3604;

^{1,2} All-Russian Research Institute of Integrated Fish Farming, branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Imeni Vorovskogo, Russia

* Corresponding author (svyat.lenchenko[at]yandex.ru)

Abstract

The article presents the results of studies of the dynamics of hydrochemical indicators of water in the integrated cultivation of fish and plants. A recirculating aquaculture system, with a volume of 1500 liters, contained the following fish: *Acipenser gueldenstaedtii*, *Carassius gibelio*, *Tinca tinca*, *Cyprinus carpio*, on the 36th day of the experiment, a growbox was connected to the system where *Lollo Rossa Lettuce* was grown. During the experiment, the water in the fish tank was not replaced or refilled. The dynamics of changes in the hydrochemical parameters of water when using the aquaponics module after connecting the growbox can be attributed to the fact that plants with a developed root system consume nitrogenous compounds. There are more active processes of the movement of carbohydrate substances in the system, the pH is stabilized. The accumulation of biogenic substances observed in the experiment indicated an insufficient number of their utilizers — plants.

Keywords: aquaponics, hydrochemical indicators, growbox, plants, fish.

Введение

Интегрированное выращивание рыбы и растений является перспективным направлением производства [1], [2]. При увеличении плотности рыб в УЗВ до 40–50 кг/м² продуктивность растений возрастает в 1,3 – 1,8 раза [3, С. 44]. При устойчивом росте суточной массы рыбы наблюдалась тенденция уменьшения pH среды, азотистых соединений, увеличения уровня растворенного кислорода [4, С.1127]. Накопление нитратов в листьях салата возрастало, в связи с наличием живых объектов и продуктов их жизнедеятельности [5, С. 69].

Цель работы – изучить динамику гидрохимических показателей воды установки замкнутого водоснабжения при интегрированном выращивании рыбы и растений.

Материалы и методы исследований

Экспериментальные исследования проводили в течение 66 суток, на протяжении всего эксперимента вода в рыбоводной ёмкости не подменялась и не доливалась. В УЗВ, объемом 1500 литров обитали рыбы: *Acipenser gueldenstaedtii*, *Carassius gibelio*, *Tinca tinca*, *Cyprinus carpio*. На 36-ые сутки опыта к установке был подключен гроубокс, где выращивался салат *Lollo Rossa Lettuce*. Гидрохимические анализы воды, измерение морфометрических показателей рыбы и растений проводили общепринятыми методами [3], [5], [6].

Результаты исследований

Результаты исследования динамики гидрохимических показателей воды УЗВ до подключения и при подключении гроубокса представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Гидрохимические показатели воды

Показатели	Результаты исследований							
	До подключения гроубокса				Подключение гроубокса			
	24.05.	04.06	18.06	25.06.	28.06.	12.07.	23.07.	28.07.
t, C°	17,0	17,6	17,6	20,0	20,7	21,1	18,5	20,0
pH	8,0	7,5	7,4	7,0	6,7	6,5	5,7	5,5
Кислород, мг/л	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3	6,3	5,8	6,3
БПК, мг/дм	–	1,9	2,2	4,3	–	–	5,8	2,8
Аммоний-ион, мг /л	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0
Нитриты, мг N/л	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Нитраты, мг N/л	7,0	7,0	10,0	10,0	10,0	15,0	15,0	15,0
Общая минерализация, мг/л	970,0	1060	1090	1110	1120	1180	1110	1110
Углекислота, мг/л	2,1	1,4	0,7	0,7	0,4	0,4	0,7	0,7
Фосфаты, мг/л	1,5	3,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Цветность, Ц°	10,0	15,0	15,0	15,0	20,0	20,0	50,0	50,0
Мутность, ЕМФ	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0	5,0

Концентрация кислорода варьировалась от 5,8 до 6,4 мг/л; показатели БПК составили от 0,8 до 5,8 мг/л. Концентрация нитритов была стабильной и оставалась в пределах нормы, равной 0,1 мг/л; нитраты не превышали допустимые значения, на протяжении экспериментов изменялись от 7,0 мг/л в начале эксперимента и до 20,0 мг/л на 47-ые сутки. При подключении гроубокса спустя несколько суток концентрация нитратов снизилась до 15,0 мг/л. Указанные показатели соответствовали нормативным значениям при выращивании рыбы в УЗВ.

Фосфаты концентрировались от 1,5 мг/л в начале опыта до 10,0 мг/л, что значительно превышало нормативные значения (0,2-0,5 мг/л). Концентрация аммоний-иона варьировалась от 0,5 мг/л в начале опыта до 1,0 мг/л на заключительном этапе эксперимента, что незначительно превышало предельно допустимые значения. Показатели pH в начале опыта были на уровне 8,0 и постоянно снижались, достигнув 5,5 в конце эксперимента. Большую часть эксперимента pH не соответствовали нормативным показателям, превышая предельно допустимые значения вначале опыта, а затем показатели были ниже. Значения pH 6,8-7,2 были достигнуты лишь в период 26-33-х суток эксперимента. Показатели углекислого газа в течение эксперимента изменялись неоднородно, минимальные значения – 0,4 мг/л, максимальные – 6,3 мг/л. Показатели минерализации воды (TDS) на всем протяжении эксперимента постоянно увеличивались от 970,0 до 1330,0 мг/л. Показатели цветности воды в УЗВ изменялись от 15 до 50 единиц по платинокобальтовой шкале. Мутность варьировалась от 3,0 до 5,0 единиц по формазину. Накопление биогенов, наблюдаемое в эксперименте свидетельствовало о недостаточном количестве их утилизаторов – растений.

Обсуждение

В настоящее время накопилось достаточно эмпирических данных позволяющих определить приемлемые соотношения подсистем аквапонии. По мнению *Keesman, K. et al., 2019* доля экскреции азота в фекальных потерях и экскреция аммиака составляет 0,25 и 0,75, соответственно [7, С. 267]. *Rathod V. et al., 2019* считают, что при pH воды, близкого к нейтральному (6,0–6,5), питательные вещества легко доступны для растений, процесс преобразования аммиака в нитраты нитрифицирующими бактериями снижается при pH=6,0, что влияет на биофильтрацию [8, С. 12-13]. *Rakocy J. et al., 2021* отметили, что в зависимости от качества используемого корма и вида рыб могут снижаться показатели фосфора, калия, кальция, магния и микроэлементов [10]. По данным *Козырь А. В., 2019* при высоких концентрациях аммиак-аммония в воде происходит непосредственный контакт аммиака и крови, активно циркулирующей через жаберные лепестки, что отражается на физиологических показателях жизнедеятельности и развития рыб [9, С. 91].

Заключение

Динамика накопления исследуемых веществ после подключения гроубокса при использовании аквапонного модуля характеризовалась увеличением показателей концентрации фосфатов, минерализации воды (TDS); цветности воды; аммоний-иона; снижением концентрации нитратов; Растения с развитой корневой системой потребляют азотистые соединения, наблюдаются активные процессы по движению углеводистых веществ в системе, стабилизируется pH. Продукты метаболизма одного биологического кластера используются другим на последующих этапах до их полной утилизации внутри системы. В культивационной среде происходит накопление растворимых биогенов, таких как азот, фосфор и пр., которые можно рассматривать как трофическую базу для растительных организмов.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Львов Ю.Б. Способ определения допустимой нагрузки на водоём культивируемых объектов / Ю.Б. Львов, Е.И. Шишанова, А.В. Мазур // Рыбоводство и рыбное хозяйство. – 2017. – №10. – С. 53 – 61.
2. Юрина Н. А. Использование аквапонного метода / Н. А. Юрина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021.–№ 10 (112) Часть 1. – С. 73–76. –DOI: 10.23670/IRJ.2021.112.10.012

3. Матишов, Г.Г. Инновационная биотехнология получения экологически чистой продукции аквабиокультуры в модульной установке замкнутого водоснабжения / Г.Г. Матишов, Е. Н. Пономарева, А.В. Казарникова и др. // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки. Ростов-на-Дону, 2016. – № 3. – С. 41-48. DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-41-48

4. Яценко, В.Н. Сравнение эффективности гидропонной и аквапонной технологий на установках замкнутого водоснабжения / В.Н. Яценко, А.Л. Семенов, Т. В. Степанова и др. // Научно-образовательный журнал для преподавателей и студентов «Studnet». Воронеж, 2020. – № 12. – С. 1165-1178.

5. Матишов, Г.Г. Интегрированное выращивание рыбы и растений в модульной установке замкнутого водоснабжения / Г.Г. Матишов, Е.Н. Пономарева, А.В. Казарникова и др. // Рыбное хозяйство, 2017. – № 1. – С. 66-71.

6. Брайнбалле, Я. Руководство по аквакультуре в установках замкнутого водоснабжения / Я. Брайнбалле // Введение в новые экологические и высокопродуктивные замкнутые рыбоводные системы. – Изд-во: Международная организация «ЕВРОФИШ» при поддержке Субрегионального бюро ФАО по Центральной и Восточной Европе. – Копенгаген, 2010. – 70 с.

7. Keesman, K. Aquaponics Systems Modelling / K. Keesman, O. Körner, K. Wagner et al. // Aquaponics Food Production Systems, 2019. – P. 267-301 // DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6_11267

8. Rathod, V. Aquaponics: enhance farmer income / V. Rathod, V. Sarman, D. Mahavadiya // Aqua star. – 2019. – P. 12-14.

9. Козырь, А.В. Влияние аквапонного модуля на содержание азотистых соединений в тепловодных установках замкнутого водоснабжения при выращивании клариевого сома (*Clarias gaeripinus*) / А.В. Козырь, Л.С. Цвирко // Вестник Полесского Государственного Университета. Пинск, 2019. – № 1. – С. 87-94.

10. Rakocy, J. Fish and Vegetable Production in a Commercial Aquaponic System / J. Rakocy, Donald B., R. Shultz et al. // 25 Years of Research at the University of the Virgin Islands, 2021. [Electronic resource]. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjPe_74P0AhUNmIsKHW0JBAIQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fag.arizona.edu%2Fazaqua%2Fista%2FISTA9%2FFullPapers%2FRakocy1.doc&usq=AOvVaw1qW_9cUpiRledyCm_UmWJu (accessed 12.11.2021)

Список литературы на английском языке / References in English

1. L'vov Ju.B. Sposob opredelenija dopustimoy nagruzki na vodojom kul'tiviruemykh ob'ektov [A Method for Determining the Permissible Load on the Reservoir of Cultivated Objects] / L'vov Ju.B., Shishanova E.I., Mazur A.V. // Rybovodstvo i rybnoe hozjajstvo [Fish Farming and Fisheries]. – 2017. – №10. – pp. 53 – 61. [in Russian]

2. Jurina N. A. Ispol'zovanie akvaponnogo metoda [The Use of the Aquaponic Method] / N. A. Jurina // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. – 2021.–№ 10 (112) Part 1. – pp. 73–76. DOI: 10.23670/IRJ.2021.112.10.012 [in Russian]

3. Matishov, G.G. Innovacionnaja biotehnologija poluchenija jekologicheski chistoj produkcii akvabiokul'tury v modul'noj ustanovke zamknutogo vodosnabzhenija [Innovative Biotechnology of Obtaining Environmentally Friendly Aquatic Culture Products in a Modular Installation of Closed Water Supply] / G.G. Matishov, E. N. Ponomareva, A.V. Kazarnikova et al. // Izvestija VUZov. Severo-Kavkazskij region. Serija Estestvennye nauki. [Bulletin of Universities. The North Caucasus Region. Natural Sciences Series.] Rostov-na-Donu, 2016. – № 3. – pp. 41-48. DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-41-48 [in Russian]

4. Jacenko, V.N. Sravnenie jeffektivnosti gidroponnoj i akvaponnoj tehnologij na ustanovkah zamknutogo vodosnabzhenija [Comparison of the Effectiveness of Hydroponic and Aquaponic Technologies on Closed Water Supply Installations] / V.N. Jacenko, A.L. Semenov, T. V. Stepanova et al. // Nauchno-obrazovatel'nyj zhurnal dlja prepodavatelej i studentov «Studnet» [Scientific and Educational Journal for Teachers and Students “Studnet”]. Voronezh, 2020. – № 12. – pp. 1165-1178. [in Russian]

5. Matishov, G.G. Integrirovannee vyrashhivanie ryby i rastenij v modul'noj ustanovke zamknutogo vodosnabzhenija [Integrated Cultivation of Fish and Plants in a Modular Installation of Closed Water Supply] / G.G. Matishov, E.N. Ponomareva, A.V. Kazarnikova et al. // Rybnoe hozjajstvo [Fisheries], 2017. – № 1. – pp. 66-71. [in Russian]

6. Brajnballe, Ja. Rukovodstvo po akvakul'ture v ustanovkah zamknutogo vodosnabzhenija [Guide to Aquaculture in Closed Water Supply Installations] / Ja. Brajnballe // Vvedenie v novye jekologicheskie i vysokoproduktivnye zamknutyje rybovodnye sistemy [Introduction to New Ecological and Highly Productive Closed Fish Breeding Systems]. – Publishing house: Mezhdunarodnaja organizacija «EVROFISH» pri podderzhke Subregional'nogo bjuro FAO po Central'noj i Vostochnoj Evrope. – Kopenhagen, 2010. – p. 70 [in Russian]

7. Keesman, K. Aquaponics Systems Modelling / K. Keesman, O. Körner, K. Wagner et al. // Aquaponics Food Production Systems, 2019. – P. 267-301 // DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6_11267

8. Rathod, V. Aquaponics: enhance farmer income / V. Rathod, V. Sarman, D. Mahavadiya // Aqua star. – 2019. – P. 12-14.

9. Trump, A.V. Vlijanie akvaponnogo modulja na sodержание azotistykh soedinenij v teplovodnykh ustanovkah zamknutogo vodosnabzhenija pri vyrashhivanii klarievogo soma (*Clarias gaeripinus*) [The effect of the aquapon module on the content of nitrogenous compounds in closed-water thermal water supply installations during the cultivation of clarias catfish (*Clarias gaeripinus*)] / A.V. Trump, L.S. Tsvirko // Bulletin of the Polesky State University. Pinsk, 2019. - No. 1. - pp. 87-94. [in Russian]

10. Rakocy, J. Fish and Vegetable Production in a Commercial Aquaponic System / J. Rakocy, Donald B., R. Shultz et al. // 25 Years of Research at the University of the Virgin Islands, 2021. [Electronic resource]. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjPe_74P0AhUNmIsKHW0JBAIQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fag.arizona.edu%2Fazaqua%2Fista%2FISTA9%2FFullPapers%2FRakocy1.doc&usq=AOvVaw1qW_9cUpiRledyCm_UmWJu (accessed 12.11.2021)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.022>

ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИ ПОДБОРА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ КОРОВ

Научная статья

Мухтарова О.М.*

ORCID: 0000-0002-1207-2736,

Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина,
Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (o.m.muhtarova[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье рассмотрено влияние разных моделей подбора на молочную продуктивность голштинизированного черно-пестрого скота в сравнительном аспекте на основе комплексной их оценки за весь период использования в стаде. Для этого отобрали две группы коров (по 100 голов в каждой) на основе принципа парных аналогов по дате первого отела в интервале до одного месяца. В I группу включили коров, полученных разведением трех линий с поддержанием на одну их них через отца матери, матери и отца, во II – коров, полученных разведением разного количества линий. Особи обеих групп происходили от одних и тех же быков одинаковой племенной ценности. Комплексную оценку животных проводили по 9 показателям (живой массе при выращивании в различные возрастные периоды, основным промерам тела, молочной продуктивности за имеющиеся лактации и по средним показателям за ряд лактаций). Статистически достоверные различия между коровами двух разных групп установили по 11 показателям: продолжительности сервис-периода, числу дойных дней и удою за первую лактацию, продолжительности межотельного периода в I и V лактации, возрасту второго и третьего отелов, удою за IV лактацию и за ее 305 суток, среднему удою за ряд лактаций, выходу молока на один день межотельного периода.

Ключевые слова: подбор, линия, наследуемость, продуктивность.

ON THE INFLUENCE OF THE SELECTION MODEL ON COW PRODUCTIVITY

Research article

Mukhtarova O.M.*

ORCID: 0000-0002-1207-2736,

Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology, Moscow, Russia

* Corresponding author (o.m.muhtarova[at]yandex.ru)

Abstract

The article explores the influence of different selection models on the dairy productivity of Holstein Black Pied cattle in a comparative aspect based on their comprehensive assessment over the entire period of use in the herd. For this purpose, the study selected two groups of cows (100 heads in each) based on the principle of paired analogs by the date of the first calving in the interval of up to one month. The first group included cows obtained by breeding three lines with maintenance for one of them through the mother's father, mother, and father, the second group included cows obtained by breeding different numbers of lines. Individuals of both groups descended from the same bulls of the same breeding value. A comprehensive assessment of animals was carried out according to 9 indicators (live weight when grown at different age periods, basic body measurements, milk productivity for existing lactation, and average indicators for a number of lactation). Statistically significant differences between cows of two different groups were established by the following 11 indicators: the duration of the service period, the number of milking days and milk yield for the first lactation, the duration of the calving period in I and V lactation, the age of the second and third calving, milk yield for IV lactation and for its 305 days, average milk yield for a number of lactation, milk yield for one day of the calving period.

Keywords: selection, line, heritability, productivity.

Введение

Разведение по линиям – это наиболее надежный путь совершенствования существующих и вновь создаваемых пород на современном этапе развития животноводства. Этот метод селекции наиболее эффективен [4], [5], [8], [9].

В работе С. Smith (Smith С., 1962) доказано, что разделение популяций на специализированные материнские и отцовские линии способствует ускорению селекционного прогресса, так как количество учитываемых признаков в отдельных линиях сокращается и уменьшается значение отрицательной корреляции между продуктивными и репродуктивными признаками [3].

Для получения гетерозисных эффектов в скотоводстве применяется скрещивание животных разных пород и специализированных линий. При этом, как показали исследования R. Moav (Moav R., 1966), V. Jakubec (Jakubec V., 1973), дифференциация популяций по продуктивным и репродуктивным признакам на материнские и отцовские и затем их скрещивание дают возможность более полно использовать комбинационный гетерозис [1], [2].

Прогресс линий в значительной степени определяется генотипом их основателей с точки зрения генетики, практически уникален для каждого производителя. Разведение генеалогически разнородных структур придает породе пластичность и позволяет использовать кроссы линий с целью закрепления положительных или ослабления нежелательных качеств [6], [7], [10].

Цель исследования – изучить влияние одной из моделей подбора на молочную продуктивность голштинизированных черно-пестрых коров в сравнительном аспекте на основе комплексной их оценки за весь период использования в стаде.

Для реализации цели были поставлены следующие задачи: провести комплексную оценку животных по следующим показателям: живой массе при выращивании в различные возрастные периоды; основным промерам тела; молочной

продуктивности за имеющиеся лактации; по средним показателям за ряд лактаций. На основании комплексной оценки выявить оптимальный вариант подбора.

Для достижения поставленной цели и решения задач использовали общепринятые зоотехнические и статистические методы исследований. Полученный числовой материал статистически обработан с использованием компьютерной программы Microsoft Excel.

Исследования были проведены на голштинизированных коровах черно-пестрой породы в ОАО «Вохринка» Раменского района Московской области.

Анализ продуктивности матерей коров двух групп показал, что различия по удою за I, II, III, наивысшую и в среднем за ряд лактаций были малозначимы (табл. 1).

Таблица 1 – Продуктивность матерей коров

Лактация	I группа		II группа	
	n	Продуктивность	n	Продуктивность
Удой за 305 суток, кг				
I	95	7088±82,0	95	8072±79,0
II	85	7701±110,0	76	8594±106,0
III	80	8044±108,0	73	8168±98,0
Наивысшая	89	8815±98,0	78	8824±110,0
В среднем	88	7949±79,0	86	7924±76,0
Содержание массовой доли жира в молоке, %				
I	95	3,77±0,011	95	3,77±0,013
II	85	3,78±0,015	76	3,79±0,015
III	80	3,79±0,016	73	3,80±0,014
Наивысшая	89	3,83±0,019	78	3,82±0,012
В среднем	88	3,80±0,009	86	3,80±0,012

Достоверных различий по живой массе между телками разных генетических групп при рождении, в возрасте 6, 10, 12 и 18 месяцев не установлено (табл. 2). По основным промерам коров разных генотипических групп различий также не выявлено (табл. 3).

Таблица 2 – Изменение живой массы телок

Возраст, мес	I группа		II группа	
	n	Живая масса, кг	n	Живая масса, кг
При рождении	97	31,9±0,4	89	32,2±0,4
6	61	168,6±4,1	53	171,3±3,1
10	44	223,7±4,3	41	216,6±5,1
12	95	260,4±3,4	88	255,0±3,8
18	89	336,2±4,3	85	332,2±4,8
При первом осеменении	92	354,1±4,3	84	357,3±4,4

Средний возраст телок I группы при осеменении составил 19,7±0,4 мес., II группы – 19,8±0,4 мес.

При незначительных различиях по росту и развитию между телятами коровы I группы за все лактации проявили более высокую продуктивность. Превышение колебалось от 39 до 785 кг молока при незначительных различиях по содержанию жира и по живой массе. Средний удои коров I группы за ряд лактаций (2 и более) был больше удои коров II группы на 285 кг и составил 8097 кг при равном содержании жира – 3,81%. Выход молока на один день межотельного периода у коров I группы составил 30,52 кг что на 0,5 кг больше, чем у коров II группы. Средний же удои коров I группы составил 8111 кг с содержанием жира 3,82% и живой массе 554 кг, а у коров II группы – 7859 кг, 3,80% и 551 кг (табл. 4).

Таблица 3 – Основные промеры коров

Промер	I группа, см	II группа, см
Высота в холке	125,7±0,4	126,0±0,5
Глубина груди	64,6±0,5	64,1±0,8
Ширина груди	44,5±0,4	45,6±0,8
Обхват груди	187±0,9	187,7±1,1
Косая длина туловища	146±0,8	148,1±0,95
Ширина в маклоках	50,9±4	50,4±0,4
Обхват пясти	19,4±0,2	19,5±0,2

Таким образом превосходство по удою коров I Группы над аналогами II группы оказалось на 252 кг ($P \geq 0,999$), а по содержанию жира – на 0,02%. Выход молока на один день межотельного периода у коров I группы составил 30,63 кг, а у коров II группы – 30,07 кг, или на 0,56 кг меньше, что в расчете на год будет 204 кг. В I группе было 17 коров, которые имели 7 отелов и более, а во второй – 15. Межотельный период у коров I группы длился 425 дней, а II – 409, или на 16 дней меньше ($P \geq 0,95$). Продолжительность использования коров I группы составила 2709 дней, а II – 2637, или на 72 дня меньше.

Повторяемость удоев у матерей коров I группы за определенные лактации в большинстве случаев была больше, чем у матерей коров II группы, за исключением II-III и III-средней за ряд лактаций. Низкая повторяемость наблюдалась между удоем за I и наивысшую лактацию. У матерей коров I группы коэффициент корреляции равнялся $0,364 \pm 0,101$, а у матерей коров II группы – $0,218 \pm 0,115$. Довольно высокая повторяемость наблюдалась между удоем за I, II, III и наивысшую лактации со средним удоем за лактации, которая у матерей коров I группы колебалась от $0,623 \pm 0,085$ до $0,792 \pm 0,066$, а у матерей коров II группы соответственно от $0,472 \pm 0,99$ до $0,765 \pm 0,075$.

Аналогичная картина наблюдалась и у коров разных генетических групп, однако, у коров I группы менее значима повторяемость была между удоем за I-II, I-III, I-IV и I-V лактации (табл. 5).

Корреляция между удоем матерей и дочерей в I группе была положительной за исключением корреляции удоя за наивысшую лактацию с удоем за V и IV лактации. Во II группе взаимосвязь между удоем матерей и дочерей была несколько отличной от взаимосвязей у коров I группы. По содержанию жира в молоке взаимосвязь у коров разных генетических групп варьировала от положительной до отрицательной при малых ее значениях (табл. 6). Следует отметить более высокую корреляцию между удоем матерей и дочерей у коров I группы.

В этой же группе между удоем коров за I лактацию и живой массой телок в разном возрасте наблюдалась отрицательная корреляция, которая колебалась от $0,036 \pm 0,130$ в 6-месячном возрасте до $0,198 \pm 0,105$ в 18-месячном. Между живой массой при первом осеменении и удоем за I лактацию корреляция была положительной ($0,163 \pm 0,104$).

Положительная корреляция была между удоем за I лактацию и высотой в холке ($0,031 \pm 0,018$), шириной груди ($0,060 \pm 0,108$). Корреляция удоя коров за I лактацию с остальными промерами была отрицательной с колебаниями от $0,072 \pm 0,108$ до $0,178 \pm 0,106$.

Таблица 4 – Продуктивность коров

Лактация	I группа		II группа	
	n	продуктивность	n	продуктивность
Удой за 305 суток, кг				
I	100	7505±87,0	100	7382±89,0
II	82	7826±112,0	82	7638±100,0
III	69	8238±140,0	66	8123±149,0
IV	56	8435±146,0	50	8396±150,0
V	35	8643±174,0	36	8274±206,0
VI	23	9140±215,0	17	8355±249,0
VII	15	8879±168,0	12	8172±197,0
В среднем за лактации	-	8111±56,0	-	7859±57,0
Массовая доля жира в молоке, %				
I	100	3,82±0,017	100	3,80±0,011
II	82	3,83±0,018	82	3,80±0,012
III	69	3,80±0,012	66	3,79±0,011
IV	56	3,80±0,013	50	3,81±0,015
V	35	3,80±0,025	36	3,80±0,016
VI	23	3,78±0,021	17	3,82±0,023
VII	15	3,83±0,032	12	3,82±0,018
В среднем за лактации	-	3,82±0,007	-	3,80±0,008
Живая масса, кг				
I	100	487±3,6	100	487±3,5
II	82	536±4,3	82	537±3,4
III	69	574±4,4	66	574±3,1
IV	56	590±4,6	50	588±3,8
V	35	604±5,0	36	603±4,4
VI	23	615±8,0	17	613±7,3
VII	15	612±9,4	12	619±10,8
В среднем	-	554±3,0	-	551±3,0

Во II группе между живой массой телок при рождении и в возрасте 6 мес. с удоем коров за I лактацию корреляция была отрицательной с колебаниями от $0,298 \pm 0,133$ до $0,394 \pm 0,102$. В 10-, 12- и 18-месячном возрасте и при первом осеменении корреляция между живой массой телок и удоем коров за I лактацию была положительной с колебаниями от $0,015 \pm 0,108$ до $0,091 \pm 0,109$.

Между высотой в холке и удоем за I лактацию также была положительная корреляция ($0,135 \pm 0,112$). Связь остальных промеров коров с удоем за I лактацию была отрицательной с колебаниями от $0,013 \pm 0,013$ до $0,216 \pm 0,011$. Между живой массой коров и удоем за 305 суток лактации как в первой, так и во второй группах установлена положительная корреляция. В I группе в отдельные лактации она колебалась от $0,206 \pm 0,219$ до $0,573 \pm 0,103$, а во II – от $0,070 \pm 0,258$ до $0,337 \pm 0,096$. За все лактации в I группе животных корреляция составила $0,526 \pm 0,044$, а во II – $0,430 \pm 0,048$.

Таблица 5 – Повторяемость удоев у коров

Коррелирующие лактации	I группа		II группа	
	n	$r \pm X_r$	n	$r \pm X_r$
I-II	82	0,556±0,093	82	0,390±0,103
I-III	69	0,611±0,097	66	0,552±0,104
I-IV	56	0,627±0,106	50	0,283±0,138
I-V	35	0,303±0,166	36	0,481±0,150
I-VI	23	0,235±0,212	17	0,074±0,257
II-III	69	0,629±0,095	66	0,506±0,108
II-IV	56	0,444±0,122	50	0,333±0,136
II-V	35	0,377±0,161	36	0,495±0,149
II-VI	23	0,227±0,213	17	0,017±0,258
III-IV	56	0,721±0,094	50	0,429±0,130
III-V	35	0,420±0,158	36	0,547±0,144
III-VI	23	0,556±0,181	17	0,250±0,250
IV-V	35	0,369±0,162	36	0,629±0,133
IV-VI	23	0,492±0,190	17	-0,130±0,256
V-VI	23	0,518±0,187	17	0,265±0,249

У коров обеих групп была довольно высокая корреляция между удоем за 305 суток лактации и выходом молока на один день межотельного периода (0,894±0,025 и 0,845±0,030). Между продолжительностью межотельного периода и выходом молока на один его день в обеих группах корреляция была отрицательной (0,126±0,055 и 0,127±0,056). Между живой массой коров и выходом молока на один день межотельного периода корреляция была положительной. В I группе она составила 0,488±0,049, во II – 0,349±0,53.

Таблица 6 – Генетические корреляции по удою и содержанию жира у коров

Коррелируемые лактации	I группа		II группа	
	n	$r \pm X_r$	n	$r \pm X_r$
Удой за 305 суток, кг				
I-I	95	0,270±0,100	93	0,199±0,103
II-II	72	0,159±0,0118	63	0,149±0,103
III-III	57	0,221±0,131	53	-0,177±0,139
Наивысшая-IV	52	0,154±0,140	47	-0,247±0,144
Наивысшая-V	34	-0,080±0,178	34	-0,227±0,172
Наивысшая-VI	22	-0,379±0,207	17	0,516±0,221
Массовая доля жира в молоке, %				
I-I	95	0,125±0,103	63	0,025±0,105
II-II	72	-0,087±0,119	63	-0,023±0,128
III-III	57	0,005±0,135	53	0,139±0,139
Наивысшая-IV	52	-0,325±0,134	47	0,214±0,146

Заключение

Установленные паратипические факторы, уровень продуктивности материнского стада, а также экстерьерно-конституциональные особенности в первые полтора года онтогенеза, дают возможность сделать вывод о том, что животноводы, полученные при разведении трех линий с поддержанием на одну через отца матери, матери и отца показали лучшие показатели продуктивности, в отличие от сверстниц, полученных при кроссировании множества линий.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

- Jakubec V. Teorie hybridizace s modelovon aplikaci chow prasat. Studijni informace / V. Jakubec. – Zivocisna vyroba. UVML, 1973.
- Moav R. Specialized sire and dam lines. I. Economic evaluation of crossbreeds / R. Moav // Animal Production. – 1966. – v.8. – p. 193-202.
- Smith C. Estimation of genetic change in farm livestock using field records / C. Smith // Animal Production. – 1962. – v.4. – p. 239-251.
- Дунин И.М. Разведение скота голштинской породы на территории Российской Федерации / И.М. Дунин, С.Е. Тяпугин, Р.К. Мещеряков и др. // Зоотехния. – 2020. - №2. – С. 5-8
- Лабинов В.В. Модернизация черно-пестрой породы крупного рогатого скота в России на основе использования генофонда голштинов / В.В. Лабинов, П.Н. Прохоренко // Молочное и мясное скотоводство. – 2015. - №1. – С. 8-10
- Любимов А.И. Влияние инбридинга на племенную ценность и реализацию генетического потенциала быков-производителей / А.И. Любимов, Ю.В. Исупова, В.М. Юдин // Зоотехния. – 2016. - №8. – С. 2-4
- Мысик А.Т. Состояние животноводства и инновационные пути его развития / А.Т. Мысик // Зоотехния. – 2017. - №1. – С. 2-9

8. Прохоренко П. Голштинская порода и ее влияние на генетический прогресс продуктивности черно-пестрого скота европейских стран и Российской Федерации / П. Прохоренко // Молочное и мясное скотоводство. – 2015. - №2. – С. 2-7

9. Прудов, А.И. Разведение по линиям – надежный путь совершенствования пород / Прудов А.И., Дунин И.М., Привалихин Г.М. // Животноводство. – 1984. - №10. – с.34-35

10. Смирнов В.Н. Влияние инбридинга на продуктивные и воспроизводительные качества коров / В.Н. Смирнов, О.В. Руденко // Зоотехния. – 2008. - №8. – С. 3-5

Список литературы на английском языке / References in English

1. Jakubec V. Teorie hybridizace s modelovon aplikaci chow prasat. Studijni informace / V. Jakubec. – Zivocisna vyroba. UVML, 1973.

2. Moav R. Specialized sire and dam lines. I. Economic evaluation of crossbreeds / R. Moav // Animal Production. – 1966. – v.8. – p. 193-202.

3. Smith C. Estimation of genetic change in farm livestock using field records / C. Smith // Animal Production. – 1962. – v.4. – p. 239-251.

4. Dunin I.M. Razvedenie skota golshtinskoy porody na territorii Rossijskoj Federacii [Breeding of Holstein cattle on the territory of the Russian Federation] / I.M. Dunin, S.E. Tyapugin, R.K. Meshcheryakov, et al. // Zootekhnika [Zootechnics]. - 2020. - No. 2. - p. 5-8 [in Russian]

5. Labinov V.V. Modernizacija cherno-pestrojj porody krupnogo rogatogo skota v Rossii na osnove ispol'zovanija genofonda golshtinov [Modernization of the Black-and-White Breed of Cattle in Russia Based on the Use of the Holstein Gene Pool] / V.V. Labinov, P.N. Prokhorenko // Molochnoe i mjasnoe skotovodstvo [Dairy and Meat Cattle Breeding]. – 2015. – № 1. – pp. 8–10 [in Russian]

6. Lyubimov A.I. Vlijanie inbridinga na plemennuju cennost' i realizaciju geneticheskogo potenciala bykov-proizvoditelec [The influence of inbreeding on the breeding value and the realization of the genetic potential of producing bulls] / A.I. Lyubimov, Yu.V. Isupova, V.M. Yudin // Zootekhnika [Zootechnics]. - 2016. - No. 8. - p. 2-4 [in Russian]

7. Mysik A.T. Sostojanie zhivotnovodstva i innovacionnye puti ego razvitija [The state of animal husbandry and innovative ways of its development] / A.T. Mysik // Zootekhnika [Zootechnics]. - 2017. - No.1. - pp. 2-9 [in Russian]

8. Prokhorenko P. Golshtinskaja poroda i ee vlijanie na geneticheskij progress produktivnosti cherno-pestrogo skota evropejskikh stran i Rossijskoj Federacii [The Holstein breed and its influence on the genetic progress of productivity of black-and-white cattle of European countries and the Russian Federation] / P. Prokhorenko // Molochnoe i mjasnoe skotovodstvo [Dairy and beef cattle breeding]. - 2015. - No.2. - pp.2-7 [in Russian]

9. Prudov, A.I. Razvedenie po linijam – nadezhnyj put' sovershenstvovanija porod [Breeding along lines is a reliable way to improve breeds] / Prudov A.I., Dunin I.M., Privalikhin G.M. // Zhivotnovodstvo [Animal Husbandry]. - 1984. - No. 10. - pp.34-35 [in Russian]

10. Smirnov V.N. Vlijanie inbridinga na produktivnye i vosproizvoditel'nye kachestva korov [Influence of inbreeding on productive and reproductive qualities of cows] / V.N. Smirnov, O.V. Rudenko // Zootekhnika [Zootechnics]. - 2008. - No. 8. - p. 3-5 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.023>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Научная статья

Плаксина В.С.^{1,*}, Пронудин К.А.², Асташов А.Н.³

¹ ORCID: 0000-0002-8968-8774;

^{1, 2, 3} Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, Саратов, Россия

* Корреспондирующий автор (v.plaksina88[at]yandex.ru)

Аннотация

Целью настоящего исследования было оценить эффективность изучаемых севооборотов по выходу зерна в разные по метеоусловиям годы. Наиболее высокая продуктивность среди всех схем изучаемых севооборотов получена в пятипольных и четырехпольных с включением зернобобовых и поздних культур. Выход зерна с 1 гектара пашни в них составил 1,70-1,81 тонны при средней продуктивности всех изучаемых севооборотов 1,54 тонны. По результатам исследований установлено, что для достижения оптимальной эффективности агроэкоценозов в условиях недостаточного увлажнения необходимо включение в структуру посевных площадей поздних культур, таких как кукуруза и зерновое сорго, которые способны формировать стабильные урожаи в разные годы. Также целесообразно включение в структуру посевных площадей зернобобовых культур, повышающих эффективность севооборотов и способствующих сохранению почвенного плодородия.

Ключевые слова: севооборот, продуктивность, гидротермический коэффициент, зерновое сорго, кукуруза, соя, нут.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF AGROECOSYSTEMS IN THE LOWER VOLGA REGION

Research article

Plaksina V.S.^{1,*}, Pronudin K.A.², Astashov A.N.³

¹ ORCID: 0000-0002-8968-8774;

^{1, 2, 3} Sorghum and Corn Research and Design Technology Institute, Saratov, Russia

* Corresponding author (v.plaksina88[at]yandex.ru)

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effectiveness of the crop rotations under study for grain yield in different years based on weather conditions. The highest productivity among all the schemes of the crop rotations was obtained in five-course and four-course ones with the inclusion of leguminous and late crops, where the yield of grain from 1 hectare of arable land amounted to 1.70-1.81 tons with the average productivity of all crop rotations amounting to 1.54 tons. Based on the research results, the study establishes that in order to achieve optimal efficiency of agroecocenoses in conditions of insufficient moisture, it is necessary to include late crops, such as corn and grain sorghum, which are able to produce stable yields in different years, in the structure of sown areas. It is also advisable to include leguminous crops in the structure of sown areas, which increase the efficiency of crop rotations and contribute to the preservation of soil fertility.

Keywords: crop rotation, productivity, hydrothermal coefficient, sorghum, corn, soy, chickpeas.

Введение

Нестабильные цены на зерно и стремление к устойчивому развитию рассматривать альтернативные методы увеличения разнообразия доходов и защиты плодородия почвы. Сокращение использования пестицидов является одной из приоритетных задач в стремлении к устойчивому сельскому хозяйству [1]. В связи с интенсивными методами ведения сельского хозяйства растущая экологическая озабоченность способствовала появлению инновационных систем ведения сельского хозяйства, таких как органическое и интегрированное сельское хозяйство, используемых в качестве альтернативных путей сокращения использования пестицидов по сравнению с нынешними традиционными системами [2], [3].

Интенсивные системы земледелия оказывают негативное воздействие на экосистему. Поэтому использование севооборота является возможностью повышения экологической устойчивости агроэкоцистем [4]. Учитывая современную экономическую ситуацию, особый интерес представляет изучение севооборотов с короткой ротацией. Научно-обоснованный подход к этому вопросу может существенно повысить эффективность производства продукции растениеводства, снизить затраты на использование сельскохозяйственной техники, а, наряду с этим, улучшить агроэкологическую ситуацию за счет изменения структурности почвы, улучшения ее агрофизических свойств [5]. Экологически и экономически обоснованная концепция земледелия в любой почвенно-климатической зоне должна строиться на выращивании наиболее соответствующих по биологическим свойствам культур, с учетом их средообразующего влияния на плодородие почвы и состояние агроэкоценозов [6].

Целью настоящего исследования было оценить эффективность севооборотов по выходу зерна с 1 га пашни.

В исследованиях построение севооборотов основывалось на возделывании взаимодополняющих групп растений по принципу асинхронности прохождения этапов онтогенеза. В севооборотах возделывались помимо озимых и ранних яровых злаков поздние культуры. Включение засухоустойчивых поздних культур, способных восполнять потери урожая других культур, обеспечивает стабилизацию выхода продукции [7], [8].

Методы и принципы исследования

Исследования проводились в 2008-2019 гг. на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». Погодные условия в годы исследований были различные и в полной мере охватывали всю совокупность климатических особенностей региона: из двенадцати лет благоприятными по увлажнению и урожайными были 2008, 2013 и 2017 годы ($ГТК \geq 1,0$).

Средними были 2009, 2014, 2015, 2016, 2018 и 2019 годы ($0,6 \leq \text{ГТК} \leq 1,0$). Сухими и жаркими были 2010-2012 годы ($\text{ГТК} < 0,6$) (см. рисунок 1).



Рис. 1 – Погодные условия в годы исследований, 2008-2019 гг.

Почва опытного поля - чернозем южный среднесиловой малогумусный тяжелосуглинистый. Пахотный слой (на момент закладки опыта) характеризовался следующими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) составило 4,85 %, гидролизующего азота (по Тюрину-Кононовой) - 0,05 %, подвижного фосфора (по Мачигину) - 4,53 мг/100 г почвы, обменного калия (по Мачигину) – 38 мг на 100 г почвы, pH солевой вытяжки - 6,6.

Агротехника в полевых опытах – общепринятая для зоны, без применения пестицидов. Площадь учетной делянки – 100 м², размещение систематическое, повторность трехкратная,

Оценка эффективности проводилась по выходу зерна с 1 гектара пашни экспериментальных севооборотов:

- **трехпольные** – черный пар, озимая пшеница, яровая пшеница; черный пар, озимая пшеница, яровой ячмень; черный пар, озимая пшеница, кукуруза; черный пар, озимая пшеница, зерновое сорго;
- **четырепольные** – черный пар, озимая пшеница, соя, яровая пшеница; черный пар, озимая пшеница, соя, яровой ячмень; черный пар, озимая пшеница, соя, кукуруза; черный пар, озимая пшеница, соя, зерновое сорго;
- **пятипольные** – черный пар, озимая пшеница, яровая пшеница, нут, зерновое сорго; черный пар, озимая пшеница, яровой ячмень, нут, кукуруза; черный пар, озимая пшеница, кукуруза, нут, яровой ячмень; черный пар, озимая пшеница, зерновое сорго, нут, яровая пшеница.

Учет урожайности осуществляли методом прямого комбайнирования, путём прокосов на каждой делянке отдельно. Основные результаты исследований подвергали статистической обработке методом дисперсионного анализа по Б.А. Доспехову [9] с использованием программы AGROS версии 2.09.

Основные результаты

Наиболее высокая продуктивность среди всех схем изучаемых севооборотов получена в пятипольных и четырехпольных с включением зернобобовых и поздних культур. Выход зерна с 1 гектара пашни в них составил 1,70-1,81.

В трехпольных севооборотах по выходу зерна максимальные показатели получены при включении в структуру посевных площадей поздних культур, таких как зерновое сорго и кукуруза (см. таблицу 1). В сухие годы различия по продуктивности при разных наборах культур в севооборотах выражены сильнее, чем в средние и влажные. Таким образом, выход зерна с 1 гектара пашни в зернопаровых севооборотах составил 0,51-0,52 т, а в зернопаропропашных 0,80-0,92 т. В средние годы в севооборотах с включением ранних яровых культур продуктивность составила 1,26-1,29 т/га. В вариантах с включением зернового сорго и кукурузы средняя продуктивность составила 1,62 т/га и 1,73 т/га соответственно. Во влажные годы эффективность севооборотов оказалась выше. В севооборотах с яровой пшеницей и ячменем выход зерна с 1 гектара пашни варьировал в пределах 1,46-1,53 т, в севооборотах с зерновым сорго и кукурузой – 1,96-2,22 т, соответственно.

Таблица 1 – Продуктивность трехпольных севооборотов в зависимости от набора культур в разные по увлажнению годы (2008-2019 гг.)

Годы	Набор культур, т			
	пар, озимая пшеница, яровая пшеница	пар, озимая пшеница, яровой ячмень	пар, озимая пшеница, кукуруза	пар, озимая пшеница, зерновое сорго
Влажные, среднее за 3 года (2008,2013, 2017 гг.)	1,46	1,53	2,22	1,96
p=6,82%, Fфакт=8,783*, НСП05=0,422				
Средние, среднее за 6 лет (2009, 2014-2016, 2018, 2019 гг.)	1,42	1,41	1,96	1,79
p=3,66%, Fфакт=20,987*, НСП05=0,181				
Сухие, среднее за 3 года (2010-2012 гг.)	0,52	0,51	0,92	0,80
p=6,08%, Fфакт=23,701*, НСП05=0,145				

В четырехпольных севооборотах выход зерна с 1 гектара пашни был выше, чем в трехпольных, что обусловлено включением сои и снижения доли черного пара до 25% (см. таблицу 2). При рассмотрении результатов исследований в разные по увлажнению годы, в зернопаропропашных севооборотах также выявлено превышение показателей в сравнении с зернопаровыми севооборотами, различия по выходу зерна существенны на всех вариантах чередования культур. В засушливые годы выход зерна в севооборотах с включением ранних яровых культур варьировал в пределах 0,58-0,59 т/га, в севооборотах с включением поздних культур – 0,83-0,88 т/га. В средние по увлажнению годы разница в продуктивности экспериментальных севооборотов была менее значительной. В вариантах с включением яровой пшеницы и ячменя продуктивность составляла 1,43-1,47 т/га, с включением зернового сорго и кукурузы – 1,69-1,79 т/га, соответственно. Во влажные годы получены максимальные показатели по всем вариантам опыта. В зернопаровых севооборотах выход зерна с 1 гектара пашни составил 2,12 т в севооборотах с ячменем, 2,14 т в севооборотах с яровой пшеницей. Включение поздних культур значительно повышает продуктивность агроценозов. Выход зерна составил 2,43 т/га в севооборотах с зерновым сорго и 2,61 т/га в севооборотах с включением кукурузы.

Таблица 2 – Продуктивность четырехпольных севооборотов в зависимости от набора культур в разные по увлажнению годы (2008-2019 гг.)

Годы	Набор культур, т			
	пар, озимая пшеница, соя, яровая пшеница	пар, озимая пшеница, соя, яровой ячмень	пар, озимая пшеница, соя, кукуруза	пар, озимая пшеница, соя, зерновое сорго
Влажные, среднее за 3 года (2008,2013, 2017 гг.)	2,10	2,06	2,53	2,32
p=2,22%, Fфакт=18,828*, НСП05=0,173				
Средние, среднее за 6 лет (2009, 2014-2016, 2018, 2019 гг.)	1,47	1,44	1,87	1,73
P=3,48%, Fфакт=13,660*, НСП05=0,170				
Сухие, среднее за 3 года (2010-2012 гг.)	0,59	0,58	0,88	0,83
P=3,65%, Fфакт=34,968*, НСП05=0,091				

В пятипольных севооборотах отмечен высокий уровень показателей продуктивности на всех вариантах, что связано с присутствием кукурузы и зернового сорго во всех севооборотах, а также с включением нута и снижением доли черного пара до 20 % (см. таблицу 2). При этом выше эффективность схем с включением кукурузы. В среднем выход зерна с 1 га пашни в таких севооборотах составил 1,79-1,81 т. Продуктивность севооборотов с включением зернового сорго во втором и пятом поле севооборотов составляет 1,70-1,73 т/га.

Таблица 3 – Продуктивность пятипольных севооборотов в зависимости от набора культур в разные по увлажнению годы (2008-2019 гг.)

Годы	Набор культур, т			
	пар, озимая пшеница, яровая пшеница	пар, озимая пшеница, яровой ячмень	пар, озимая пшеница, кукуруза	пар, озимая пшеница, зерновое сорго
Влажные, среднее за 3 года (2008,2013, 2017 гг.)	2,51	2,64	2,68	2,57
p=1,60%, Fфакт=3,251, Fфакт<Fтеор				
Средние, среднее за 6 лет (2009, 2014-2016, 2018, 2019 гг.)	1,81	1,88	1,89	1,81
p=1,23%, Fфакт=3,647*, HCP05=0,068				
Сухие, среднее за 3 года (2010-2012 гг.)	0,80	0,85	0,85	0,81
p=3,12%, Fфакт=1,209, Fфакт<Fтеор				

При рассмотрении продуктивности пятипольных севооборотов в разные по увлажнению годы выявлено, что разница в данных между годами существенна. В сухие годы не выражены различия между вариантами опыта, выход зерна составил 0,80-0,85 т/га. Во влажные годы продуктивность севооборотов с включением зернового сорго составила 2,51-2,57 т/га, с включением кукурузы 2,64-2,68 т/га. В средние годы наблюдается значимое различие между вариантами, продуктивность составляет 1,81-1,89 т/га.

Наши результаты показали, что включение поздних культур, способных формировать стабильные урожаи в разные по метеорологическим условиям годы, позволяет повысить эффективность агроэкосистем в засушливых условиях. Учеными ФГБНУ "ФАНЦ Юго-Востока" также были проведены исследования по выявлению возможности повышения устойчивости производства зерна путем использования зерновых культур со смещением по времени прохождением межфазных периодов в севооборотах с различным удельным весом парового поля и сельскохозяйственных культур (озимая пшеница, яровая пшеница, просо). Выявлено, что для повышения устойчивости сельскохозяйственного производства необходимо возделывать в засушливых условиях культуры различных биогрупп – озимые, ранние яровые и поздние [10].

Заключение

В ходе исследований установлено, что для достижения оптимальной эффективности агроценозов в условиях засушливого климата необходимо включение в структуру посевных площадей поздних культур, таких как кукуруза и зерновое сорго, способных формировать стабильные урожаи в разные по метеоусловиям годы. Также целесообразно включение в структуру посевных площадей зернобобовых культур, повышающих эффективность севооборотов и способствующих сохранению почвенного плодородия. Рекомендуется использование короткоротационных севооборотов со следующим чередованием культур: пар, озимая пшеница, соя, зерновое сорго: пар, озимая пшеница, соя, кукуруза: черный пар, озимая пшеница, яровая пшеница, нут, зерновое сорго; черный пар, озимая пшеница, яровой ячмень, нут, кукуруза; черный пар, озимая пшеница, кукуруза, нут, яровой ячмень; черный пар, озимая пшеница, зерновое сорго, нут, яровая пшеница. Такие севообороты обеспечивают получение 1,65-1,81 тонн зерна с 1 гектара пашни. Многолетними исследованиями подтверждается, что при включении в структуру посевных площадей широкого набора культур, соблюдая традиционных технологий обработки почвы, возможно получение продукции, исключая применение пестицидов и без нарушения экологического баланса в природе.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов – М.: Книга по Требованию, 2012. – 352 с.
2. Wieme R.A. Agronomic and economic performance of organic forage, quinoa, and grain crop rotations in the Palouse region of the pacific northwest, USA. / R.A. Wieme // *Agricultural Systems*. – 2020. – 177. – p. 1-13.
3. Toigildin A. Ecological role of crop rotation in the efficient use of agricultural territories of the forest-steppe zone of the Volga region. / A. Toigildin, V. Morozov, M. Podsevalov et al. // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – 1. – p. 01014.
4. Gomiero T. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. / T. Gomiero, D. Pimente // *Critical Reviews In Plant Sciences*. – 2011. – 30(1/2). – p. 95-124.
5. Lechenet M. Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming. / M. Lechenet, V. Bretagnolle, C. Bockstaller et al. // *PLoS ONE*. – 2014. – 9(6). – p. 1014.
6. Плаксина В.С. Биоэнергетическая эффективность включения зернового сорго в севообороты. / В.С. Плаксина // *Орошаемое земледелие*. – 2021. – 1. – с. 33-38.
7. Плескачев Ю.Н. О севооборотах в Нижнем Поволжье. / Ю.Н. Плескачев, А.Н. Сухов // *Земледелие*. – 2013. – 2. – с. 3-5.

8. Курдюков Ю.Ф. Повышение продуктивности и устойчивости агроэкосистем в степной зоне Поволжья. / Ю.Ф. Курдюков, Н.Г. Левицкая, М.Ю. Васильева // Аграрная наука. – 2014. – 3. – с. 10-11.

9. Плаксина В.С. Эффективность включения кукурузы и зернового сорго в севообороты с короткой ротацией в засушливых условиях Нижнего Поволжья. / В.С. Плаксина, А.Н. Асташов, Ю.В. Бочкарева и др. // Успехи современного естествознания. – 2020. – 12. – с. 36-41.

10. Азизов З.М. Эффективность производства зерна в севооборотах засушливой степи Нижнего Поволжья. / З.М. Азизов, В.В. Архипов, И.Г. Имашев // Аграрный научный журнал. – 2021. – 2. – с. 4-8.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dospexov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results)] / B.A. Dospexov – M.: Kniga po Trebovaniyu, 2012. – 352 p. [in Russian]

2. Wieme R.A. Agronomic and economic performance of organic forage, quinoa, and grain crop rotations in the Palouse region of the Pacific Northwest, USA. / R.A. Wieme // Agricultural Systems. – 2020. – 177. – p. 1-13.

3. Toigildin A. Ecological role of crop rotation in the efficient use of agricultural territories of the forest-steppe zone of the Volga region. / A. Toigildin, V. Morozov, M. Podsevalov et al. // E3S Web of Conferences. – 2020. – 1. – p. 01014.

4. Gomiero T. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. / T. Gomiero, D. Pimente // Critical Reviews In Plant Sciences. – 2011. – 30(1/2). – p. 95-124.

5. Lechenet M. Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming. / M. Lechenet, V. Bretagnolle, C. Bockstaller et al. // PLoS ONE. – 2014. – 9(6). – p. 1014.

6. Plaksina V.S. Bioenergeticheskaya effektivnost' vklyucheniya zernovogo sorogo v sevooboroty' [Bioenergeticheskaya effektivnost' vklyucheniya zernovogo sorogo v sevooboroty]. / V.S. Plaksina // Oroschaemoe zemledelie [Irrigated agriculture]. – 2021. – 1. – p. 33-38. [in Russian]

7. Pleskachev Yu.N. O sevooborotax v Nizhnem Povolzh'e [About crop rotations in the Lower Volga region]. / Yu.N. Pleskachev, A.N. Suxov // Zemledelie [Agriculture]. – 2013. – 2. – p. 3-5. [in Russian]

8. Kurdyukov Yu.F. Povyshenie produktivnosti i ustojchivosti agroekosistem v stepnoj zone Povolzh'ya [Increasing the productivity and sustainability of agroecosystems in the steppe zone of the Volga region]. / Yu.F. Kurdyukov, N.G. Leviczka, M.Yu. Vasil'eva // Agrarnaya nauka [Agricultural science]. – 2014. – 3. – p. 10-11. [in Russian]

9. Plaksina V.S. Effektivnost' vklyucheniya kukuruzy' i zernovogo sorogo v sevooboroty' s korotkoj rotaciej v zasushlivi'x usloviyax Nizhnego Povolzh'ya [The successes of modern natural science]. / V.S. Plaksina, A.N. Astashov, Yu.V. Bochkareva et al. // Uspexi sovremennogo estestvoznaniya [The effectiveness of the inclusion of corn and grain sorghum in crop rotations with short rotation in the arid conditions of the Lower Volga region]. – 2020. – 12. – p. 36-41. [in Russian]

10. Azizov Z.M. Effektivnost' proizvodstva zerna v sevooborotax zasushlivoj stepi Nizhnego Povolzh'ya [Efficiency of grain production in crop rotations of the arid steppe of the Lower Volga region]. / Z.M. Azizov, V.V. Arxipov, I.G. Imashev // Agrarnyj nauchnyj zhurnal [Agrarian Scientific Journal]. – 2021. – 2. – p. 4-8. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.024>

НОВЫЕ ЯРОВЫЕ ПШЕНИЧНО-ПЫРЕЙНЫЕ ГИБРИДЫ, СОЗДАННЫЕ В ОТДЕЛЕ ОТДАЛЕННОЙ ГИБРИДИЗАЦИИ ГЛАВНОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА ИМ. Н.В. ЦИЦИНА РАН

Научная статья

Погост А.А.^{1,*}, Лошакова П.О.², Клименков Ф.И.³, Клименкова И.Н.⁴¹ ORCID: 0000-0001-7042-7745;² ORCID: 0000-0002-2838-7900;³ ORCID: 0000-0002-2556-7287;⁴ ORCID: 0000-0001-9370-4442;^{1, 2, 3, 4} Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (alinapogost[at]gmail.com)

Аннотация

В статье представлены результаты исследований, целью которых является расширение генетического потенциала яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) за счёт интрогрессии в её геном наследственного материала пырея с помощью «мостика» – новых образцов \times *Trititrigia* ($2n=56$), являющихся донорами высокого качества зерна. В отделе отдаленной гибридизации Главного ботанического сада Российской академии наук получены новые гибридные растения. Скрещивания и дальнейшая селекционная работа проводятся в двух направлениях: « \times *Trititrigia* \times яровые пшенично-пырейные гибриды (ППГ)» и «яровая мягкая пшеница \times \times *Trititrigia*». Все гибриды, начиная с первых поколений, в той или иной степени фертильны. Существенным отличием новых гибридов от \times *Trititrigia* является лёгкий обмолот, характерный для подавляющего большинства образцов с первых поколений. В комбинации скрещивания « \times *Trititrigia* \times яровые пшенично-пырейные гибриды (ППГ)» получен и изучается урожай образцов шестого поколения (F_6). В комбинации «яровая мягкая пшеница \times \times *Trititrigia*» получено четвертое (F_4) поколение гибридных растений. Продолжаются скрещивания различных сортов яровой мягкой пшеницы с перспективными для селекции на качество образцами \times *Trititrigia*. В обоих вариантах скрещивания происходит интенсивный формообразовательный процесс, затрагивающий разные признаки и свойства гибридных растений и предоставляющий большие возможности для дальнейшей селекционной работы.

Ключевые слова: селекция пшеницы; яровая мягкая пшеница; яровые пшенично-пырейные гибриды, пырей; *Elymus farctus*; \times *Trititrigia*; отдаленная гибридизация.

ON THE NEW SPRING WHEAT-WHEATGRASS HYBRIDS CREATED IN THE DEPARTMENT OF REMOTE HYBRIDIZATION OF THE TSYTSIN MAIN MOSCOW BOTANICAL GARDEN OF ACADEMY OF SCIENCES

Research article

Pogost A.A.^{1,*}, Loshakova P.O.², Klimentov F.I.³, Klimentkova I.N.⁴¹ ORCID: 0000-0001-7042-7745;² ORCID: 0000-0002-2838-7900;³ ORCID: 0000-0002-2556-7287;⁴ ORCID: 0000-0001-9370-4442;^{1, 2, 3, 4} Tsytsin Main Moscow Botanical Garden of Academy of Sciences, Moscow, Russia

* Corresponding author (alinapogost[at]gmail.com)

Abstract.

The article presents the results of studies aimed at expanding the genetic potential of soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) by introgression of hereditary wheatgrass material into its genome using a "bridge" - new samples of \times *Trititrigia* ($2n=56$), which are donors of high quality grain. New hybrid plants have been obtained in the Department of Remote Hybridization of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. Crosses and further breeding work are carried out in two trajectories: " \times *Trititrigia* \times spring wheat-wheatgrass hybrids" and "soft spring wheat \times \times *Trititrigia*". All hybrids, starting from the first generations, are more or less fertile. A significant difference between the new hybrids and \times *Trititrigia* is the light threshing characteristic of the vast majority of samples from the first generations. In the combination of crossing " \times *Trititrigia* \times spring wheat-wheatgrass hybrids", the study obtained and examined a crop of sixth generation samples (F_6). In the combination of "soft spring wheat \times \times *Trititrigia*", the fourth (F_4) generation of hybrid plants was obtained. Crosses of various varieties of soft spring wheat with promising samples of \times *Trititrigia* for breeding for quality are also continuing. In both variants of crossing, there is an intensive formative process affecting different characteristics and properties of hybrid plants and providing great opportunities for further breeding work.

Keywords: wheat breeding; soft spring wheat; spring wheat-wheatgrass hybrids, wheatgrass; *Elymus farctus*; \times *Trititrigia*; distant hybridization.

Введение

Необходимость расширения генетического пула мягкой пшеницы за счет отдаленной гибридизации – общепризнанный факт [1], [2], [3]. Она обусловлена, прежде всего, угрозой снижения продуктивности основного хлебного злака в связи с возникновением новых рас патогенов, преодолевающих имеющиеся гены устойчивости, неблагоприятным влиянием абиотических факторов, связанных с загрязнением окружающей среды, и изменениями климата [4], [5], [6]. Источниками генов устойчивости и адаптивности для новых сортов мягкой пшеницы являются её дикие сородичи, и потребность в использовании этих генов возрастает [7], [8], [9]. Уже сейчас некоторые ученые задумываются о необходимости защиты и сохранения для будущего таких родов, как *Elymus* L., *Leymus* Hochst.,

Thinopyrum Á. Löve, и других, являющихся источниками полезных свойств для пшеницы, в условиях дикой природы, либо путём создания синтетических геномно-замещенных и геномно-добавленных форм растений [10], [11], [12].

В отделе отдаленной гибридизации Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН работа по созданию мягкой пшеницы, обогащенной генетическим материалом диких сородичей, проводится в течение многих лет с использованием пырея среднего (*Elytrigia intermedia* (Host) Nevski) и удлиненного (*E. elongata* (Host) Nevski). Именно с привлечением этих видов пырея была создана многолетняя пшеница – *×Trititrigia* [13], [14], по современной классификации *×Trititrigia cziczinii* Tsvet. [15]. В своём геноме этот род содержит все 42 хромосомы пшеницы и 14 хромосом пырея.

В последние годы исследования по созданию новых сортов пшеницы, содержащей наследственный материал пырея, в ГБС РАН расширили за счет привлечения в гибридизацию не использовавшегося ранее в подобных скрещиваниях вида пырея – *Elymus farctus* (Viv.) Runemark ex Melderis [16]. Так как при прямой гибридизации пшеницы с пыреем процент удачной гибридизации довольно низок и нестабилен, гибриды, наряду с полезными качествами, получают от «дикарей» нежелательные признаки, на избавление от которых уходит длительное время. Для передачи наследственного материала пырея пшенице использовали «мостики» (иначе говоря, посредника), в качестве которого служит *×Trititrigia*, скрещивающаяся с пшеницей легче, чем пырей, и свободная от большей части нежелательных признаков пырея. На первом этапе работы по интрогрессии наследственного материала *E. farctus* в геном мягкой пшеницы была создана коллекция потомков 63-хромосомного гибрида, полученного в комбинации *×Trititrigia* × *E. farctus*, которые мы называем f-гибридами. Образцы, составляющие рабочую коллекцию, получали при свободном опылении 63-хромосомного гибрида F₁, являвшегося частично фертильным, в течение трех лет. Именно фактом свободного опыления объясняется большое разнообразие в потомстве полученных гибридов. В настоящее время имеется свыше сотни образцов F₆-F₈, различающихся по целому ряду признаков. Среди коллекционных образцов выщепляются растения пшеничного типа. Разностороннее изучение двух подобных образцов (f9714 и f11814) [16], а также образца 1/3 (неопубликованные данные) показало, что изученные гибриды можно отнести к роду *×Trititrigia*. Они имеют 56 хромосом, из которых – 42 хромосомы пшеницы и 14 хромосом пырея. К сожалению, пырей является сложным для цитогенетического исследования организмом, и пока мы не можем с точностью определить, хромосомы какого вида пырея и в каком сочетании входят в состав новых образцов *×Trititrigia*. Установлено, что эти гибриды имеют высокое качество зерна, соответствуют требованиям, которыми должны обладать растения-доноры [17] и могут использоваться в селекции пшеницы на качество [18].

Первые сорта однолетних яровых пшенично-пырейных гибридов (ППГ) в отделе отдаленной гибридизации ГБС РАН были получены в основном непосредственным скрещиванием мягкой пшеницы с пыреем. Затем стали использовать трититригию (*×Trititrigia*) как компонент для скрещивания с мягкой пшеницей (в основном озимой) с целью передать часть пырейного генома от трититригии мягкой пшенице [19]. В связи с тем, что *×Trititrigia* относительно легко скрещивается и с мягкой пшеницей и с ППГ, которые, как и мягкая пшеница, имеют 42 хромосомы, подобные скрещивания были признаны перспективными и даже предложено создание гибридных популяций с участием ППГ и мягкой пшеницы [20]. В связи с вышесказанным в 2016 г. была начата работа по гибридизации новых образцов *×Trititrigia* с яровыми пшенично-пырейными гибридами (ППГ) и сортами яровой пшеницы.

Цель исследования: создание сортов и линий яровой мягкой пшеницы, обогащенных генетическим материалом пырея с комплексом ценных хозяйственных признаков, полученных в результате скрещивания новых образцов *×Trititrigia* с сортами яровой мягкой пшеницы и яровыми ППГ.

В данной статье не ставится задача детального селекционно-генетического исследования полученных в результате нашей работы образцов; по нашему мнению, это задача ближайшего будущего.

Материал и методика исследований

Исследования проводили в Истринском районе Московской области в отделе отдаленной гибридизации Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН в 2016-2021 гг.. Растения выращивали в полевых условиях на дерново-подзолистых тяжело-суглинистых почвах, а также в условиях защищенного грунта (фитотрона).

Материалом для исследования являлись следующие комбинации скрещивания:

1. Новые образцы *×Trititrigia* с яровыми ППГ – f9714 × ППГ107, f9714 × ППГ269, f9714 × ППГ199, f11814 × ППГ107. В этих комбинациях скрещивания новые перспективные образцы *×Trititrigia* - f9714 и f11814 использовали в качестве материнских растений. Опылителями служили яровые пшенично-пырейные гибриды, из которых ППГ107 отличается хорошим качеством зерна, а ППГ269 и ППГ199 – скороспелостью. В текущем 2021 году собран урожай шестого поколения (F₆), представленного образцами, выделившимися ценными признаками – слабым поражением полевыми инфекциями, устойчивых к полеганию, имеющих хорошо выполненное крупное зерно. Задачу выявления самых урожайных образцов на данном этапе исследования не ставили, однако браковали заведомо малопродуктивные образцы.

2. Другая группа комбинаций скрещивания – это сорта яровой мягкой пшеницы, опыленные пылью f9714. Гибриды первого поколения были получены в 2017 г. В 2020 году получены семена растений F₃ в следующих комбинациях: ‘Иргина’ × f9714, ‘Дарья’ × f9714, ‘Приокская’ × f9714, ‘Эстер’ × f9714, ‘Полюшко’ × f9714. Во всех указанных комбинациях скрещивания отмечали интенсивный формообразовательный процесс. В текущем 2021 году в полевых условиях было выращено четвертое поколение (F₄) указанных гибридов. В 2020 году проведены скрещивания яровой мягкой пшеницы ‘Wild Cat’ и ‘Blue Sky’ с новыми образцами *×Trititrigia* и получены зерновки в комбинациях ‘Wild Cat’ × образец 1/3, ‘Wild Cat’ × f11814, ‘Blue Sky’ × f11814, ‘Blue Sky’ × f9714. Растения F₁ выращены в условиях защищенного грунта. Во всех комбинациях скрещивания гибридизация проводилась методом «Твэл» с помощью нанесения пыльцы на рыльца цветков с предварительно удаленными пыльниками. Кастрированные колосья изолировали.

Погодные условия весенне-летнего периода 2020 г характеризовались обилием осадков. По данным Ново-Иерусалимской метеостанции, в мае в регионе выпало 160 мм осадков, то есть более трех месячных норм.

Среднемесячная температура была на 1,5 градуса ниже нормы. В июне выпало 159 мм осадков. Показатели превысили две месячные нормы, но температура повысилась, и её среднемесячное значение превысило обычное на 2 градуса. В июле выпало 162 мм, что составляет 172% от месячной нормы. Температура была на 0,5⁰ ниже нормы. В августе дожди прекратились; сумма осадков составила 41% от нормы, среднемесячная температура была на 0,6⁰ выше нормы.

Погодные условия в начале сезона 2021 г. не были благоприятными для яровых гибридов. Из-за дождливой погоды посев задержался до середины мая, а со середины июня наступила жаркая и сухая погода, прерывавшаяся кратковременными ливневыми дождями. Средняя температура июня составила 19,2°, суммарное количество осадков за 14 дней месяца составило 102 мм, во второй половине месяца было 5 дней с осадками, общая сумма которых составила 18 мм при температуре воздуха около 30° (максимальное значение 33,6°). За первые 15 дней июля ливневые дожди выпали дважды (01.07 и 15.07). Дожди разной степени интенсивности прошли в конце месяца. Погода августа была тёплой, но температура не поднималась выше 30°. Дождливыми были два дня (02.08 и 06.08).

Результаты исследований и их обсуждение

Данная работа отличается от предшествующих работ компонентами, используемыми для скрещиваний, и направлена на передачу части генетического материала пырея яровой мягкой пшенице. В современных селекционно-генетических исследованиях большое внимание уделяется изысканию эффективных способов передачи растениям-реципиентам малых доз чужеродного генетического материала, что минимизирует передачу культурным растениям, наряду с полезными свойствами дикарей, нежелательных для селекционера признаков [6]. Предшествующий опыт показывает, что такой синтетический организм, как гибридный род *×Trititrigia*, который в процессе селекции уже избавлен от многих негативных признаков, присущих пырею, также с успехом можно использовать для скрещивания с пшеницей [18].

Таким образом, на данный момент имеется две категории гибридов *×Trititrigia* с мягкой пшеницей, полученных в результате реципрокных скрещиваний: f гибриды × яровые ППГ и сорта яровой мягкой пшеницы × f гибриды.

В комбинации f гибриды × яровые ППГ ожидаемое число хромосом у гибридных растений первого поколения (F_1) – $2n=49$. Формообразовательный процесс в последующих поколениях интенсивный. Он затрагивает высоту растений, длину и форму колоса, форму и крупность зерновок, период вегетации, восприимчивость к патогенам и т.д. Примечательно, что уже в первом поколении у этих гибридов появляется такой полезный признак, как «лёгкий обмолот», отличающий их от материнских растений, характеризующихся более тугим обмолотом, и сохраняющийся в последующих поколениях. Число озимых форм варьирует в зависимости от образца. На данном этапе работы с комбинацией «f гибриды × яровые ППГ» (F_6) были отбракованы озимые и позднеспелые формы, внимание уделялось таким признакам как урожайность, скороспелость и устойчивость к полевым инфекциям.

По результатам технологического анализа, проведенного для комбинации «f гибриды × яровые ППГ» в F_3 , гибриды f9714 × ППГ107 обладали более высокими хлебопекарными качествами, чем f9714 × ППГ269, но и те и другие имели лучшие хлебопекарные качества, чем опылители [21]. В 2020 году на стадии всходов и кущения все без исключения образцы были поражены желтой ржавчиной. Образцы, поражение которых составило 3 балла и выше, были удалены на стадии кушения. Основная масса образцов имела степень поражения (1-2 балла); на взрослых растениях желтая ржавчина не наблюдалась. В связи с очень неблагоприятными погодными условиями в период вегетации, наблюдалось массовое поражение посевов септориозом. Для дальнейшей работы были отобраны более скороспелые растения со слабой и средней степенью поражения колоса (1-3 балла). Меньшая степень поражения наблюдалась у f9714 × ППГ269, что, очевидно, связано с большим числом раннеспелых растений.

В категории «сорта яровой мягкой пшеницы × f гибриды» (гибридизация проведена в 2017 г., ожидаемое число хромосом в первом поколении $2n=49$), в 2021 г. получены семена гибридов четвертого поколения, образцов 'Иргина' × f 9714, 'Дарья' × f9714, 'Эстер' × f9714, 'Приокская' × f9714, 'Полушко' × f9714. У всех без исключения образцов хороший обмолот. Отмечено заметное разнообразие по форме колоса. В связи с тем, что видимого поражения какими-либо болезнями не наблюдалось, разницы между образцами по этому признаку не отмечено.

В 2020 году получены гибридные семена 'Wild Cat' × образец 1/3, 'Wild Cat' × f11814, 'Blue Sky' × f11814, 'Blue Sky' × f9714. Ожидаемое число хромосом у этих гибридов также $2n=49$. Результаты гибридизации показали, что процент удачи при скрещивании 'Blue Sky' с образцом f 9714 составил 10,7%, при всхожести гибридных зерновок 66,67%, у 'Blue Sky' × f11814 – 26,9% при всхожести 100%. В комбинации сорт Wild Cat × образец 1/3 процент удачи составил 27,1% при всхожести 100%.

Гибридные растения F_1 культивировали в условиях защищенного грунта. Все гибриды первого поколения были безостыми. Первыми колосья появились у 'Wild Cat' × образец 1/3. Все гибриды были фертильными и завязали полноценное зерно. Озерненность отдельных колосьев составляла от 11 до 28%. У всех растений после удаления созревших колосьев наблюдалось отрастание новых генеративных побегов, что подтверждает наличие в гибридных растениях наследственного материала диких сородичей (рис. 1).



Рис.1 – Отрастание генеративных побегов у гибридных растений из комбинации ‘Blue Sky’ × f11814

Заключение

В отделе отдаленной гибридизации Главного ботанического сада им. Н.В.Цицина РАН получены и изучаются гибриды от скрещивания трех образцов новой формы ×*Trititrigia* - f9714, f11814 и образца 1/3 с яровыми пшенично-пырейными гибридами и сортами яровой мягкой пшеницы.

Работа проводится в двух направлениях: f гибриды скрещиваются с яровыми ППГ и различные сорта яровой мягкой пшеницы скрещиваются с f гибридами.

В комбинации «f гибриды × яровые ППГ» при интенсивном формообразовательном процессе наблюдавшемся ряду признаков у всех образцов, образец f9714 × ППГ269 показал себя как более скороспелый и меньше поражен септориозом.

В комбинации «сорта яровой мягкой пшеницы × f гибриды», начиная с F₃, наблюдалось заметное разнообразие по форме колоса.

В обеих комбинациях – «f-гибриды × яровые ППГ» и «сорта яровой мягкой пшеницы × f гибриды», полученные растения уже с первого поколения имели лёгкий обмолот зерна в отличие от f гибридов.

Получены новые гибриды яровой пшеницы ‘Wild Cat’ × образец 1/3, ‘Wild Cat’ × f11814, ‘Blue Sky’ × f11814, ‘Blue Sky’ × f9714. Скрещивания показали довольно высокий процент удачи: при скрещивании ‘Blue Sky’ с образцом f 9714 он составил 10,7%, при всхожести гибридных зерновок 66,67% , у ‘Blue Sky’ × f11814 – 26,9% при всхожести 100%. В комбинации сорт Wild Cat × образец 1/3 процент удачи составил 27,1% при всхожести 100%.

Выращенные в условиях защищенного грунта (фитотрон) гибриды первого поколения ‘Wild Cat’ × образец 1/3, ‘Wild Cat’ × f11814, ‘Blue Sky’ × f11814, ‘Blue Sky’ × f9714 были фертильными и имели выполненные зерновки. Озерненность колосьев составляла от 11 до 28%. У всех растений наблюдалось послеборочное отрастание генеративных побегов, что свидетельствует об интрогрессии генетического материала диких сородичей в геном мягкой пшеницы.

Результаты данной работы показывают реальную возможность расширения генетического потенциала яровой мягкой пшеницы за счет интрогрессии в её геном наследственного материала пырея путём гибридизации мягкой пшеницы с ×*Trititrigia*.

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания ГБС РАН (№19-119012390082-6).

Funding

The work was carried out in accordance to Institutional research project (№19-119012390082-6).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Cox T.S., Breeding perennial grain crops / T.S. Cox, M. Bender, C. Picone et al. // Critical reviews in Plant Sciences. 2002. №21 (2). P. 59-91.

2. Упелник В.П. Наследие академика Н.В. Цицина – современное состояние и перспективы использования коллекции промежуточных пшенично-пырейных гибридов / В.П. Упелник, В.И. Белов, Л.П. Иванова // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2012. №3. С. 667-674.
3. Крупин П.Ю. Использование генетического потенциала многолетних дикорастущих злаков в селекционном улучшении пшеницы / П.Ю. Крупин, М.Г. Дивашук, Г.И. Карлов // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54, №3. С.409-425.
4. Давоян Р.О. Интрогрессивные линии мягкой пшеницы с генетическим материалом *Agropyron glaucum* / Р.О. Давоян, И.В. Бебякина, Э.Р. Давоян и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015. №19(1). С. 83-90.
5. Леонова И.Н. Влияние чужеродного генетического материала на проявление хозяйственно важных признаков мягкой пшеницы (*T. aestivum* L.) / И.Н. Леонова // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. №22(3). С. 321-328.
6. Хлебцова Л.П. Рекомбиногенез и продуктивные свойства петаплоидных гибридов пшеницы / Л.П.Хлебцова, Н.В.Барышева // Acta Biologica Sibirica. 2016. №2 (3). С. 61-72.
7. Дивашук М.Г. Молекулярно-генетический анализ состава запасных белков в образцах коллекции пшенично-пырейных гибридов / М.Г.Дивашук, П.Ю.Крупин, М.С.Баженов и др. // Известия ТСХА. 2012. № 5. С. 29-37.
8. Сибикеев С.Н. Сравнительный анализ 6Ag¹ и 6Ag² хромосом *Agropyron intermedium* (Host) Beav у сортов и линий мягкой пшеницы с пшенично-пырейными замещениями / С.Н.Сибикеев, Е.Д. Бадаева, Е.И. Гульятеева и др. // Генетика. 2017. Т53, №3. С. 298-309.
9. Li W. Development and characterization of wheat-sea wheatgrass (*Thinopyrum junceiforme*) amphiploids for biotic stress resistance and abiotic stress tolerance / W. Li, Q. Zhang, S. Wang et al. // Theoretical and Applied Genetics. 2019. №132. P. 163-175.
10. Новожилова О.А. Биохимическая специализация и эволюция в трибе Triticeae Dum. (Poaceae) / О.А. Новожилова, Л.П.Арефьева, Ю.М. Барашева и др. // Успехи современной биологии. 2014. Т.134, №2. С. 169-180.
11. Kumar A. Exploration of wheat wild relative diversity from Lahaul valley: a cold arid desert of Indian Himalayas / A. Kumar, A. Sharma, R. Sharma et al. // Cereal research communications. 2021. P. 1-16.
12. Давоян Р.О. Синтетические формы как основа для сохранения и использования генофонда диких сородичей мягкой пшеницы / Р.О.Давоян, И.В.Бебякина, О.Р.Давоян и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2012. Т.16, №1. С. 44-51.
13. Цицин Н.В. Многолетняя пшеница / Н.В.Цицин - М: Наука.1978. 288 с.
14. Иванова Л.П. Перспективы использования новой сельскохозяйственной культуры трититригии (*Trititrigia cziczinii* Tsvelev) в кормопроизводстве/ Л. П. Иванова, О. А. Щуклина, И. Н. Ворончихина // Кормопроизводство. 2020. №10. С. 13-16.
15. Цвелёв Н.Н. Злаки СССР / Н.Н. Цвелёв - Л: Наука. 1976. 788с.
16. Лошакова П.О. Междуродовые гибриды *Trititrigia cziczinii* x *Elymus farctus* и перспективы их использования в селекции / П.О. Лошакова, А.В. Фисенко, А.П. Калмыкова и др. // Достижения науки и техники АПК. 2018. № 9. С.28-31.
17. Гончаров Н.П. Сравнительная генетика пшениц и их сородичей / Гончаров Н.П. Новосибирск: ГЕО. 2012. 523 с.
18. Лошакова П.О. Новые перспективные гибриды для селекции мягкой пшеницы / П.О. Лошакова, Е.Д. Бадаева, М.М. Геворкян // Бюллетень Главного ботанического сада. 2020. №2. С. 69-79
19. Королёва Л.И. Селекция яровых пшенично-пырейных гибридов в отделе отдаленной гибридизации Главного ботанического сада им.Н.В.Цицина РАН / Л.И. Королёва, А.М. Дзюба // Тезисы докладов международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.В. Цицина Москва, 1998. С.350-352.
20. Королёва Л.И. Селекция 42-хромосомных пшенично-пырейных гибридов в Главном ботаническом саду РАН. / Л.И. Королёва, А.М. Дзюба // Отдаленная гибридизация. Результаты исследований. Москва. 2001. С.136-142.
21. Калмыкова Л.П. Гибриды младших поколений (*xTrititrigia* x *Elymus farctus*) x *Triticum aestivum* / Л.П. Калмыкова, П.О. Лошакова, А.В. Фисенко и др. // Бюллетень Главного ботанического сада. 2019. №4(205). С.48-56.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Cox T.S. Breeding perennial grain crops / M. Bender, C. Picone, D.L. Van Tassel // Critical reviews in Plant Sciences. / 2002. №21 (2). P. 59-91.
2. Upelnik V.P. Nasledie akademika N.V. Cicina – sovremennoe sostoyanie i perspektivy` ispol`zovaniya kollekcii promezhutochny`x pshenichno-py`rejny`x gibridov. [The legacy of academician N.V. Tsitsin - current state and prospects of using the collection of intermediate wheat-wheatgrass hybrids] / V.P.Upelnik, V.I.Belov, L.P. Ivanova // Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii.[Vavilov Journal of Genetics and Breeding]. 2012. №3. P. 667-674. [in Russian]
3. Krupin P.Yu. Ispol`zovanie geneticheskogo potenciala mnogoletnih dikorastushhix zlakov v selekcionnom uluchshenii pshenicy [Using the genetic potential of perennial wild-growing cereals in wheat breeding improvement] / P.Yu. Krupin, M.G. Divashuk, G.I.Karlov // Sel`skhozyajstvennaya biologiya. 2019. Vol. 54, №3. P. 409-425. [in Russian]
4. Davoyan R.O. Introgressivny`e linii myagkoj pshenicy s geneticheskim materialom *Agropyron glaucum* [Introgressive common wheat lines with *Agropyron glaucum* genetic material] / Davoyan R.O., Bebyakina I.V., Davoyan E`R. et al. // Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii[Vavilov Journal of Genetics and Breeding]. 2015. №19(1). P. 83-90. [in Russian]
5. Leonova I.N. Vliyanie chuzherodnogo geneticheskogo materiala na proyavleniekozyajstvenno vazhny`x priznakov myagkoj pshenicy (T. aestivum L.)[Influence of alien genetic material on the manifestation of economically important traits of common wheat (T. aestivum L.)] / I.N. Leonova // Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii [Vavilov Journal of Genetics and Breeding]. 2018. №22 (3). P. 321-328. [in Russian]
6. Xlebova L.P. Rekombinogenez i produktivny`e svojstva petaploidny`x gibridov pshenicy [Recombinogenesis and productive properties of tetraploid wheat hybrids] / L.P. Xlebova, N.V. Bary`sheva // Acta Biologica Sibirica. 2016. №2 (3). P. 61-72. [in Russian]

7. Divashuk M.G. Molekulyarno-geneticheskij analiz sostava zapasny`x belkov v obrazcah kolekcii pshenichno-py`rejny`x gibridov [Molecular genetic analysis of the composition of storage proteins in the samples of the collection of wheat-wheatgrass hybrids] / M.G.Divashuk, P.Yu.Krupin, M.S.Bazhenov et al. // Izvestiya TSXA. [Izvestia of Timiryazev Agricultural Academy] 2012. № 5. P. 29-37. [in Russian]
8. Sibikeev S.N. Sravnitel`ny`j analiz 6Ag1 i 6Ag2 xromosom Agropyron intermedium (Host) Beav u sortov i linij myagkoj pshenicy s pshenichno-py`rejny`mi zameshheniyami [Comparative analysis of 6Ag1 and 6Ag2 chromosomes of Agropyron intermedium (Host) Beav in varieties and lines of common wheat with wheat-wheatgrass substitutions] / S.N.Sibikeev, E.D. Badaeva, E.I. Gul`tyaeva et al. // Genetika [Genetics]. 2017. T53, №3. P. 298-309. [in Russian]
9. Li W. Development and characterization of wheat-sea wheatgrass (*Thinopyrum junceiforme*) amphiploids for biotic stress resistance and abiotic stress tolerance / W. Li, Q. Zhang, S. Wang et al. // Theoretical and Applied Genetics. 2019. №132. P. 163-175.
10. Novozhilova O.A. Bioximicheskaya specializaciya i e`voljuciya v tribe Triticeae Dum. (Poaceae)[Biochemical specialization and evolution in the tribe Triticeae Dum. (Poaceae)] / O.A. Novozhilova, L.P.Aref`eva, Yu.M. Barasheva et al. // Uspehi sovremennoj biologii.[Advances in modern biology]. 2014. Vol.134, №2. P. 169-180. [in Russian]
11. Kumar A. Exploration of wheat wild relative diversity from Lahaul valley: a cold arid desert of Indian Himalayas / A. Kumar, A. Sharma, R. Sharma et al. // Cereal research communications. 2021. P.1-16.
12. Davoyan R.O. Sinteticheskie formy` kak osnova dlya soxraneniya i ispol`zovaniya genofonda dikix sorodichej myagkoj pshenicy [Synthetic forms as a basis for the conservation and use of the gene pool of wild relatives of common wheat] / R.O.Davoyan, I.V.Bebyakina, O.R.Davoyan et al. // Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii [Vavilov Journal of Genetics and Breeding] 2012. Vol.16, №1. P. 44-51. [in Russian]
13. Cicin N.V. Mnogoletnyaya pshenicza [Perennial wheat]/ N.V.Cicin - M: Nauka.1978. 288 p. [in Russian]
14. Ivanova L.P. Perspektivy` ispol`zovaniya novoj sel`skoxozyajstvennoj kul`tury` trititrigii (xTrititrigia cziczinii Tsvelev) v kormoproizvodstve [Prospects for the use of a new crop of trititrigia (x Trititrigia cziczinii Tsvelev) in fodder production] / L. P. Ivanova, O. A. Shhuklina, I. N. Voronchixina // Kormoproizvodstvo. 2020. №10. P. 13-16. [in Russian]
15. Czvelyov N.N. Zlaki SSSR [Cereals of the USSR] / N.N. Czvelyov - L: Nauka. 1976. 788p. [in Russian]
16. Loshakova P.O. Mezhdrovny`e gibridy` Trititrigia cziczinii x Elymus farctus i perspektivy` ix ispol`zovaniya v selekcii [Intergeneric hybrids of Trititrigia cziczinii x Elymus farctus and prospects for their use in breeding] / P.O. Loshakova, A.V. Fisenko, A.P. Kalmy`kova et al. // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2018. № 9. P.28-31. [in Russian]
17. Goncharov N.P. Sravnitel`naya genetika pshenicz i ix sorodichej [Сравнительная генетика пшениц и их сородичей] / N.P. Goncharov - Novosibirsk: GEO. 2012. 523 p. [in Russian]
18. Loshakova P.O. Novy`e perspektivny`e gibridy` dlya selekcii myagkoj pshenicy [New promising hybrids for breeding common wheat] / P.O. Loshakova, E.D. Badaeva, M.M. Gevorkyan // Byulleten` Glavnogo botanicheskogo sada [Bulletin of the Main Botanical Garden]. 2020. №2. P. 69-79 [in Russian]
19. Korolyova L.I. Selekcija yarovy`x pshenichno-py`rejny`x gibridov v otdele otdalenoj gibrizacii Glavnogo botanicheskogo sada im.N.V.Cicina RAN [Breeding of spring wheat-wheatgrass hybrids in the department of distant hybridization of the Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences] / L.I. Korolyova, A.M. Dzyuba // Tezisy` dokladov mezhdunarodnoj konferencii, posvyashhennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.V. Cicina [Abstracts of the international conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician N.V. Tsitsin]. Moskva [Moscow]. 1998. P.350-352. [in Russian]
20. Korolyova L.I. Selekcija 42-xromosomny`x pshenichno-py`rejny`x gibridov v Glavnom botanicheskom sadu RAN [Selection of 42-chromosome wheat-wheatgrass hybrids in the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences]. / L.I. Korolyova, A.M. Dzyuba // Otdalennaya gibrizaciya. Rezul`taty` issledovanij [Remote hybridization. Research results] Moskva [Moscow]. 2001. P.136-142. [in Russian]
21. Kalmy`kova L.P. Gibridy` mladshix pokolenij (xTrititrigia x Elymus farctus) x Triticum aestivum [Younger generation hybrids (xTrititrigia x Elymus farctus) x Triticum aestivum] / L.P. Kalmy`kova, P.O. Loshakova, A.V. Fisenko et al. // Byulleten` Glavnogo botanicheskogo sada. [Bulletin of the Main Botanical Garden]. 2019. №4(205). P.48-56. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.025>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЗОН НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ
Научная статья

Симеониди Д.Д.*

ORCID: 0000-0001-6022-8793,

Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова, Владикавказ, Россия

* Корреспондирующий автор (artemida73[at]mail.ru)

Аннотация

В статье приводится анализ результатов исследований по изучению влияния антропогенных факторов на показатели безопасности продукции животного происхождения. Особый интерес, в рамках данного исследования, представляет изучение животных, являющихся чувствительным индикатором начальных стадий загрязнения тяжелыми металлами. Они аккумулируют элементы в доступных «биологически активных» формах и отражают фактический уровень загрязнения экосистем и, благодаря тесной связи с почвенными условиями и ограниченной территории обитания, могут быть хорошими индикаторами химического загрязнения биосферы. Изучено содержание ксенобиотиков, попадающих в продукты питания из внешней среды по следующей пищевой цепи: почва - растение – животное – человек.

Ключевые слова: тяжелые металлы, безопасность, ксенобиотики, окружающая среда.

**AN INVESTIGATION OF THE IMPACT OF ZONES OF ANTHROPOGENIC INFLUENCE
ON PRODUCT SAFETY INDICATORS**

Research article

Simeonidi D.D.*

ORCID: 0000-0001-6022-8793,

North Ossetian State University, Vladikavkaz, Russia

* Corresponding author (artemida73[at]mail.ru)

Abstract

The article provides an analysis of the results of research on the influence of anthropogenic factors on the safety indicators of animal products. Of particular interest in this study is the study of animals, which are a sensitive indicator of the initial stages of heavy metal pollution. They accumulate elements in accessible "biologically active" forms and reflect the actual level of pollution of ecosystems and, due to their close connection with soil conditions and limited habitat, can be good indicators of chemical pollution of the biosphere. The author also examines the content of xenobiotics entering food from the external environment along the following food chain: soil - plant - animal - human.

Keywords: heavy metals, safety, xenobiotics, environment.

Введение

По данным многочисленных исследований, на окружающую среду за последнее время оказывается усиленное антропогенное и, вследствие этого, техногенное воздействие. Уровень оказываемого воздействия ксенобиотиков на внешнюю среду прогнозируется с помощью следующих факторов: состав, происхождение вещества, его концентрация и способность к кумулятивным свойствам, а также к суммированию и сверхсуммированию эффектов. Врожденные аномалии, общая утомляемость организма, изменения, связанные с почечной недостаточностью, с опорно-двигательным аппаратом и другие отклонения, происходящие в организме человека, возникают также вследствие влияния загрязняющих внешнюю среду веществ [4].

Механизм попадания ксенобиотиков в человеческий организм связан со сложными пищевыми цепочками и схемами. Наиболее простой является схема, по которой происходит загрязнение через почву в растения, далее в организм животного и человека, как конечного звена пищевой цепи. Анализируя многочисленные исследования ряда авторов, о трансформации различных загрязнителей, в частности ионов тяжелых металлов, из почвы в растительное сырье, можно прогнозировать значительное загрязнение продукции тяжелыми металлами.

Основная часть

При оценке задач антропогенного, техногенного, а также социального развития республики Северная Осетия - Алания и города Владикавказа, как современного крупного многофункционального города с хорошо развитой промышленностью, большое место занимает охрана и улучшение состояния внешней среды, оказывающей значительное влияние на уровень жизни и здоровья, а также благосостояния населения республики и соседних регионов [8, С. 218 – 221].

В современных условиях одним из существенных направлений, определяющих здоровье младенцев, детей и взрослых, сохранения генофонда нации является обеспечение такого важного показателя, как безопасность сырья растительного и животного происхождения, и продуктов, получаемых из него.

При проведении ежегодного мониторинга внешней среды в республике и анализа ряда научных докладов специалистов, было выявлено, что за короткий срок значительно возросло количество загрязненного воздуха, водной среды и почв [1, С. 3 – 11].

Учитывая это, нами были поставлены задачи по определению в сырье животного происхождения, как объекта биосферы, ионов тяжелых металлов. Выбор хозяйств для проведения научно-хозяйственного опыта был обусловлен рядом факторов: различными агротехническими особенностями их расположения, особенностями источников загрязнения, метеорологическими особенностями, геохимическими факторами и ландшафтной обстановки в целом.

Перед началом экспериментальных работ было проведено распределение объектов исследований по различным техногенным зонам, в зависимости от удаленности от промышленных объектов и центра города. Вследствие этого было принято условное обозначение зон для исследований: зона 1 - густонаселенный район; зона 2 - район, в котором сконцентрировано промышленное производство республики; зона 3 - район, наиболее удаленный от промышленного центра и города; зона 4 - район, загрязненный нефтепродуктами.

Исследования на содержание загрязняющих веществ, в частности в мясном сырье крупного рогатого скота выращиваемом и вырабатываемом в различных зонах, проводилось в течение нескольких лет. В качестве материала использовалось мясо бычков в возрасте шести и восемнадцати месяцев. Все объекты находились в одинаковых условиях содержания и откорма. Часть экспериментальных исследований показана на рисунках 1 - 3.

Анализируя данные рисунка 1, показано следующее: показатели безопасности в мясе молодняка крупного рогатого скота в возрасте 6 месяцев не превышают допустимые уровни. Следует отметить, что во всех образцах присутствуют соли тяжелых металлов, причем в продукции, взятой из первой и четвертой техногенных зон, их содержание выше, чем во второй и третьей зонах. Данный результат носит закономерный характер, так как по анализу загрязнения воздуха и почвы первая и четвертая зоны являются наиболее загрязненными.

В образцах первой зоны отмечено значительное содержание таких металлов как медь (Cu) – концентрация этого элемента превышает в 19 и 39 раз соответственно; и свинец (Pb) – в 3 и 10 раз. Разница в концентрации таких тяжелых металлов, как цинк и кадмий (Zn, Cd) в мясе молодняка крупного рогатого скота (6 месяцев) была недостоверной.

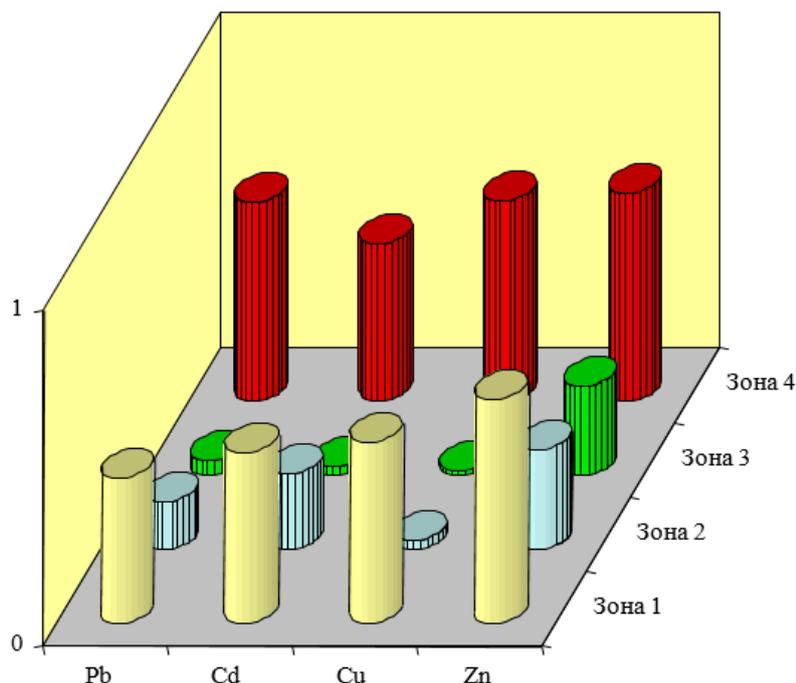


Рис. 1 – Содержание тяжелых металлов в мясе бычков, 6 месяцев

Далее исследования проводились в экспериментальных группах тех же техногенных зон. Но в качестве объектов исследований выбиралось мясо бычков, но в уже 18 - месячном возрасте. По данным, представленным на рисунке 2, отмечается значительное содержание меди и цинка. Отмечено значительное увеличение исследуемых показателей безопасности, учитывая возрастные особенности объектов исследований. Уже в образцах 1 и 4 зон исследования показано значительное превышение допустимых уровней по содержанию ионов тяжелых металлов в сырье животного происхождения.

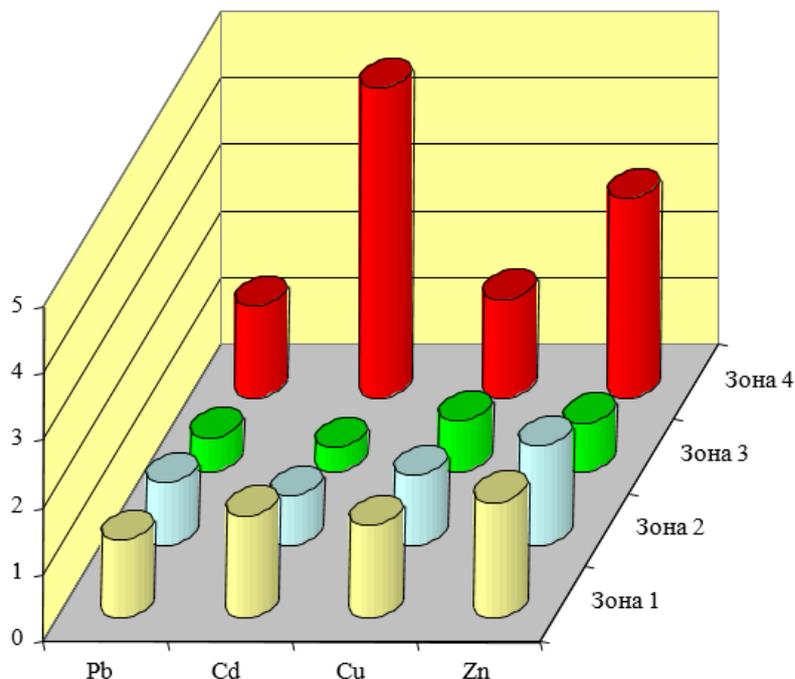


Рис. 2 – Содержание тяжелых металлов в мясе бычков (18 месяцев)

По проведенным результатам показано, что в мясе молодняка крупного рогатого скота в 6-месячном возрасте отмечено значительное содержание таких металлов как медь, цинк и кадмий; в мясе бычков в возрасте 18 месяцев отмечено повышенное содержание всех исследуемых элементов. Следует отметить, высокую кумулятивную способность ионов тяжелых металлов в мясе бычков.

Также при проведении исследований в течение нескольких лет установлено, что содержание ионов тяжелых металлов в мясе, проанализированном в последние годы исследования значительно выше по сравнению с началом исследований, что, следовательно, связано с прогрессирующим техногенезом в республике (рисунок 3).

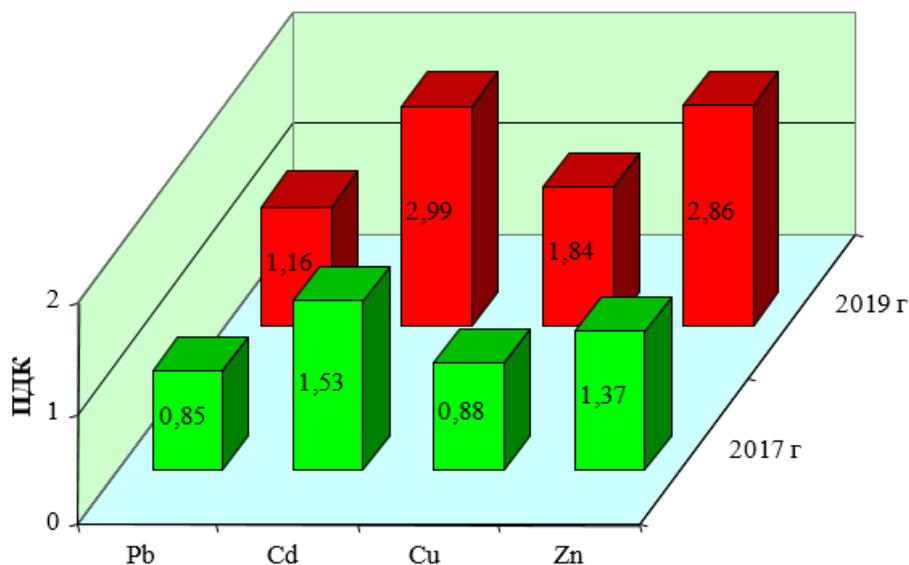


Рис. 3 – Средние концентрации тяжелых металлов в мясе по годам

При рассмотрении техногенных зон РСО-Алания показано, что тяжелые металлы располагаются по мере увеличения концентрации в следующей последовательности: Cd, Pb, Cu, Zn (четвертая зона) → Cd, Pb, Cu, Zn (первая зона) → Cd, Pb, Cu, Zn (вторая зона) → Cd, Pb, Cu, Zn (третья зона). Показатели безопасности мяса, выращиваемого и вырабатываемого в наиболее загрязненных районах, превышают требования санитарных правил и норм, и при кумулятивной способности дают эффект сверхсуммирования.

В ходе проведения экспериментальных исследований на содержание тяжелых металлов в мясном сырье, нами было выявлено наличие еще ряда ксенобиотиков, не нормируемых санитарными правилами и нормами в России. Это такие элементы как, титан, ванадий, кобальт, молибден, вольфрам. По данным зарубежных исследований показано, что их повышенное содержание в организме человека может приводить к ряду серьезных изменений [5, 9, С. 422 – 426].

Заключение

Таким образом, во всех экспериментальных точках обнаружено содержание солей тяжелых металлов, а также других химических веществ, не нормируемых в Российской Федерации. Содержание ионов тяжелых металлов в мясе первой и четвертой техногенных зон не соответствует медико-биологическим требованиям и санитарным нормам

качества продовольственного сырья и пищевой продукции. По результатам факторного анализа высокие концентрации Pb, Cu, Cd, Zn связаны с четвертой зоной. Наименьшие концентрации Pb, Cu, Cd, Zn связаны с третьей зоной. В первой зоне концентрации Pb, Cu, Cd, Zn меньше, чем в четвертой, но больше, чем во второй зоне.

Считаем необходимым проведение дальнейших исследований по изучению механизма попадания ксенобиотиков химического происхождения в организм человека, в том числе вызывающих у взрослого и детского населения «отдаленные последствия». В дальнейшем планируется изучение корреляции между содержанием металлов в пищевых продуктах и распространением ряда заболеваний у населения республики.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Доклад об экологической ситуации в Республике Северная Осетия-Алания в 2019 году: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Северная Осетия-Алания, Владикавказ, 2020. – 69 с.
2. Российская Федерация. Законы. Технический регламент ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции», принятый Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880.
3. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.1078-01 (с изменениями на 6 июля 2011 года) – Введ. 2002 – 07 – 01. – М., 2002. – 160 с.
4. Димитриев А.Д. Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания: учебное пособие / А.Д. Димитриев, Г.О. Ежкова, Д.А. Димитриев и др.; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань: Казанский научно-исследовательский технологический университет (КНИТУ), 2016. – 188 с.
5. Рейли К. Металлические загрязнения пищевых продуктов / К. Рейли. - М: Агропромиздат, 1985. – 184 с.
6. Антипова Л.В. Методы исследования мяса и мясных продуктов / Л.В. Антипова, И.А. Глотова, И.А. Рогов – М: Колос, 2004. – 571с.
7. Позняковский В.М. Гигиенические основы питания: качество и безопасность пищевых продуктов / В.М. Позняковский. – 5-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2007. – 456 с.
8. Симеониди Д.Д. Проблемы качества жизни в эпоху научно-технического прогресса / Д.Д. Симеониди, Ф.Л. Тедеева // Материалы II Международной научно-технической конференции «Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение», Воронеж, 11 – 12 ноября 2015. – с. 218 – 221.
9. Симеониди Д.Д. Анализ влияния техногенных факторов на убойные или мясные качества животных / Д.Д. Симеониди // Материалы XI Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы химии, биологии и биотехнологии», Владикавказ, 18-20 мая 2017. – с. 422 – 426.
10. Arutyunyanz A.A. Characterization of condition of the sewage water and the level of the soil pollution by polygons of waste matter of Republic of North Ossetia – Alania / A.A. Arutyunyanz, N.A. Salamova, D.D. Simeonidi // International Science And Technology Conference On Earth Science, Istcearthscience 2019 Russky Island, march 04-06th 2019 г. – P. 032053.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Doklad ob jekologicheskoj situacii v Respublike Severnaja Osetija-Alanija v 2019 godu [Report on the environmental situation in the Republic of North Ossetia-Alania in 2019] : Ministerstvo prirodnyh resursov i jekologii Respublike Severnaja Osetija-Alanija, Vladikavkaz, 2020. – 69 p. [in Russian]
2. Rossijskaja Federacija. Zakony. Tehniceskij reglament TR TS 021/2011 «O bezopasnosti pishhevoj produkcii» [Technical Regulation TR CU 021/2011 «On Food safety»], : federal law: [adopted by the Decision of the Customs Union Commission No. 880 of December 9, 2011]. [in Russian]
3. Sanitarno-jepidemiologicheskie pravila i normativy SanPiN [Sanitary and epidemiological rules and regulations] 2.3.2.1078-01 (s izmenenijami na 6 ijulja 2011 goda) – Vved. 2002 – 07 – 01. – М., 2002. – 160 p. [in Russian]
4. Dimitriev A.D. Bezopasnost' prodovol'stvennogo syr'ja i produktov pitaniya: uchebnoe posobie [Safety of food raw materials and food products] / A.D. Dimitriev, G.O. Ezhkova, D.A. Dimitriev et al.; Kazanskij nacional'nyj issledovatel'skij tehnologiceskij universitet. – Kazan': KNITU, 2016. – 188 p. [in Russian]
5. Rejli K. Metallicheskie zagriznenija pishhevych produktov [Metallic contamination of food products] / K. Rejli. - M: Agropromizdat, 1985. – 184 p. [in Russian]
6. Antipova L.V. Metody issledovaniya mjasa i mjasnyh produktov [Methods of research of meat and meat products] / L.V. Antipova, I.A. Glotova, I.A. Rogov – M: Kolos, 2004. – 571 p. [in Russian]
7. Poznjakovskij V.M. Gigienicheskie osnovy pitaniya: kachestvo i bezopasnost' pishhevych produktov [Hygienic basics of nutrition: food quality and safety] / V.M. Poznjakovskij. – 5-th ed. – Novosibirsk: Sibir university publishing house, 2007. – 456 p. [in Russian]
8. Simeonidi D.D. Problemy kachestva zhizni v jepohu nauchno-tehniceskogo progressa [Problems of quality of life in the era of scientific and technological progress] / D.D. Simeonidi, F.L. Tedeeva // Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehniceskoj konferencii «Prodovol'stvennaja bezopasnost': nauchnoe, kadrovoe i informacionnoe obespechenie», [Materials of the II International Scientific and Technical Conference «Food security: scientific, personnel and information support»]. - Voronezh, 11 – 12 nojabrja 2015. – P. 218 – 221. [in Russian]
9. Simeonidi D.D. Analiz vlijanija tehnogennyh faktorov na ubojnye ili mjasnye kachestva zhivotnyh [Analysis of the influence of technogenic factors on the slaughter or meat qualities of animals] / D.D. Simeonidi // Materialy XI Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Aktual'nye problemy himii, biologii i biotehnologii», [Materials of the XI All-Russian Scientific Conference «Actual problems of chemistry, biology and biotechnology»]. - Vladikavkaz, 18-20 maja 2017. – P. 422 – 426. [in Russian]
10. Arutyunyanz A.A. Characterization of condition of the sewage water and the level of the soil pollution by polygons of waste matter of Republic of North Ossetia – Alania / A.A. Arutyunyanz, N.A. Salamova, D.D. Simeonidi // International Science And Technology Conference On Earth Science, Istcearthscience 2019 Russky Island, march 04-06th 2019 г. – P. 032053.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.026>

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОДУКТОВ ДИЕТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕБНОГО И ДИЕТИЧЕСКОГО ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ

Научная статья

Симоненко Е.С.^{1,*}, Симоненко С.В.², Хованова Ю.С.³

^{1,2,3} Научно-исследовательский институт детского питания - филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Истра, Россия

* Корреспондирующий автор (info[at]niidp.ru)

Аннотация

Состав кобыльего молока дает основание причислять продукты на его основе к диетическому профилактическому питанию. Проведённые исследования доказали, что продукты переработки кобыльего молока обладают дополнительными свойствами: диетическими, противотуберкулёзными, гипоаллергенными, используется в питании больных с воспалительными заболеваниями кишечника, что приводит к уменьшению болевого синдрома. В этой связи исследования ученых направлены на создание пищевых продуктов функциональной направленности для профилактики и лечения различных заболеваний.

Ключевые слова: кобылье молоко, диетическое лечебное и диетическое профилактическое питание, атерогенные свойства, гастроэнтерология, гепатология, педиатрия, гематология, дерматология.

PROSPECTS OF USING MARE'S MILK IN CREATING THERAPEUTIC AND PREVENTIVE DIET FOOD

Research article

Simonenko E.S.^{1,*}, Simonenko S.V.², Khovanova Yu.S.³

^{1,2,3} Research Institute of Baby Food, branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Istra, Russia

* Corresponding author (info[at]niidp.ru)

Abstract

The composition of mare's milk makes it possible to classify products based on it as preventive diet food. The conducted studies have proved that mare's milk processing products have additional properties such as dietary, anti-tuberculosis, hypoallergenic; they are also used in the diet of patients with inflammatory bowel diseases, which leads to a reduction in pain syndrome. In this regard, the research in this area is aimed at creating functional food products for the prevention and treatment of various diseases.

Keywords: mare's milk, therapeutic and preventive diet food, atherogenic properties, gastroenterology, hepatology, pediatrics, hematology, dermatology.

Введение

Относительно мирового рынка, где коровье молоко наиболее распространено (85% всего молока), кобылье молоко составляет меньше чем 0,1% мирового производства [1]. Однако перспективы рынка кобыльего молока положительные, учитывая научные открытия, показывающие, что это молоко богато биологически активными компонентами и веществами. Кроме того, кобылье молоко наиболее приближено по своему составу к грудному женскому молоку, что позволяет его рассматривать в качестве наиболее перспективного сырья для создания продуктов для детей раннего возраста.

В данном литературном обзоре обобщены данные по возможному использованию кобыльего молока в целях создания продуктов питания, акцентируя важные композиционные аспекты и специфические особенности этого молока, которые позволяют рассматривать его, как наиболее приближенное к женскому и обладающего функциональными свойствами.

В настоящее время, с развитием возможностей в индустрии пищевой промышленности, фармацевтики, обилием ассортимента пищевых продуктов, биологически активных добавок, фармпрепаратов, у современного человека всё острее встает вопрос здоровья и здорового питания – возникает осознание, что пища может и должна нести в себе не только питательные свойства, но и быть натуральной, полезной и в определенной степени функциональной.

Вопрос поиска перспективных источников сырья для пищевой промышленности до сих пор остается актуальным и востребованным. В соответствии с данными Государственного доклада «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия Российской Федерации в 2020 году» около 64,9 млн человек, или 45,5 % населения, в субъектах Российской Федерации подвержено воздействию факторов нездорового образа жизни. По степени влияния на показатели состояния здоровья населения факторы образа жизни в субъектах Российской Федерации в 2020 году располагаются следующим образом: несбалансированное питание, употребление алкоголя и табакокурение. Основными причинами смертности на фоне повышенного уровня, обусловленного коронавирусной инфекцией, остаются в последнее десятилетие: болезни системы кровообращения, новообразования, внешние причины, болезни органов пищеварения, болезни органов дыхания, некоторые инфекционные и паразитарные болезни. Динамика изменения показателя общей смертности всего населения в субъектах Российской Федерации за последние годы приведена на рис. 1.

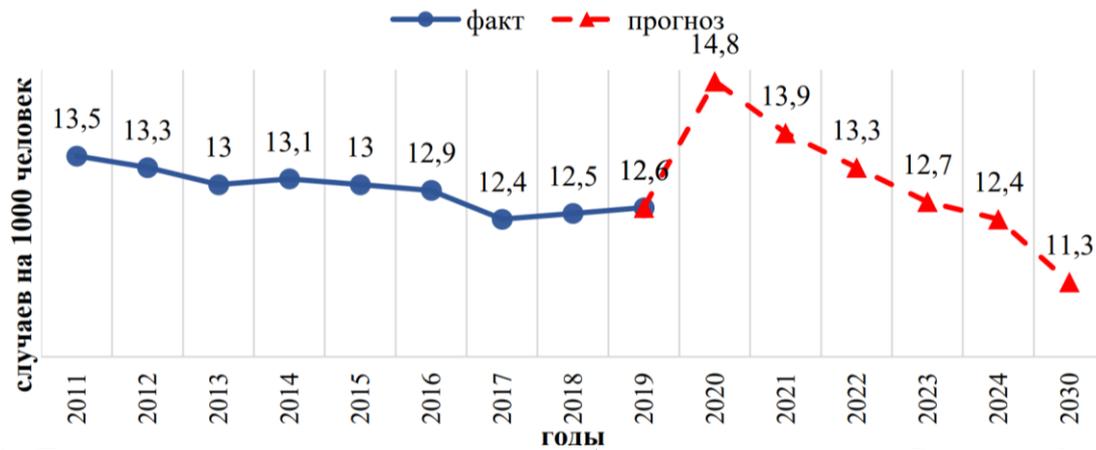


Рис. 1 – Прогнозная целевая оценка изменения уровня общей смертности населения Российской Федерации на период до 2030 года, случаев на 1000 человек [2]

Согласно Стратегии формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года, акцент государственной демографической политики на формировании здорового образа жизни (ЗОЖ), в том числе за счет рационального питания. В связи с чем продукты лечебно-профилактической и функциональной направленности, в том числе обогащенные, направленные на укрепление здоровья человека и профилактику различных заболеваний, прежде всего болезней ЖКТ сегодня приобретают крайне актуальный характер.

Основная часть

Согласно результатам уже проведенных исследований, молоко кобылы и продукты на его основе обеспечивают ценные питательные вещества для организма человека. Такие продукты могут также использоваться в качестве функциональных и лечебно-профилактических, в период лечения болезней и восстановительной терапии, а также для лиц с невосприимчивостью к белкам коровьего молока. Выгодные свойства молока кобылы были также отмечены косметической промышленностью, используя его все чаще в различных продуктах. Широкий спектр возможностей использования молока кобылы предполагает, что с достаточным продвижением научных исследований и созданию продуктов питания на его основе, они будут иметь спрос потребителей по всему миру.

Несбалансированное и неправильное питание является одним из главных факторов развития алиментарно-обусловленных заболеваний, вызванных дефицитом или избытком потребляемых пищевых веществ.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) выделяет 4 группы причин:

- недостаточное питание (болезни, связанные с недостаточностью белков, и калорий, минеральных веществ, витаминов, незаменимых жирных кислот, отдельных аминокислот и других веществ);

- чрезмерное питание (ожирение, гипервитаминоз);

- пищевые отравления (латиризм);

- анемии в результате дефицита пищевых веществ.

В России около 80-90 % населения страдает от дефицита витамина С, 40-80 % витаминов группы В. Приблизительно у половины людей в пище не хватает пищевых волокон, кальция, цинка, селена, полиненасыщенных жирных кислот и др. [3].

Состав кобыльего молока дает основание причислять продукты на его основе к диетическому профилактическому питанию. Проведенные исследования доказали, что продукты переработки кобыльего молока обладают дополнительными диетическими профилактическими свойствами.

Кобылье молоко относится к альбуминовой группе и близко по составу к женскому грудному молоку. В нем содержится оптимальное количество белка и легкоусвояемый жир. Оптимальное содержание белка улучшает усвояемость и снижает нагрузку на почки.

В настоящее время доказана связь многих заболеваний с нарушением обмена липидов вследствие неадекватного и разбалансированного поступления их с пищей. Клеточные мембраны и липопротеиды, в состав которых входят насыщенные жирные кислоты (НЖК), или молекулы липидов с НЖК, функционально менее активны.

Проведенные исследования козьего, кобыльего, коровьего и верблюжьего молока показали, что по индексу атерогенности и тромбогенности, а также уникальности жирнокислотного состава, кобылье молоко значительно отличается от других анализируемых видов молока. (Таблица 1).

Так, кобылье молоко по содержанию ПНЖК превосходит козье, коровье и верблюжье молоко в 6,7 и 9,6 раза соответственно. Кроме того, кобылье молоко характеризуется высоким содержанием ω -6 жирных кислот и по их содержанию превышает их уровень у коровьего, козьего и верблюжьего молока в 5,4; 7,0 и 9,4 раза соответственно. Характерной особенностью кобыльего молока является высокий уровень ω -3 жирных кислот, так уровень последних в кобыльем молоке превышает аналогичные показатели в козьем, коровьем и верблюьем молоке в 13,0; 42,0 и 9,7 раза соответственно [4].

Таблица 1 – Жирнокислотный состав молока различных видов сельскохозяйственных животных

Наименования жирных кислот	Кобылье, М±m	Козье, М±m	Коровье, М±m	Верблюжье, М±m
Сумма НЖК	46,05±5,30	69,21±8,80	73,41±5,06	62,78±6,06
Сумма МНЖК	30,69±7,15	27,0±5,37	23,55±3,50	31,99±3,02
Сумма ПНЖК	23,25±6,05	3,47±0,35	2,42±0,25	2,43±0,22
ω -6	15,65±4,50	2,89±0,24	2,24±0,20	1,67±0,14
ω -3	7,57±1,40	0,58±0,05	0,18±0,01	0,78±0,05
Трансизомеры жирных кислот	-	0,38±0,03	0,62±0,04	3,52±0,43
Индекс атерогенности	1,0±0,23	2,42±0,28	2,87±0,27	2,22±0,19
Индекс тромбогенности	0,51±0,12	2,53±0,27	3,53±0,34	2,64±0,23
Индекс здоровья	0,99±0,18	0,41±0,04	0,35±0,05	0,44±0,05

Сравнительный анализ индексов атерогенности и тромбогенности различных видов молока указывает на неоднозначность показателей, так часто используемое коровье молоко имеет ИА и ИТ 2,87 и 3,53 соответственно, в то же время, у кобыльего молока данные показатели составляют 0,51 и 0,99 соответственно. Следует отметить, что только в кобыльем молоке отсутствуют трансизомеры жирных кислот, негативно влияющие на здоровье и способствующие повышению риска таких заболеваний как рак, ишемическая болезнь сердца, атеросклероз и др. Кобылье молоко характеризуется высоким содержанием полиненасыщенных и мононенасыщенных жирных кислот, участвующих в регуляции структурно-функциональной целостности клеточных мембран, в формировании иммунитета и антиоксидантной защиты организма. Как видно из данных таблицы 1, количество ПНЖК в кобыльем молоке превышает аналогичные показатели в коровьем, козьем и верблюжьем молоке в несколько раз. [4]

Кобылье молоко не является лекарственным средством, однако используется при профилактике различных заболеваний.

Направлениями использования кобыльего молока в медицине являются: гастроэнтерология, гепатология, педиатрия, гематология, дерматология, реабилитация.

В гастроэнтерологии кобылье молоко применяют в качестве основного средства для восстановления нарушенной микрофлоры кишечника. Используют как элемент диетотерапии при лечении заболеваний кишечника, таких как болезнь Крона, неспецифический язвенный колит, синдром раздраженного кишечника, при лечении хронического панкреатита с внешнесекреторной недостаточностью [5].

Механизм действия в гастроэнтерологии основан на следующих свойствах кобыльего молока:

- высокое содержание лактозы ведет к высвобождению сахара в кишечнике, что способствует росту полезной микрофлоры;
- в результате переваривания белков кобыльего молока образуются биологически активные пептиды, обладающие противовоспалительным действием;
- содержащийся в кобыльем молоке лизоцим обладает бактериостатической активностью в отношении грамположительных и энтеробактерий;
- лактоферрин связывает железо, ограничивая рост патогенной микрофлоры, и оказывает стимулирующее действие на фагоцитоз. [6]

В гепатологии кобылье молоко применяют в качестве средства для профилактики заболеваний печени при наличии факторов риска, в качестве компонента лечения при неалкогольном стеатогепатите, при хронических вирусных гепатитах в качестве базисной терапии, при циррозе печени вирусного и алкогольного генеза в качестве вспомогательной терапии [7].

Кобылье молоко как легкоусвояемый продукт, снижает нагрузку на печень, позволяя ей активировать свои внутренние резервы на регенерацию. Возмещение дефицита альбумина при выраженном нарушении белково-синтетической функции печени снижает темпы прогрессирования фиброза [8].

Молоко в детском питании один из ключевых продуктов, однако возможные аллергические реакции, связанные с белками коровьего молока, способствуют развитию исследований по использованию альтернативных видов молока. В педиатрии кобылье молоко используется для питания детей с непереносимостью белков коровьего молока. Проведенные клинические исследования с целью оценки эффективности кобыльего молока по показателям аллергенности у детей в количестве 25 человек, в возрасте с 19 до 72 месяцев с тяжелой опосредованной формой аллергии к белкам коровьего молока [10]. Результаты показали, что у 96% детей хорошая переносимость кобыльего молока и возможно использовать кобылье молоко для детей с тяжелой формой аллергии. Однако несмотря на положительные результаты исследований, необходимо проверить толерантность ребенка к кобыльему молоку, так как всегда существует риск индивидуальной непереносимости [11].

Свойства кобыльего молока делают его перспективным для использования в косметической промышленности. Продукты, сделанные из него, имеют коммерческую рентабельность.

У более чем 80% людей, страдающих псориазом, есть проблемы сухой кожи, которые являются результатом болезни. Поэтому дополнительное лечение, нацеленное на увлажнение кожи, включает использование наружных средств, такие как увлажняющие кремы (мази, лосьоны) и масляные ванны. Однако их действие ограничено эпидермисом, который является тонким, внешним слоем кожи, таким образом, гарантируется только 20% увлажнения. Как следствие больные псориазом должны принимать пищевые добавки, содержащие концентраты кобыльего молока, которое увлажняет более глубокие слои кожи [11].

Заключение

Результаты, полученные в исследованиях, доказали функциональность кобыльего молока, его включение в рацион питания может оказать благоприятное воздействие на организм и здоровье человека в целом.

Стоит отметить, что низкая частота потребления кобыльего молока во многом связана с отсутствием информации по его возможному использованию и полезным свойствам. Таким образом, актуальным является проведение исследований по созданию продуктов питания на основе кобыльего молока диетического лечебного и диетического профилактического назначения.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Barreto I.M.L.G. Equine milk and its potential use in the human diet / Ícaro Marcell Lopes Gomes Barreto, Adriano Henrique do Nascimento Rangel, Stela Antas Urbano et al. // Food Sci. Technol, Campinas, 39(Suppl. 1): 1-7, June 2019
2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 256 с.
3. Тутельян В. А. Алиментарные болезни / В. А. Тутельян // Большая российская энциклопедия. Том 1. Москва, 2005, стр. 490
4. Синявский Ю.А. Сравнительная оценка жирнокислотного состава, индексов атерогенности и тромбогенности молока различных видов сельскохозяйственных животных / Ю.А. Синявский, А. В. Якунин, А.С. Торгаутов и др. // Проблемы Науки. 2016. №7 (49).
5. Schubert, R. Dietetic efficacy of mare's milk for patients with chronic inflammatory bowel diseases - clinical study / Rainer Schubert, C. Kahle, E. Kauf et al. // Wissenschaft und Praxis. 33. 7-8. - [Electronic resource]. – URL: <https://clck.ru/ZEdgM>. (accessed 12.11.2021)
6. Бимбетов Б.Р. Кобылье молоко в гастроэнтерологии (обзорная статья) / Б.Р. Бимбетов, А.К. Жангабылов, В.В. Бенберин и др. // Медицина (Алматы). – 2019. - №9 (207). – С. 73-78.
7. Методические рекомендации по методологии восстановления мукозного слоя кишечника после антибиотикотерапии. Методическое пособие – М.: Мир науки, 2020. 45 с.
8. Бимбетов Б.Р. Клинико-лабораторные показатели больных с хроническими диффузными заболеваниями печени на фоне приема Саумал / Б.Р. Бимбетов, А.Т. Мусаев, А.К. Жангабылов и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 10-2. – С. 273-277.
9. Rangel, H. A. H. N. Lactose intolerance and cow's milk protein allergy / H. A. H. N. Rangel, D. C. Prodaji, S.A. Urbano et al. // Food Sci. Technol, Campinas, 36 (2), 179-187.
10. Buzinko L. Allergenicity of mare's milk in children with cow's milk allergy / L. Buzinko, P.G. Giampietro, P. Lucenti et al. // Journal of Allergy and Clinical Immunology. 105, 1031–1034.
11. Nutritional Value and Health-Promoting Properties of Mare's Milk – a Review / Ewa Jastrzębska, Ewa Wadas, Tomasz Daszkiewicz et al. // Czech J. Anim. Sci., 62, 2017 (12): 511–518.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Barreto I.M.L.G. Equine milk and its potential use in the human diet / Ícaro Marcell Lopes Gomes Barreto, Adriano Henrique do Nascimento Rangel, Stela Antas Urbano et al. // Food Sci. Technol, Campinas, 39(Suppl. 1): 1-7, June 2019
2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад [On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2020: State Report]. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-being, 2021. 256 p. [in Russian]
3. Tutelyan V. A. Alimentarnye bolezni [Alimentary diseases] / V. A. Tutelyan // Bol'shaja rossijskaja jenciklopedija [Great Russian Encyclopedia]. Volume 1. Moscow, 2005, p. 490 [in Russian]
4. Sinyavsky Yu.A. Sravnitel'naja ocenka zhirnokislotojnogo sostava, indeksov aterogennosti i trombogennosti moloka razlichnyh vidov sel'skohozjajstvennyh zhivotnyh [Comparative assessment of fatty acid composition, indices of atherogenicity and thrombogenicity of milk of various types of farm animals] / Yu.A. Sinyavsky, A.V. Yakunin, A.S. Torgautov et al. // Problemy Nauki [Problems of Science]. 2016. №7 (49). [in Russian]
5. Schubert, R. Dietetic efficacy of mare's milk for patients with chronic inflammatory bowel diseases - clinical study / Rainer Schubert, C. Kahle, E. Kauf et al. // Wissenschaft und Praxis. 33. 7-8. - [Electronic resource]. – URL: <https://clck.ru/ZEdgM>. (accessed 12.11.2021)
6. Bimbetov B.R. Kobyl'e moloko v gastrojenterologii (obzornaja stat'ja) [Mare's milk in gastroenterology (review article)] / B.R. Bimbetov, A.K. Zhangabylov, V.V. Benberin et al. // Medicina (Almaty) [Medicine (Almaty)]. – 2019. - №9 (207). – Pp. 73-78. [in Russian]

7. Metodicheskie rekomendacii po metodologii vosstanovlenija mukoznogo sloja kishechnika posle antibiotikoterapii [Methodological recommendations on the methodology of restoring the mucosal layer of the intestine after antibiotic therapy]. Methodical manual. - M.: The World of Science, 2020. 45 p. [in Russian]
8. Bimbetov B.R. Kliniko-laboratornye pokazateli bol'nyh s hronicheskimi diffuznymi zabolevanijami pecheni na fone priema Saumal [Clinical and laboratory indicators of patients with chronic diffuse liver diseases on the background of taking Saumal] / B.R. Bimbetov, A.T. Musaev, A.K. Zhangabylov et al. // International Journal of Applied and Fundamental Research. - 2019. - No. 10-2. - pp. 273-277. [in Russian]
9. Rangel, H. A. H. N. Lactose intolerance and cow's milk protein allergy / H. A. H. N. Rangel, D.C. Prodaji, S.A. Urbano et al. // Food Sci. Technol, Campinas, 36 (2), 179-187.
10. Buzinko L. Allergenicity of mare's milk in children with cow's milk allergy / L. Buzinko, P.G. Giampietro, P. Lucenti et al. // Journal of Allergy and Clinical Immunology.105, 1031–1034.
11. Nutritional Value and Health-Promoting Properties of Mare's Milk – a Review / Ewa Jastrzębska, Ewa Wadas, Tomasz Daszkiewicz et al. // Czech J. Anim. Sci., 62, 2017 (12): 511–518.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.027>**РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУР СУХИХ НАПИТКОВ С L-АРГИНИНОМ ДЛЯ ДЕТСКОГО ПИТАНИЯ**

Научная статья

Симоненко С.В.¹, Мануйлов Б.М.², Антипова Т.А.³, Симоненко Е.С.⁴, Копытко М.С.⁵*¹ ORCID: 0000-0002-6999-5048;² ORCID: 0000-0001-6167-1017;³ ORCID: 0000-0002-0365-4806;⁴ ORCID: 0000-0002-2878-8069;⁵ ORCID: 0000-0002-8235-8457;^{1, 2, 3, 4, 5} Научно-исследовательский институт детского питания - филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Истра, Россия

* Корреспондирующий автор (info[at]niidp.ru)

Аннотация

В развитых странах ежегодно увеличивается количество детей с лишним весом и ожирением. Среди основных причин рассматривают неправильное питание и неправильный образ жизни. Результаты медицинских исследований доказывают, что введение в рацион L-аргинина у пациентов с ожирением приводит к значимому снижению массы тела. L-аргинин является одним из важнейших биологически активных веществ, участвующих в многочисленных обменных процессах организма. Целью проводимой работы является разработка технологии функциональных продуктов детского питания с использованием аргинина. Важным направлением работы было создание продукта, содержащего L-аргинин с функциональным воздействием на обменные процессы организма, обладающего оптимальными органолептическими свойствами, а также длительным сроком хранения и удобством применения. Согласно результатам исследований, разработаны рецептуры напитка, предназначенного для использования в питании детьми, страдающими ожирением. Сочетание ингредиентов в рецептурах позволило максимально замаскировать неприятный запах и вкус добавляемой аминокислоты L- аргинин. В состав рецептуры включены L-аргинин, сухой экстракт плодов шиповника, фруктоза, лимонная и аскорбиновая кислоты, натуральные ароматизаторы. По итогам органолептической оценки продукта для проведения дальнейших исследований выбран вариант продукта в виде сухого водорастворимого напитка на основе экстракта плодов шиповника. Оптимальная дозировка L-аргинина составила 2000 мг/200 мл готового к употреблению продукта.

Ключевые слова: технологии продуктов детского питания; обмен веществ; ожирение, аминокислота L-аргинин.**DEVELOPMENT OF BEVERAGE POWDER RECIPES WITH L-ARGININE INTENDED AS BABY FOOD**

Research article

Simonenko S.V.¹, Manuylov B.M.², Antipova T.A.³, Simonenko E.S.⁴, Kopytko M.S.⁵*¹ ORCID: 0000-0002-6999-5048;² ORCID: 0000-0001-6167-1017;³ ORCID: 0000-0002-0365-4806;⁴ ORCID: 0000-0002-2878-8069;⁵ ORCID: 0000-0002-8235-8457;^{1, 2, 3, 4, 5} Research Institute of Baby Food - branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Istra, Russia

* Corresponding author (info[at]niidp.ru)

Abstract

In developed countries, the number of overweight and obese children is increasing every year. Among the main reasons are improper nutrition and lifestyle. The results of medical studies prove that the introduction of L-arginine into the diet in obese patients leads to a significant decrease in body weight. L-arginine is one of the most important biologically active substances involved in numerous metabolic processes of the body. The purpose of this study is to develop the technology of functional baby food products using arginine. An important area of the study was the creation of a product containing L-arginine with a functional effect on the metabolic processes of the body and has optimal organoleptic properties, as well as a long shelf life and ease of use. The study develops the formulations of the drink intended for use in the diet of obese children. The combination of ingredients in the formulations made it possible to conceal the unpleasant smell and taste of the added amino acid L- arginine as much as possible. The composition of the formulation includes L-arginine, dry extract of rosehip fruits, fructose, citric and ascorbic acids, natural flavors. Based on the results of the organoleptic evaluation, a product variant in the form of a water-soluble powder beverage based on rosehip fruit extract was selected for further research. The optimal dosage of L-arginine amounted to 2000 mg/200 ml of the ready-to-use product.

Keywords: technologies of baby food products; metabolism; obesity, amino acid L-arginine.**Введение**

L-Аргинин является одним из важнейших биологически активных веществ (нутриентов), участвующих в многочисленных обменных процессах организма. С биохимической точки зрения L-аргинин представляет собой L-изомер природной аминокислоты аргинин. L-аргинин участвует практически во всех основных метаболических цикла организма. Являясь условно незаменимой аминокислотой (в различные возрастные периоды жизни она вырабатывается в организме), следует помнить, что в раннем и пожилом возрасте, при ряде заболеваний её уровень может быть ниже физиологического. Недостаток L-аргинина приводит к различным метаболическим нарушениям и развитию патологических состояний [1], [2]. У детей недостаток аминокислоты приводит к снижению выработки гормона роста,

а также нарушению липидно-углеводного обмена, которое нередко приводит к избыточному весу, ожирению и развитию диабетического состояния [3], [4], [5]. Происходит увеличение жировых отложений, снижение роста мышечной массы, при этом снижается активность, выносливость и ухудшение настроения. В метаболизме веществ организма L-аргинин в сочетании с глюкозой стимулирует выработку инсулина и нормализации липидного обмена [3], [2], [6].

Наряду с этим L-аргинин участвует в выработке и метаболизме природного медиатора оксида азота, который поддерживает в функционально-здоровом состоянии многие обменные процессы организма и, в первую очередь, функции сердечно-сосудистой и мочевыводящей систем [7], [1], [8].

L-аргинин в здоровом состоянии хорошо усваивается из пищи, поэтому сбалансированное питание восполняет необходимое количество аминокислоты [10], [9]. Натуральными источниками L-аргинина являются молочные продукты, морепродукты, мясо, орехи, цельные зерновые и другие. В организме L-аргинин синтезируется из глутаминовой кислоты и пролина [11].

При неправильном питании и нарушении функции желудочно-кишечного тракта развивается недостаток аргинина [12], [8]. Это приводит, как правило, к снижению выработки оксида азота и многочисленным нарушениям различных обменных процессов в организме и развитию сердечно-сосудистых заболеваний [11], [13]. Наряду с этим, происходит нарушение выработки инсулина и метаболического обмена жиров [14]. В свою очередь, это приводит к избыточному весу и ожирению. Наиболее ярко этот процесс проявляется у детей [3], [4], [5].

Актуальность

В развитых странах ежегодно увеличивается количество детей с лишним весом и ожирением. Согласно статистическим данным в России более 10% детей и более 30% школьников имеют избыточный вес. Мальчики чаще, чем девочки страдают ожирением и избыточным весом [15]. Лишний вес препятствует нормальному развитию ребенка, приводит к многочисленным патологическим состояниям и ухудшению здоровья нации [16].

Целью проводимой работы является разработка технологии функциональных продуктов детского питания с использованием аргинина.

Важным направлением работы было создание продукта, содержащего L-аргинин обладающего оптимальными органолептическими свойствами, а также длительным сроком хранения и удобством применения.

Объекты и методы исследований

Объектами исследований являются структурообразующие компоненты разрабатываемого продукта являются следующие – аминокислота L-аргинин, фруктоза, лактулоза, изомальт, сухие водорастворимые экстракты плодов шиповника и зерна овса, аскорбиновая кислота, лимонная кислота и натуральные корректоры вкуса, запаха, подсластитель.

Методы исследований: органолептические, микробиологические, физико-химические. Содержание аминокислот (аргинина) в образцах определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии по МВИ.МН.1362-2000. При определении органолептических показателей использовали описательный метод. Физико-химические и показатели определяли по стандартным методам контроля (ГОСТ) применительно к сухим напиткам.

Выбор экстрактов шиповника и овса обусловлен их широким использованием как источников природного растительного сырья в пищевой промышленности. Ценность их определяется комплексом биологически активных веществ -аскорбиновой кислоты, каротиноидов, флавоноидов, углеводов, органических кислот, витаминов В2, К, Р, Е, полиненасыщенных жирных кислот, макро- и микроэлементов. Кроме пищевой ценности, выбранные компоненты обладают прекрасными органолептическими свойствами.

Использование фруктозы обосновано возникшим в последние годы повышенным интересом производителей пищевых ингредиентов. Фруктоза отличается от сахарозы и глюкозы более низким гликемическим индексом и сладким вкусом. Умеренное потребление фруктозы (до 50 г в сутки) не нарушает обмен жиров и глюкозы, а дозы до 100 г в сутки не влияют на массу тела.

Лактулоза- углевод, относящийся к классу олигосахаридов. Благодаря доказанному бифидогенному эффекту она широко применяется не только в медицинской, но и пищевой промышленности и биотехнологии в качестве функционального пищевого ингредиента для продуктов здорового питания. Лактулозу применяют не только как пребиотик с физиологическим эффектом для обогащения различных пищевых продуктов, но и благодаря ее функционально-технологическим свойствам. К таковым относятся: сладость, пониженная калорийность, улучшение вкуса и цвета продукта. Лактулоза признана мультифункциональным пищевым ингредиентом, позволяющим производителям расширять ассортимент продуктов, обладающих полезными для здоровья свойствами и пользующихся популярностью.

Изомальт – использован в качестве консерванта, хорошо сочетается с ароматизаторами, подчеркивая натуральный вкус продукта.

Лимонная кислота и аскорбиновая кислота в исследуемых рецептурах использованы в первую очередь как корректоры вкуса и запаха продукта.

С целью коррекции вкуса и запаха использовали натуральные корректоры вкуса – лимона, вишни, слива и подсластитель.

Результаты и их обсуждение

Для проведения исследований использовали L-аргинин, характеристики которого приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Органолептические, физико-химические, микробиологические показатели и показатели безопасности показатели L-аргинина

Наименование показателя	Характеристика и норма
Органолептические показатели:	
Внешний вид	Кристаллический порошок
Вкус и аромат	Специфический, без запаха
Цвет	Белый
Физико-химические показатели	
Массовая доля L-аргинина в сухом веществе%, не менее	98,5
Массовая доля влаги%, не более	0,3
Микробиологические показатели	
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	10
БГКП	Не допускаются в 1,0 г
Показатели безопасности (мг/кг, не более)	
Токсичные элементы:	
Свинец	1,0
Мышьяк	1,0
Кадмий	0,1
ртуть	0,03
Радионуклиды (Бк/кг, не более)	
Цезий-137	200
Стронций-90	100

По всем показателям L-аргинин соответствует требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01 п.п.1.9.13, 1.9.13.1.

В ходе исследования были разработаны и анализированы рецептуры с различным содержанием L-аргинина.

Целью являлся подбор оптимального соотношения L-аргинина и дополнительных компонентов для коррекции вкуса и запаха готового продукта.

При разработке базовой рецептуры использован L-аргинин в количестве 350 мг. В качестве дополнительных компонентов - изомальт, фруктоза, аскорбиновая кислота.

Таблица 2 – Разработка базовой рецептуры

№ п/п	Ингредиенты	Масса, мг	%
1	L-Аргинин	350	35
2	Изомальт	425	42,5
3	Фруктоза	200	20
4	Аскорбиновая кислота	25	2,5
Итого:		1 000 мг	100%

В условиях экспериментального производства выработаны образцы продукта по данной рецептуре. При выработке использовано оборудование, обеспечивающее получение продукта с заданными параметрами физико-химического состава и органолептических свойств. Подготовленные ингредиенты взвешивали, направляли в смеситель с механической мешалкой, перемешивали в течении 15 мин и использовали для дальнейших исследований.

Для проведения сенсорной оценки, сухой порошок растворяли в 200,0 мл питьевой воды с температурой 20-25°C. Результаты органолептической оценки свидетельствовали о необходимости коррекции дозы аминокислоты L-аргинина, вкуса и общего содержания сухих веществ в готовом продукте.

Количество аминокислоты L-аргинина было увеличено до 2000 мг. С целью коррекции органолептических показателей использовали водорастворимый экстракт шиповника, лактулозу, экстракт овса, лимонную кислоту и природные ароматизаторы лимон, слива, вишня и подсластитель. Корректоры вкуса и запаха применяли для устранения горького вкуса, присущего аминокислоте L-аргинин. Варианты разработанных рецептур приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Варианты разработанных рецептов

№ п/п	Ингредиенты	Ед. измерения	Рецептуры		
			1	2	3
1	L-Аргинин	мг	2000	2000	2000
2	Водорастворимый экстракт шиповника	мг	250	700	250
3	Водорастворимый экстракт овса	мг	-	-	250
4	Лактулоза	мг	-	400	800
5	Изомальт	мг	1050	-	-
6	Лимонная кислота	мг	70	150	70
7	Аскорбиновая кислота	мг	50	50	50
8	Ароматизатор лимон	мг	50	-	50
9	Ароматизатор слива	мг	-	50	-
10	Ароматизатор вишня	мг	-	50	-
11	Подсластитель	мг	30	100	30
Итого:		мг	3 500	3500	3500

Подготовленные ингредиенты смешивали в смесителе, затем полученные сухой порошок растворяли в 200,0 мл кипяченой воды комнатной температуры.

Результаты проведенной органолептической оценки свидетельствовали о «пустоватом вкусе» готового напитка. Учитывая данное мнение дегустаторов принято решение о корректировке разработанных вариантов рецептов. Общая масса сухого напитка увеличена до 5,0 г и 10,0 г.

Данные варианты рецептов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Варианты рецептов

№ п/п	Ингредиенты	Ед. измерения	Рецептуры	
			1	2
1	L-Аргинин	мг	2000	2000
2	Водорастворимый экстракт шиповника	мг	1000	3500
3	Фруктоза	мг	1000	3200
4	Лимонная кислота	мг	700	1000
5	Аскорбиновая кислота	мг	100	100
6	Ароматизатор слива	мг	100	100
7	Ароматизатор вишня	мг	100	100
Итого:		мг	5,000	10,000

Все полученные образцы имели хорошую растворимость, имели приятный цвет и характеризовались прозрачностью.

Сочетание ингредиентов в рецептурах выбрано как наиболее приемлемое, так как позволило максимально завуалировать неприятный запах и вкус добавляемого аргинина. В состав рецептуры включены L-аргинин, сухой экстракт плодов шиповника, фруктоза, лимонная и аскорбиновая кислоты, натуральные ароматизаторы.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности применения L-аргинина при создании продуктов детского питания. Согласно полученным результатам разработаны рецептуры напитка, предназначенного для использования в питании детьми, страдающими ожирением. По итогам органолептической оценки продукта для проведения дальнейших исследований выбран вариант продукта в виде сухого растворимого напитка на основе экстракта плодов шиповника. Оптимальная дозировка L-аргинина составила 1г/100 мл готового к употреблению продукта.

Заключение

Исследования в данном направлении продолжаются и предусматривают создание новых технологий получения продукта с повышенным содержанием аминокислоты аргинина. Значительное внимание будет уделено выбору сырья и компонентов, содержащих натуральные природные формы аминокислоты аргинина, поскольку поступление из натуральных пищевых источников является более приемлемым с точки зрения восприятия организмом.

Финансирование

Научно-исследовательская работа по подготовке рукописи проведена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в рамках темы № 0529-219-0060 «Разработка специализированных продуктов детского и геродиетического питания и оценка их эффективности».

Funding

The research work on the preparation of the manuscript was carried out at the expense of a grant for the implementation of a state task within the framework of the topic No. 0529-219-0060 "Development of specialized nutrition products for children and the elderly and evaluation of their effectiveness".

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Jobgen W. Dietary L-arginine supplementation reduces white fat gain and enhances skeletal muscle and brown fat masses in diet-induced obese rats / W. Jobgen, C. J. Meininger, S.C. Jobgen et al. // J Nutr. 2009 Feb;139(2):230–7.
2. Wu Z. Regulation of brown adipose tissue development and white fat reduction by L-arginine / Z. Wu, M. C. Satterfield, F. W. Bazer et al. // Curr Opin Clin Nutr Metab Care. 2012 Nov;15(6):529–38.
3. Тутельян В.Л. Распространенность ожирения и избыточной массы тела среди детского населения РФ.: мультицентровое исследование / В.Л. Тутельян, А.К. Батурич, И.Я. Коня и др. // Педиатрия, 2014.-N 5.-С.28-31.
4. Рекомендуемые среднесуточные наборы продуктов для питания детей 7 - 11 и 11 - 18 лет. Методические рекомендации № 0100/8604-07-34 / Сборник нормативных правовых актов по организации питания в общеобразовательных учреждениях. Часть 2. – МОСКВА: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – с. 135-138.
5. Ладодо К. С. Лечебное питание в педиатрической практике / К. С. Ладодо // Вопросы питания. 1996, № 5, с. 30–34.
6. Строкова Т.В. Эффективность аргинина и омега-3 ПНЖК в лечении ожирения у детей / Т.В. Строкова, Е.В. Павловская, А.Г. Сурков и др. // Вопросы практической педиатрии 2018; 13(1): 12-20.
7. Lucotti P. Beneficial effects of a long-term oral L-arginine treatment added to a hypocaloric diet and exercise training program in obese, insulin-resistant type 2 diabetic patients / P. Lucotti, E. Setola, L. D. Monti et al. // Am J Physiol Endocrinol Metab. 2006 Nov;291(5):E906–12.
8. Детские болезни / Под ред. А. А. Баранова. М., 2002. 879 с.
9. Физиология роста и развития детей и подростков (теоретические и клинические вопросы) / Под ред. А. А. Баранова и Л. А. Щеплягиной. М., 2000. 605 с.
10. Рудмен Д. Белковая и энергетическая недостаточность питания / Д. Рудмен // Внутренние болезни. Пер. с англ. М.: Медицина, 1993, т. 2, с. 386–396.
11. Бабушкина А.В. -L-аргинин с точки зрения доказательной медицины (обзор литературы) / А.В. Бабушкина // «Украинский медицинский часопис» «6 (74) X1-X11 2009 г.
12. Интенсивная терапия в педиатрии. Практическое руководство / Под ред. В. А. Михельсона. М.: ГЭОТАР-мед, 2003, т. 2. 550 с.
13. Северьянова Л.А. механизмы действия аминокислоты L-аргинина на нервную и иммунную регуляторные системы / Л.А. Северьянова, И.И. Бобынцев // Курский научно-практический вестник "Человек и его здоровье", 2006, № 3. стр. 60-75
14. ВОЗ. Ожирение и избыточный вес. Информационный бюллетень № 311, Январь 2015 г.
15. Детское питание: Руководство для врачей / под ред. В.А. Тутельяна, И.Я. Коня. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: ООО «Издательство «Медицинское информационное агентство», 2013. - 744 С.
16. Батурич А.К. Программирование питания: питание детей старше года / А.К. Батурич, Э.Э. Кешабянц, А.М. Сафронова и др. // Педиатрия. Журнал им. Г.С. Сперанского. – 2013. – Т. 92, №2. – С. 92-99.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Jobgen W. Dietary L-arginine supplementation reduces white fat gain and enhances skeletal muscle and brown fat masses in diet-induced obese rats / W. Jobgen, C. J. Meininger, S.C. Jobgen et al. // J Nutr. 2009 Feb;139(2):230–7.
2. Wu Z. Regulation of brown adipose tissue development and white fat reduction by L-arginine / Z. Wu, M. C. Satterfield, F. W. Bazer et al. // Curr Opin Clin Nutr Metab Care. 2012 Nov;15(6):529–38.
3. Tutelyan V.L. Rasprostranennost' ozhireniya i izbytochnoy massy tela sredi detskogo naseleniya RF [Prevalence of obesity and overweight among the children's population of the Russian Federation] / V. L. Tutelyan, A. K. Baturin: multicenter study. Pediatrics, 2014.-N 5.-p.28-31 [in Russian]
4. Rekomenduemye srednesutochnye nabory produktov dlja pitaniya detejj 7 - 11 i 11 - 18 let. Metodicheskie rekomendacii № 0100/8604-07-34 / Sbornik normativnykh pravovykh aktov po organizacii pitaniya v obshheobrazovatel'nykh uchrezhdenijakh. Chast' 2. [Recommended average daily food sets for children aged 7-11 and 11-18 years. Methodological recommendations No. 0100/8604-07-34 / Collection of normative legal acts on catering in educational institutions. Part 2]. - MOSCOW: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор, 2009. - pp. 135-138 [in Russian]
5. Ladodo K. S. Lechebnoe pitanie v pediatricheskoj praktike [Therapeutic nutrition in pediatric practice] / K. S. Ladodo // Voprosy pitaniya [Nutrition issues]. 1996, No. 5, pp. 30-34 [in Russian]
6. Strokova T.V. Ehffektivnost' arginina i omega-3 PNZhK v lechenii ozhireniya u detejj [Effectiveness of arginine and omega-3 PUFA in the treatment of obesity in children] / T. V. Strokova, E. V. Pavlovskaya, A. G. Surkov et al. // Voprosy prakticheskoy pediatrii [Questions of Practical Pediatrics] 2018; 13(1): 12-20 [in Russian]

7. Lucotti P. Beneficial effects of a long-term oral L-arginine treatment added to a hypocaloric diet and exercise training program in obese, insulin-resistant type 2 diabetic patients / P. Lucotti, E. Setola, L. D. Monti et al. // *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2006 Nov;291(5):E906–12.
8. Detskie bolezni [Childhood illnesses] / Edited by A. A. Baranova. M., 2002. 879 p. [in Russian]
9. Fiziologija rosta i razvitija detej i podrostkov (teoreticheskie i klinicheskie voprosy) [Physiology of growth and development of children and adolescents (theoretical and clinical issues)] / Ed. A. A. Baranova and L. A. Shechplyagina. Moscow, 2000. 605 p. [in Russian]
10. Rudmen D. Belkovaja i ehnergeticheskaja nedostatochnost' pitaniya [Protein and energy malnutrition. In the book: Internal diseases] / D. Rudmen. Translated from English. M.: Medicine, 1993, vol. 2, pp. 386-396 [in Russian]
11. Babushkina A.V. L-arginin s točki zrenija dokazatel'noj mediciny (obzor literatury) [L-arginine from the point of view of evidence-based medicine (literature review)] / «Ukrainskij medicinskij chasopis» ["Ukrainian medical Chronicle"] "6 (74) X1-X11 2009 [in Russian]
12. Intensivnaja terapija v pediatrii. Prakticheskoe rukovodstvo [Intensive care in pediatrics. Practical guide] / edited by V. A. Michelson. Moscow: GEOTAR-med, 2003, vol. 2. 550 p. [in Russian]
13. Severyanova L.A. Mekhanizmy dejstvija aminokisloty L-arginina na nervnuju i immunnuju reguljatornye sistemy [the mechanisms of action of the amino acid L-arginine on the nervous and immune regulatory systems] / L. A. Severyanova, I. I. Bobyntsev // *Kurskij nauchno-prakticheskij vestnik "Chelovek i ego zdorov'e"* [Kursk Scientific and Practical Bulletin "Man and his health"], 2006, No. 3 pages 60-75 [in Russian]
14. WHO. Obesity and overweight. Newsletter No. 311, January 2015 [in Russian]
15. Detskoe pitanie: Rukovodstvo dlja vrachej [Baby food: A guide for doctors] / edited by V.A. Tutelian, I.Ya. Kon. - 3rd ed., Revised and Expanded - M.:OOO «Medicinskoe informacionnoe agentstvo», 2013. - 744 p. [in Russian]
16. Baturin A.K. Programmirovanije pitaniem: pitanie detej starshe goda [Nutrition programming: nutrition for children over one year old] / A. K. Baturin, E. E. Keshabyants, A. M. Safronova et al. // *Pediatrija. Zhurnal im. G.S. Speranskogo* [Pediatrics. G.S. Speransky Journal]. - 2013. - Vol. 92, No. 2. - pp. 92-99 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.028>

ВЛИЯНИЕ ХЕЛАТНЫХ МИКРОУДОБРЕНИЙ НА ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА СЕМЯН СОРТОВ ЗЕРНОВОГО СОРГО

Научная статья

Степанченко Д.А.¹, Куколева С.С.², Старчак В.И.^{3,*}, Кибальник О.П.⁴, Ефремова И.Г.⁵

¹ ORCID: 0000-0002-8263-188X;

² ORCID: 0000-0002-0582-9024;

³ ORCID: 0000-0001-7312-4547;

⁴ ORCID: 0000-0002-1808-8974;

⁵ ORCID: 0000-0002-7188-9332;

¹⁻⁵ Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, Саратов, Россия

* Корреспондирующий автор (viktoria_starchak[at]rambler.ru)

Аннотация

Зерновое сорго является ценной сельскохозяйственной культурой, способное давать стабильный урожай при аномально высоких температурах. Благодаря засухоустойчивости и жаростойкости сорго пользуется большой популярностью в регионах рискованного земледелия. Ареал возделывания сорговых культур простирается в странах Азии, Африки, Южной и Северной Америки, Европе и Австралии. Сорговые культуры возделывают на пищевые и кормовые цели. В современной земледелии все больший интерес вызывают ресурсосберегающие технологии, направленные на снижение себестоимости выращиваемой продукции и получение стабильно высокого урожая сельскохозяйственных культур, конкурентного качества. Одним из элементов таких технологий является применение малозатратных удобрений нового поколения, к которым относятся хелатные удобрения. В статье приведены данные о влиянии хелатных микроудобрений, производимых в НПО «СИЛА ЖИЗНИ», на набухание, энергию прорастания и всхожесть семян сортов зернового сорго селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». Выявлено действие хелатных микроудобрений на посевные качества семян, а именно на всхожесть. Самыми отзывчивыми сортами на оба препарата оказались сорта РСК Партизан, Гарант и РСК Каскад.

Ключевые слова: удобрения, сорго, сорт, всхожесть, прорастание, набухание.

THE EFFECT OF CHELATED MICRONUTRIENTS ON THE SOWING QUALITIES OF SEEDS OF GRAIN SORGHUM VARIETIES

Research article

Stepanchenko D.A.¹, Kukoleva S.S.², Starchak V.I.^{3,*}, Kibalnik O.P.⁴, Efremova I.G.⁵

¹ ORCID: 0000-0002-8263-188X;

² ORCID: 0000-0002-0582-9024;

³ ORCID: 0000-0001-7312-4547;

⁴ ORCID: 0000-0002-1808-8974;

⁵ ORCID: 0000-0002-7188-9332;

¹⁻⁵ Russian Research and Design Institute of grain sorghum and Corn, Saratov, Russia

* Corresponding author (viktoria_starchak[at]rambler.ru)

Abstract

Grain sorghum is a valuable agricultural crop capable of yielding a stable harvest at abnormally high temperatures. Due to drought resistance and heat resistance, grain sorghum is very popular in risk-prone farming regions. The area of cultivation of grain sorghum crops extends to Asia, Africa, South and North America, Europe and Australia. grain sorghum crops are cultivated for food and fodder purposes. In modern agriculture, resource-saving technologies aimed at reducing the cost of grown products and obtaining a consistently high crop yield of competitive quality present increasing interest. One of the elements of such technologies is the use of next generation low-cost fertilizers, which include chelated fertilizers. The article presents data on the effect of chelated micronutrients produced in the NGO "SILA ZHYZNI" on the swelling, germination energy and germination of seeds of grain sorghum varieties selected by the Russian Research and Design Institute of grain sorghum and Corn "Rossorgo". The authors determine the effect of chelated micronutrients on the sowing qualities of seeds, namely on germination. The varieties that proved to be most responsive to both preparations were the following: RSK Partizan, Garant and RSK Kaskad.

Keywords: fertilizers, sorghum, variety, germination, swelling.

Введение

В настоящее время в сельском хозяйстве широко применяются малозатратные технологии возделывания сельскохозяйственных культур, элементом которых является применение современных удобрений: гуминовые препараты, хелатные микроудобрения, почвоулучшители, биоудобрения [3], [4], [5]. Данные препараты являются экономичными, их использование способствует увеличению урожая вегетативной массы растений [6], [8], [9], [10].

В научной литературе отражены данные о положительном влиянии данных препаратов на вегетативные и генеративные признаки зерновых, зернобобовых, масличных и овощных культур [7], [8]. В последнее время все большую популярность приобретают микроудобрения хелатной формы, применение которых в значительной степени оказывает влияние не только на урожайность культуры, но и на величину хозяйственно-ценных признаков. В литературных источниках встречаются данные о влиянии хелатных микроудобрений на посевные качества семян полевых культур. Однако, влияние хелатных удобрений на эти показатели сорговых культур изучено недостаточно. Поэтому исследование особенностей влияния хелатных форм микроудобрений на посевные качества семян зернового сорго является актуальным.

Методы и принципы исследования

Лабораторные опыты проводились в ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в период с 2020 по 2021 гг. Объектами исследований являлись сорта зернового сорго селекции института (Бакалавр, Ассистент, Магистр, Гарант, РСК Оникс, РСК Локус, РСК Оникс, РСК Партизан) и хелатные микроудобрения производимые компанией НПО «СИЛА ЖИЗНИ» – Reasil Forte Carb Ca/Mg/B Amino и Reasil micro Amino Zn.

Хелатные микроудобрения обладали следующим составом: Reasil Forte Carb-Ca/Mg/B-Amino – жидкое удобрение. Сбалансированный состав с высоким процентным содержанием бороэтанолamina, кальция и магния в комплексе с гидроксикарбоновыми и аминокислотами, обеспечивает высокий уровень биодоступности питательных элементов, их незамедлительное поступление и мобильность в растении. Кальций является транспортировщиком всех минералов, регулирует их усвояемость растением, играет важную роль в развитии клеточных стенок растений и плодов, отвечает за деление и силу клеток. Бор, доказанный синергист кальция, улучшает углеводный и белковый обмены. Магний является основным компонентом хлорофилла и необходим для синтеза аминокислот, витаминов, масел и сахаров. Применяется для широкого спектра культур. Благодаря гидроксикарбоновым кислотам и аминокислотам обеспечивается поступление питательных веществ на более высоком уровне. Совместим с большинством пестицидов и минеральных удобрений.

Отличительная особенность удобрения Reasil micro Amino Zn – высокое содержание цинка в легкодоступной для растений форме. Цинк содержится в комплексе с гуминовыми, гидроксикарбоновыми и аминокислотами, что значительно повышает его усвоение растениями через листовую поверхность, а также их подвижность внутри растения. Не содержит химических элементов и соединений (синтетических хелатообразователей), оказывающих вредное влияние на рост и развитие растений. Это мульти-компонентное удобрение, в котором каждое активное вещество усиливает эффективность остальных, позволяя воздействовать на растение сразу по всем доступным направлениям. Подходит для интенсивных систем ведения сельского хозяйства, а также для применения в органическом земледелии. Reasil micro Amino Zn – биологический стимулятор роста растений. Аминокислоты (L-глицин, L-лизин, L-треонин и др.) являются мощным стимулятором роста растений, играют роль комплексообразователей для незаменимых микроэлементов, транспортируя их в растение в доступной форме. Гидроксикарбоновые кислоты (глюконовая, молочная, янтарная, лимонная и др.) способствуют максимальному усвоению элементов питания растением. Стимулируют обменные процессы в растении, увеличивают проницаемость клеточной мембраны. Жидкое органическое удобрение Reasil micro Amino Zn способствует значительному повышению урожайности и качества.

Характеристика сортов зернового сорго

Бакалавр зарегистрирован в Госреестре Госсорткомиссии в 2019 году, среднеранний сорт. Высота растений 135-140 см. Направление возделывания: на зерно и на силос. Урожай зерна варьирует от 4,1 до 4,7 т/га, а силоса 19,5-24,0 т/га. Масса 1000 зерен 40,1 г. Содержание протеина в зерне 10,3-11,9%, крахмала в зерне – 71,0-72,0%. Зерно не осыпается, растения не полегают, засухоустойчивый, холодостойкий, пригоден к механизированной уборке.

Ассистент зарегистрирован в Госреестре Госсорткомиссии в 2019 году, среднеранний сорт. Высота растений 130-136 см. Направление возделывания на зерно и на силос. Урожай зерна варьирует от 3,7 до 3,8 т/га, силоса 20,0-22,3 т/га. Масса 1000 зерен – 42,0 г. Содержание протеина в зерне 10,9-11,5%, крахмала в зерне – 70,5-71,6%. Зерно не осыпается, растения не полегают, не ломаются, сорт засухоустойчивый, холодостойкий, пригоден к механизированной уборке.

Магистр зарегистрирован в Госреестре Госсорткомиссии в 2019 году. Сорт среднеранний. Высота растений 120-129 см. Направление возделывания на зерно и на силос. Урожай зерна варьирует от 2,88 до 3,27 т/га, силоса 24,90-35,50 т/га. Масса 1000 зерен – 41,4 г. Содержание протеина в зерне 10,9-11,7%, крахмала в зерне – 71,8-72,3%. Зерно не осыпается, растения не полегают, не ломаются, сорт засухоустойчивый, холодостойкий, пригоден к механизированной уборке.

Гарант зарегистрирован в Госреестре Госсорткомиссии в 2016 году. Сорт раннеспелый. Высота растений 108-114 см. Направление возделывания на зерно и на силос. Урожай зерна варьирует от 2,40 до 3,15 т/га, силоса 11,80-17,40 т/га. Масса 1000 зерен – 22,8 г. Содержание протеина в зерне 12,8-13,3%, крахмала в зерне – 72,0-72,5%. Зерно не осыпается, растения не полегают, не ломаются засухоустойчивый, холодостойкий, пригоден к механизированной уборке.

РСК Каскад зарегистрирован в реестре Госсорткомиссии в 2020 году. Сорт среднеспелый. Высота растений 128-130 см. Направление возделывания на зерно и на силос. Урожай зерна варьирует от 5,00 до 5,46 т/га, силоса – 23,4-26,7 т/га. Масса 1000 зерен – 32,8 г, масса метелки с зерном 35,7 г. Содержание протеина в зерне 9,6-11%, крахмала в зерне – 72-73,2%. Зерно не осыпается, растения не полегают, не ломаются засухоустойчивый, холодостойкий, пригоден к механизированной уборке.

РСК Локус зарегистрирован в Госреестре Госсорткомиссии в 2020 году. Сорт среднеспелый. Высота растений 125-130 см. Направление возделывания на зерно и на силос. Урожай зерна варьирует от 3,20 до 3,65 т/га, силоса – 13,9-19,7 т/га. Масса 1000 зерен – 29,3 г, масса метелки с зерном 32,5 г. Содержание протеина в зерне 9,3-10,9%, крахмала в зерне – 72,3-72,9%. Зерно не осыпается, растения не полегают, не ломаются, отличаются засухоустойчивостью, холодостойкостью.

Сорта зернового сорго РСК Оникс и РСК Партизан переданы на Государственное сортоиспытание в Госсорткомиссию в 2018 году [12].

Лабораторные исследования по влиянию хелатных удобрений на посевные качества семян включали три варианта обработки семян: 1 – дистиллированной водой (контроль); 2 – Reasil micro Amino Zn; 3 – Reasil Forte Carb-Ca/Mg/B Amino. Перед проведением опыта семена сорго обрабатывали рабочим раствором 1 мл препарата на 10 мл воды.

Набухание семян определяли по формуле [11]: $A = (M1 - M2) \times 100 / M2$, где M1 и M2 – массы набухшего и исходного образцов.

Результаты исследований подвергались статистической обработке данных программой Agros версии 2.09 методом двухфакторного дисперсионного анализа, где фактор А – сорт, а фактор В – препарат [2].

Основные результаты

Основной характеристикой процесса прорастания семян сельскохозяйственных культур является набухание. Семена, находящиеся в состоянии покоя, в период прорастания проходят три этапа: активация метаболизма; подготовка к началу роста растяжением и дальнейший рост органов проростка. На первом этапе (гидратация) гидрофобные частицы притягивают воду. Зерно увеличивается в объеме, что приводит к размягчению оболочек и пробуждению зародыша к жизнедеятельности. Этот процесс сопровождается переходом в активное состояние ферментов, витаминов и др., что обеспечивает мобилизацию запасных питательных веществ путем их гидролиза и поступление растворимых веществ к точкам роста. Быстрота и степень набухания семян связаны с пробуждением зародыша к активной жизнедеятельности [1]. В наших исследованиях выявлены сортовые различия по степени набухания семян зернового сорго при обработке хелатными удобрениями.

Результаты лабораторных исследований показали, что применение хелатных удобрений Reasil micro Amino Zn и Reasil Forte Carb-Ca/Mg/B Amino оказали разное влияние на набухание семян зернового сорго. Дисперсионным анализом установлено существенное влияние фактора А на формирование данного признака, а по фактору В существенного влияния выявлено не было. Доля сорта в общей изменчивости составила 31,2%, по вариантам опыта 0,4%, взаимодействие факторов 3,9 %.

Интервал варьирования признака у сортов составлял от 92,58 до 111,01%. Значение признака по вариантам опыта изменялось в пределах 98,15-98,68% (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние хелатных микроудобрений на набухание семян сортов зернового сорго в среднем за 2020- 2021 гг.

№	Сорта	Варианты опыта, %			Среднее по фактору А, %
		Контроль	Реасил Zn	Реасил Ca/Mg/B	
1	Бакалавр	92,15	94,57	93,08	93,27 а
2	Ассистент	102,62	96,62	91,27	96,83 а
3	Магистр	97,47	98,75	97,38	97,87 а
4	Гарант	110,28	105,68	106,55	107,51bc
5	РСК Каскад	92,97	92,17	92,60	92,58 а
6	РСК Локус	94,33	97,03	91,50	94,29 а
7	РСК Оникс	96,00	102,90	99,13	99,34 а
8	РСК Партизан	109,67	109,68	113,68	111,01 с
Среднее по фактору В		99,44	99,68	98,15	-
F _{факт} (А)					9,49
F _{факт} (В)					0,37
F _{факт} (АВ)					0,60
НСР _{0,05} (А)					6,12

Лабораторные опыты по применению хелатных микроудобрений Amino и Reasil micro Amino Zn на семенах зернового сорго включали в себя оценку энергии прорастания семян. В результате активации физиолого-биохимических процессов под действием микроудобрений на 3-и сутки набухания и прорастания семян сортов зернового сорго были выявлены некоторые тенденции проявления влияния на энергию прорастания (таблица 2).

Обработка семян сорго хелатными удобрениями оказала существенное влияние на энергию прорастания семян по фактору А (сорт), по фактору В (варианты опыта) существенных различий выявлено не было.

Доля фактора А в общей изменчивости достигла 22,4%, по вариантам опыта – 1,4%, взаимодействие факторов – 4,0%.

Интервал варьирования признака у сортов был в пределах от 69,56 до 89,0 %. Значение признака по вариантам опыта варьировало от 76,67 до 79,88%.

Таблица 2 – Влияние хелатных микроудобрений на энергию прорастания семян зернового сорго в среднем за 2020-2021 гг.

№	Сорта	Варианты опыта, %			Среднее по фактору А, %
		Контроль	РеасилZn	РеасилCa/Mg/B	
1	Бакалавр	78,33	81,00	80,66	80,00 с
2	Ассистент	75,33	86,00	77,67	79,67 bc
3	Магистр	80,00	82,00	85,00	82,33 cd
4	Гарант	69,33	74,67	83,00	75,66 abc
5	РСК Каскад	72,33	69,00	73,00	71,44 а
6	РСК Локус	70,00	70,67	68,00	69,56 а
7	РСК Оникс	81,67	84,33	81,33	82,44 cd
8	РСК Партизан	86,33	90,33	90,33	89,00 d
Среднее по фактору В		76,67	79,75	79,88	
F _{факт} (А)					5,99
F _{факт} (В)					1,31
F _{факт} (АВ)					0,54
НСР _{0,05} (А)					7,24

Обработка семян растворами хелатных удобрений оказало существенное влияние на всхожесть семян зернового сорго по сортам.

Доля фактора А в общей изменчивости достигла 12,0%, по вариантам опыта 8,7%, взаимодействие факторов 5,7%.

Интервал варьирования признака у сортов был в пределах от 71,11 до 90,28 %. Значение признака по вариантам опыта варьировало от 69,08 до 80,58 % (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние хелатных микроудобрений на всхожесть семян зернового сорго в среднем за 2020-2021 гг.

№	Сорта	Варианты опыта, %			Среднее по фактору А, %
		Контроль	Реасил Zn	Реасил Ca/Mg/B	
1	Бакалавр	67,33	80,83	75,17	74,44 а
2	Ассистент	73,33	75,50	79,83	76,22 а
3	Магистр	72,67	79,67	71,17	74,50 а
4	Гарант	54,33	77,83	81,17	71,11 а
5	РСК Каскад	61,67	76,50	75,83	71,33 а
6	РСК Локус	70,67	78,17	67,67	72,17 а
7	РСК Оникс	72,00	82,00	79,33	77,78 а
8	РСК Партизан	80,67	94,17	96,00	90,28 b
Среднее по фактору В		69,08 а	80,58 b	78,27b	
F _{факт} (А)		2,83			
F _{факт} (В)		7,17			
F _{факт} (АВ)		0,66			
НСР _{0,05} (А)		10,36			
НСР _{0,05} (В)		6,35			

Обсуждение

В наших исследованиях выявлены незначительные сортовые различия по степени набухания семян. На сорте РСК Оникс обработка семян раствором Reasil micro Amino Zn способствовала повышению набухаемости семян и составила 102,90%, что превышало контроль на 7,2%. Применение хелатных препаратов не оказало существенного влияния на процесс набухания зернового сорго. Однако, в некоторых вариантах опыта наблюдалась тенденция к усилению процесса набухания. На варианте с Reasil micro Amino Zn выделились сорта Бакалавр и РСК Локус, а на варианте с применением Reasil Forte Carb-Ca/Mg/B РСК Оникс и РСК Партизан (таблица 1).

Изучалось действие хелатных микроудобрений Reasil Forte Carb -Ca/Mg/B Amino и Reasil micro Amino Zn на энергию прорастания и на всхожесть семян зернового сорго. В результате активации физиолого-биохимических процессов под действием микроудобрений на 3-и сутки набухания и прорастания семян сортов зернового сорго выявлены некоторые тенденции проявления влияния микроудобрений на энергию прорастания. Действие хелатных микроудобрений на энергию прорастания семян в наибольшей степени усилилось на сортах Ассистент при обработке семян Reasil micro Amino Zn и Гарант при применении Reasil Forte Carb -Ca/Mg/B Amino. Энергия роста увеличилась до 86-83% соответственно, что превышало контрольный вариант на 14,2 и 19,7%. Обработка семян хелатными микроудобрениями не оказала существенного влияния на данный показатель. Следует отметить тенденцию увеличения энергии прорастания под влиянием применения микроудобрения Reasil Forte Carb-Ca/Mg/B Amino и Reasil micro Amino Zn до 93, 33% (таблица 2).

Одним из важных показателей определяющих посевные качества семян является лабораторная всхожесть. Применение растворов хелатных удобрений оказало существенное влияние на лабораторную всхожесть семян зернового сорго. Самыми отзывчивыми сортами на применяемые удобрения оказались РСК Партизан (94,17-96,0%), Гарант (77,83-81,17%) и РСК Каскад (76,50-75,83%). Использование удобрений повысило всхожесть семян по отношению к контрольному варианту у РСК Партизана на 16,7-19,0%, у Гаранта на 43,3-49,4%, РСК Каскад на 24,0-23,0%. Обработка семян зернового сорго сорта Бакалавр препаратом Reasil micro Amino Zn способствовала увеличению всхожести до 80,83%, что превысило контрольный вариант на 20,1%.

Применение препаратов в хелатной форме оказало существенное влияние на всхожесть семян зернового сорго. Особенно явно это видно у сорта РСК Партизан, оба удобрения оказались эффективны. На варианте Reasil micro Amino Zn отличился сорт РСК Оникс, а на варианте Reasil Forte Carb-Ca/Mg/B – Гарант.

Заключение

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что применение хелатных удобрений производимых НПО «СИЛА ЖИЗНИ» оказало разностороннее влияние на посевные качества семян сортов зернового сорго. Отмечена тенденция усиления процесса набухания семян и повышения энергии прорастания. Выявлена эффективное влияние препаратов на лабораторную всхожесть семян зернового сорго.

Таким образом, использование хелатных микроудобрений в предпосевной обработке семян является перспективным сортовым агроприемом, способствующим активации физиолого-биохимических процессов на начальных этапах набухания и прорастания семян сортов зернового сорго.

Финансирование

Проект был выполнен в рамках тематического плана согласно государственному заданию Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

Funding

The project was completed within the thematic plan according to the state order Ministry of Agriculture of the Russian Federation.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам фирмы НПО «Сила Жизни» за предоставленные препараты.

Acknowledgement

We would like to express our gratitude to the staff of the science and production association "Sila Zhizni" for the drug samples provided.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Аскоченская Н.А. Водный режим семян / Н.А. Аскоченская // Мат-лы Всесоюз. симпозиума «Регуляция водного обмена растений». – К.:Наукова думка, 1984.– С.42-44.
2. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М.: Колос, 2011. – 336 с.
3. Ефремова И.Г. Эффективность гуминовых препаратов на посевах сахарного сорго в черноземной степи Саратовского правобережья / И.Г. Ефремова, О.П. Кибальник, Д.С. Семин и др. // Аграрный научный журнал – 2020.– № 5.– С. 9-13.
4. Кадыров С. В. Влияние стимуляторов роста и микроудобрений на посевные качества семян гречихи / С. В. Кадыров, А. В. Козлобаев // Совершенствование технологий производства зерновых, кормовых и технических культур в ЦЧР. – Воронеж, 2011. – С. 24-29.
5. Кибальник О.П. Продуктивность сахарного сорго при использовании гуминовых препаратов в условиях нижнего Поволжья / О.П. Кибальник, И.Г. Ефремова, Д.С. Семин и др. // Нива Поволжья.– 2020. – №3 (56).– С. 3-8.
6. Корсаков К.В. Продуктивность свеклы столовой при внесении гуминовых препаратов и хелатных удобрений на орошаемых каштановых почвах Саратовского Заволжья / К.В. Корсаков, В.В. Пронько, Н.А. Пронько и др. // Аграрный научный журнал.– 2019.–№ 5.–С. –25-29.
7. Корсаков К.В. Влияние гуминовых препаратов и хелатных форм удобрений на продуктивность столовой моркови в Саратовском Заволжье при орошении / К.В. Корсаков, Н.А. Пронько, В.В. Пронько и др. // Аграрный научный журнал.– № 4.– 2019 г.– С.– 16-20.
8. Корсаков К.В. Сравнительная оценка отзывчивости орошаемых овощных культур на гуминовые удобрения в Саратовском Заволжье / К.В. Корсаков, Н.А. Пронько, В.В. Пронько и др. // Проблемы агрохимии и экологии.– № 3.– 2020 г.– С.– 3-7.
9. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. – М., 1985.–267 с.
10. Рак М.В. Эффективность применения жидких хелатных микроудобрений микростим при возделывании кукурузы / М.В. Рак, С.А. Титова, Т.Г. Николаева и др. // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – № 1(54). – С. 200-207.
11. Третьяков Н.Н. Практикум по физиологии растений / Н.Н. Третьяков. – М.: Колос, 1991.–271 с.
12. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. В 2-х т. Т. 1 «Сорта растений»/ Официальное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». – 2020.–516 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Askochenskaya N.A. Vodnyy rezhim semjan [water regime of seeds] / N. A. Askochenskaya // Mat-ly Vsesoyuz. simpoziuma «Reguljacija vodnogo obmena rastenijj» [Mat-ly Vsesoyuz. Symposium "Regulation of water metabolism of plants"]. - K.:Naukova dumka, 1984. - pp.42-44 [in Russian]
2. Dospekhov B. A. Metodika polevogo opyta [Methodology of field experience] / B. A. Dospekhov. - M.: Kolos, 2011– 336 p. [in Russian]
3. Efremova I.G. Jeffektivnost' guminovykh preparatov na posevah sahnarnogo sorgo v chernozemnoj stepi Saratovskogo pravoberezh'ja [The effectiveness of humic preparations on sugar sorghum crops in the chernozem steppe of the Saratov right bank] / I. G. Efremova, O. P. Kibalnik, D. S. Semin, et al. // Agrarnyj nauchnyj zhurnal [Agrarian Scientific Journal] - 2020.- No. 5.- pp. 9-13 [in Russian]
4. Kadyrov S. V. Vlijanie stimulyatorov rosta i mikroudobrenijj na posevnye kachestva semjan grechikhi [The effect of growth stimulants and micronutrients on the sowing qualities of buckwheat seeds] / S. V. Kadyrov, A. V. Kozlobaev // Sovershenstvovanie tekhnologijj proizvodstva zernovykh, kormovykh i tekhnicheskikh kul'tur v CChR [Improvement of technologies for the production of grain, fodder and industrial crops in the CDR]. - Voronezh, 2011. - pp. 24-29 [in Russian]
5. Kibalnik O.P. Produktivnost' sakharnogo sorgo pri ispol'zovanii guminovykh preparatov v uslovijakh nizhnego Povolzh'ja [Productivity of sugar sorghum when using humic preparations in the conditions of the lower Volga region] / O. P. Kibalnik, I. G. Efremova, D. S. Semin, et al. // Niva Povolzh'ja [The field of the Volga region].– 2020. – №3 (56).– pp. 3-8 [in Russian]
6. Korsakov K.V. Produktivnost' svekly stolovojj pri vnesenii guminovykh preparatov i khelatnykh udobrenijj na oroshaemykh kashtanovykh pochvakh Saratovskogo Zavolz'h'ja [Productivity of table beet when applying humic preparations and chelated fertilizers on irrigated chestnut soils of the Saratov Volga region] / K. V. Korsakov, V. V. Pronko, N. A. Pronko et al. // Agrarnyj nauchnyj zhurnal [Agrarian Scientific Journal].- 2019.-No. 5.-pp. -25-29 [in Russian]
7. Korsakov K.V. Vlijanie guminovykh preparatov i khelatnykh form udobrenijj na produktivnost' stolovojj morkovi v Saratovskom Zavolz'h'e pri oroshenii [The effect of humic preparations and chelated forms of fertilizers on the productivity of table carrots in the Saratov Volga region during irrigation] / K. V. Korsakov, N. A. Pronko, V. V. Pronko et al. // Agrarnyj nauchnyj zhurnal [Agrarian Scientific Journal].- No. 4.- 2019- p.- 16-20 [in Russian]
8. Korsakov K.V. Sravnitel'naja ocenka otzyvchivosti oroshaemykh ovoshhnykh kul'tur na guminovye udobrenija v Saratovskom Zavolz'h'e [Comparative assessment of the responsiveness of irrigated vegetable crops to humic fertilizers in the Saratov Volga region] / K. V. Korsakov, N. A. Pronko, V. V. Pronko et al. // Problemy agrokhimii i ehkologii [Problems of agrochemistry and ecology].- No. 3.- 2020- p.- 3-7 [in Russian]

9. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozhajjstvennykh kul'tur [Methodology of state variety testing of agricultural crops]. - M., 1985.-267 p. [in Russian]
10. Rak M.V. Ehffektivnost' primenenija zhidkikh khelatnykh mikroudobrenijj mikrostim pri vzdelyvanii kukuruzy [The effectiveness of the use of liquid chelated micronutrients microstim in the cultivation of corn] / M. V. Rak, S. A. Titova, T. G. Nikolaeva // Pochvovedenie i agrokhimija [Soil science and agrochemistry]. – 2015. – № 1(54). – pp. 200-207 [in Russian]
11. Tretyakov N.N. Praktikum po fiziologii rastenijj [Practicum on plant physiology] / N. N. Tretyakov. - M.: Kolos, 1991.- 271 p. [in Russian]
12. Gosudarstvennyj reestr selekcionnykh dostizhenijj, dopushhennykh k ispol'zovaniju. «Sorta rastenijj» [The State Register of breeding achievements approved for use. In 2 vols. Vol. 1 "Plant varieties"] / Official publication. M.: FSBI "Rosinformagrotech". - 2020.-516 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.029>**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ AgNO₃ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ШТАММОМ ДРОЖЖЕВОГО ГРИБА *SACCHAROMYCES ELLIPSOIDEUS* BDU – XR1**

Научная статья

Азадалиева С.Ф.¹, Джафаров М.М.², Гусейнова С.И.³, Ганбаров Х.Г.⁴*⁴ ORCID: 0000-0002-6847-3598;¹ Университет Одлар Юрду, Баку, Азербайджан;^{2, 3, 4} Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан

* Корреспондирующий автор (khuda1949[at]mail.ru)

Аннотация

Целью данной работы было изучение влияния концентрации соли нитрата серебра (AgNO₃) на формирование наночастиц серебра штаммом дрожжевого гриба *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1. Выявлено, что способность исследуемого штамма дрожжевого гриба образовывать наночастицы серебра была наиболее оптимальной в реакционной смеси при концентрации 0.5 и 1.0 мМ AgNO₃. Так, на 7-ой день инкубации наблюдалось как изменение (потемнение) цвета реакционной смеси, так и пик поглощения при длине волны 405 и 408 нм, соответственно, при концентрации 0.5 и 1.0 мМ AgNO₃. При концентрации 3.0, 5.0 и 10.0 мМ соли нитрата серебра процесс биосинтеза наночастиц не наблюдался.

Под сканирующим электронным микроскопом, сформированные в обоих образцах наночастицы серебра имели округлую форму, а их размер составлял 22.4 и 34.2-37.5 нм, соответственно, при концентрации соли нитрата серебра 0,5 и 1,0 мМ. Рентгеноспектральный анализ образцов показал наличие пика адсорбции (Ag Lα), характерного для наночастиц серебра.

Ключевые слова: *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1, соль нитрата серебра, наночастицы серебра, УФ спектрофотометр, сканирующий электронный микроскоп.

EFFECT OF AgNO₃ CONCENTRATION ON THE FORMATION OF SILVER NANOPARTICLES BY A STRAIN OF THE YEAST FUNGUS *SACCHAROMYCES ELLIPSOIDEUS* BDU - XR1

Research article

Azadaliyeva S.F.¹, Dzhafarov M.M.², Guseynova S.I.³, Ganbarov Kh.G.⁴*⁴ ORCID: 0000-0002-6847-3598;¹ Odlar Yurdu University, Baku, Azerbaijan;^{2, 3, 4} Baku State University, Baku, Azerbaijan

* Corresponding author (khuda1949[at]mail.ru)

Abstract

The aim of this article was to study the effect of the concentration of silver nitrate salt (AgNO₃) on the formation of silver nanoparticles by a strain of the yeast fungus *Saccharomyces ellipsoideus* BDU - XR1. The author determine that the ability of the yeast fungus strain under study to form silver nanoparticles was the most optimal in the reaction mixture at concentrations of 0.5 and 1.0 mM AgNO₃. On the 7th day of incubation, both a change (darkening) in the color of the reaction mixture and an absorption peak at wavelengths of 405 and 408 nm, respectively, at concentrations of 0.5 and 1.0 mM AgNO₃ were observed. At concentrations of 3.0, 5.0 and 10.0 mM of silver nitrate salt, the process of nanoparticle biosynthesis was not observed.

Under a scanning electron microscope, the silver nanoparticles formed in both samples had a rounded shape, and their size was 22.4 and 34.2-37.5 nm, respectively with a silver nitrate salt concentration of 0.5 and 1.0 mM. X-ray spectral analysis of the samples showed the presence of an adsorption peak (Ag Lα) characteristic of silver nanoparticles.

Keywords: *Saccharomyces ellipsoideus* BDU - XR1, silver nitrate salt, silver nanoparticles, UV spectrophotometer, scanning electron microscope.

Введение

В последнее время, в производстве наночастиц особое внимание уделяется использованию биологических структур. В основе процесса биологического синтеза наночастиц стоит выбор экологически безопасных агентов и использование нетоксичных материалов для стабилизации наночастиц [6], [17], [19], [20]. Использование биологических объектов (грибов, бактерий и растений) в процессе синтеза наночастиц позволяет увеличить количество и уменьшить размер получаемых наночастиц. В частности, большие перспективы имеет применение в этом процессе дрожжей [9], [14], [16] и плесневых грибов [12], [13] и бактерий [7], [18].

Стало возможным претворение в жизнь синтеза наночастиц серебра, золота, цинка, селена, титана, платина и других металлов с использованием дрожжевых грибов [8], [11], [14], [15]. С целью применения последних достижений нанотехнологий в медицинской диагностике, биотехнологии и пищевой промышленности, изучается биологическая активность наночастиц серебра, образованных дрожжевыми клетками [4], [6]. Ферменты, выделяемые клеткой гриба, восстанавливают ионы серебра до наночастиц. Наночастицы серебра более интересны своей большой площадью поверхности и уникальными физико-химическими и биологическими свойствами [5], [18], [20].

В наших предыдущих исследованиях показана способность штамма дрожжевого гриба *Saccharomyces ellipsoideus* BDU-XR1 образовывать наночастицы серебра [1] и изучалось влияние периода инкубации, количества биомассы, температуры и исходной кислотности среды (pH) на образование наночастиц серебра штаммом *S. ellipsoideus* BDU-

XR1 [2], [3], [10]. Целью данной научной работы является изучение влияния концентрации соли AgNO_3 на образование наночастиц серебра у штамма дрожжевого гриба *S. ellipsoideus* BDU - XR1.

Материалы и методы исследования

Для культивирования дрожжевого гриба *Saccharomyces ellipsoideus* BDU- XR1 была использована жидкая питательная среда следующего состава: дрожжевой экстракт - 10 г, сахара - 20 г, пептон - 20 г, вода дистиллированная - 1 л. Культуру гриба получали из «коллекции культур» научно-исследовательской лаборатории «Микробиология и Вирусология» Бакинского Государственного Университета и инкубировали в термостате при температуре 30°C в течение 48 часов. Полученную биомассу отделяли от культуральной жидкости путем фильтрования и промывали 3 раза стерильной дистиллированной водой. Путем погружения 10 граммов влажной биомассы в 90 мл стерильной дистиллированной воды была приготовлена суспензия. В отдельные колбы с приготовленной суспензией были добавлены раствор соли AgNO_3 , где концентрация соли составила 0.5 мМ, 1.0 мМ, 3.0 мМ, 5.0 мМ, 10.0 мМ. В качестве контрольного варианта использовали суспензию без добавления раствора AgNO_3 . Колбы инкубировались в темноте при температуре 30°C в течение 7 дней. Все опыты проводились в четырех повторностях и анализировались.

Образование наночастиц серебра первоначально оценивалось по визуальному изменению цвета реакционной смеси от светло-желтого до темно-коричневого. В контрольных колбах, инкубированных в тех же условиях, изменение цвета не наблюдалось. Затем, биомассу отделяли фильтрованием и проводили спектрофотометрический анализ образцов с использованием спектрофотометра UV-Vis SPECORD 250 plus (Германия). Форму и размер наночастиц серебра определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа (JEOL 7600F, Япония). Рентгеноспектральный анализ образцов осуществляли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС).

Результаты и их обсуждение

Было изучено формирование наночастиц серебра у дрожжевого гриба *Saccharomyces ellipsoideus* BDU - XR1 в зависимости от концентрации соли AgNO_3 (0.5, 1.0, 3.0, 5.0 и 10.0 мМ). Формирование наночастиц серебра в реакционных смесях с добавлением соли нитрата серебра в концентрации 0.5 и 1.0 мМ было выявлено на 7-ой день инкубации, на основе потемнения цвета (см. рисунок 1). В контрольной колбе, инкубированной в тех же условиях, изменение цвета не наблюдалось. Изменение света не происходило и при концентрациях нитрата серебра 3.0, 5.0 и 10.0 мМ, что свидетельствует об отсутствии синтеза наночастиц серебра. По-видимому, высокие концентрации ионы серебра оказывает токсическое действие на клетки дрожжей.

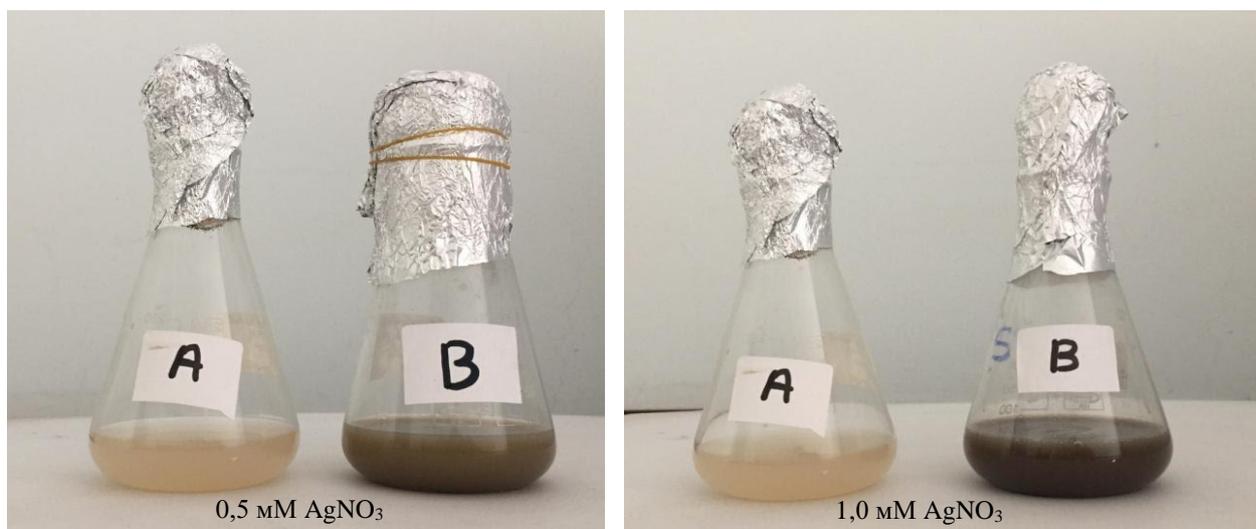


Рис. 1 – Потемнение цвета реакционной смеси во время инкубации с биомассой *Sacch. ellipsoideus* BSU-XR1: А – контроль; В – опыт

Спектрофотометрический анализ образцов с концентрацией 0.5 и 1.0 мМ показал поглощение при длине волны 405 и 408 нм, соответственно, что характерно для наночастиц серебра (рис. 2). Наибольшее количество наночастиц образовалось при концентрации 1.0 мМ AgNO_3 , где оптическая плотность (см. рисунок 2, кривая 2) намного выше, чем остальные (кривые 1, 3, 4, 5).

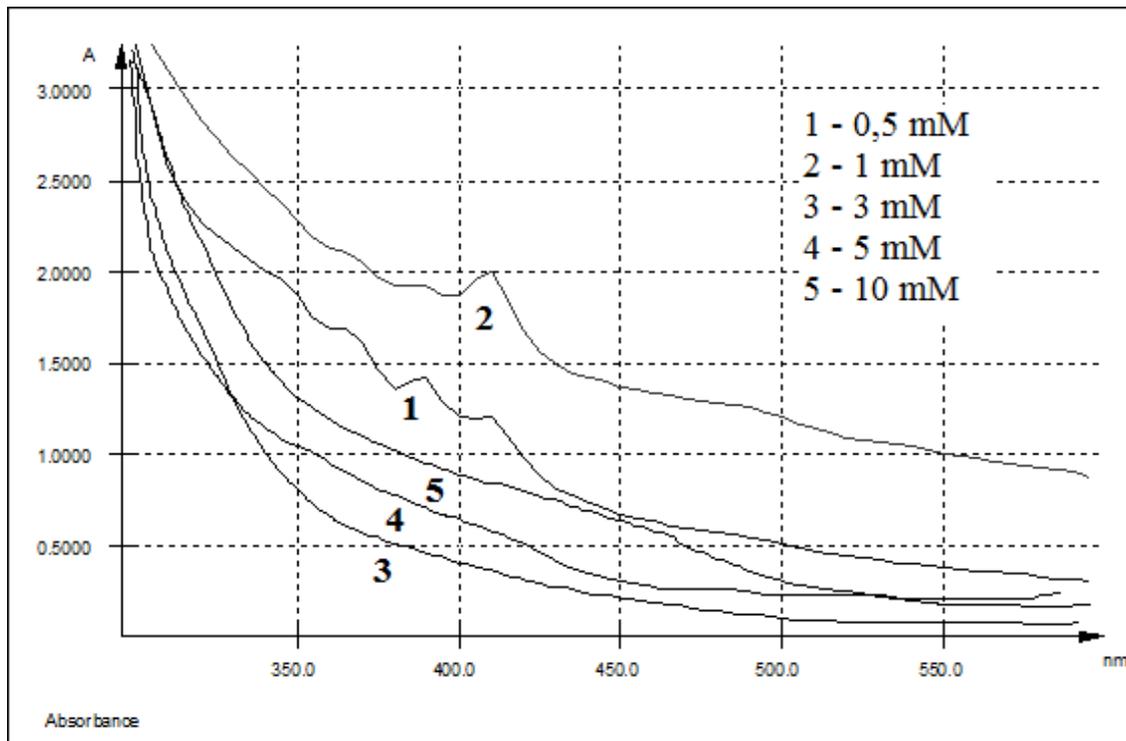


Рис. 2 – УФ-спектр наночастиц серебра, образованных дрожжевым грибом *Saccharomyces ellipsoideus* BDU-XR1 при концентрации AgNO_3 :
1 – 0,5 мМ; 2 – 1,0 мМ; 3 – 0,3 мМ; 4 – 0,5 мМ; 5 – 10,0 мМ

Электронно - микроскопический (СЭМ) анализ образцов показал, что наночастицы имеют сферическую форму и разные размеры. Размер наночастиц серебра в смеси соли нитрата серебра с концентрацией 0,5 мМ составил 22,4 нм, а с концентрацией 1,0 мМ был 34,2 - 37,5 нм (см. рисунок 3).

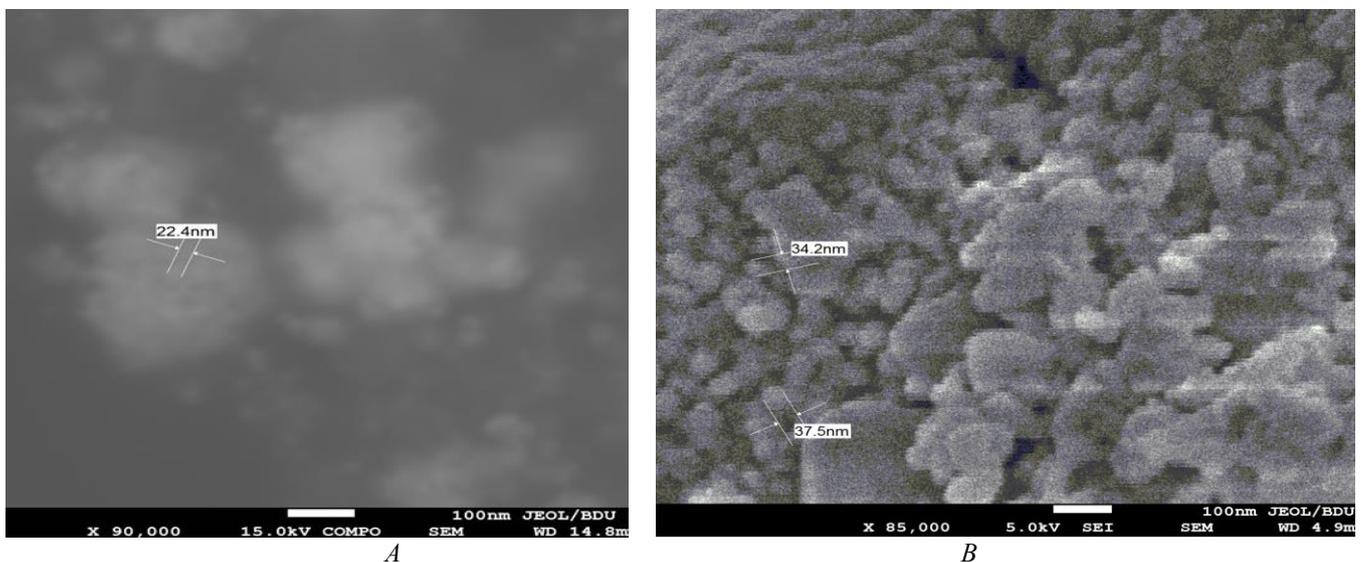


Рис. 3 – Наночастицы серебра на СЭМ, сформированные при концентрации AgNO_3 0,5 мМ (А) и 1,0 мМ (В).

По-видимому, это означает, что с увеличением концентрации соли нитрата серебра увеличивается и размер образующихся наночастиц серебра.

Полученные нами данные по увеличению размера наночастиц в зависимости от концентрации соли нитрата совпадают с результатами, полученными при исследовании другого вида дрожжевого гриба *Sacharomyces cerevisiae* [14].

Анализ наночастиц, образованных дрожжевым грибом *Saccharomyces ellipsoideus* BDU-XR1, на рентгеновском спектрометре, показал наличие пика AgLa1 , характерного для наночастиц серебра (см. рисунок 4).

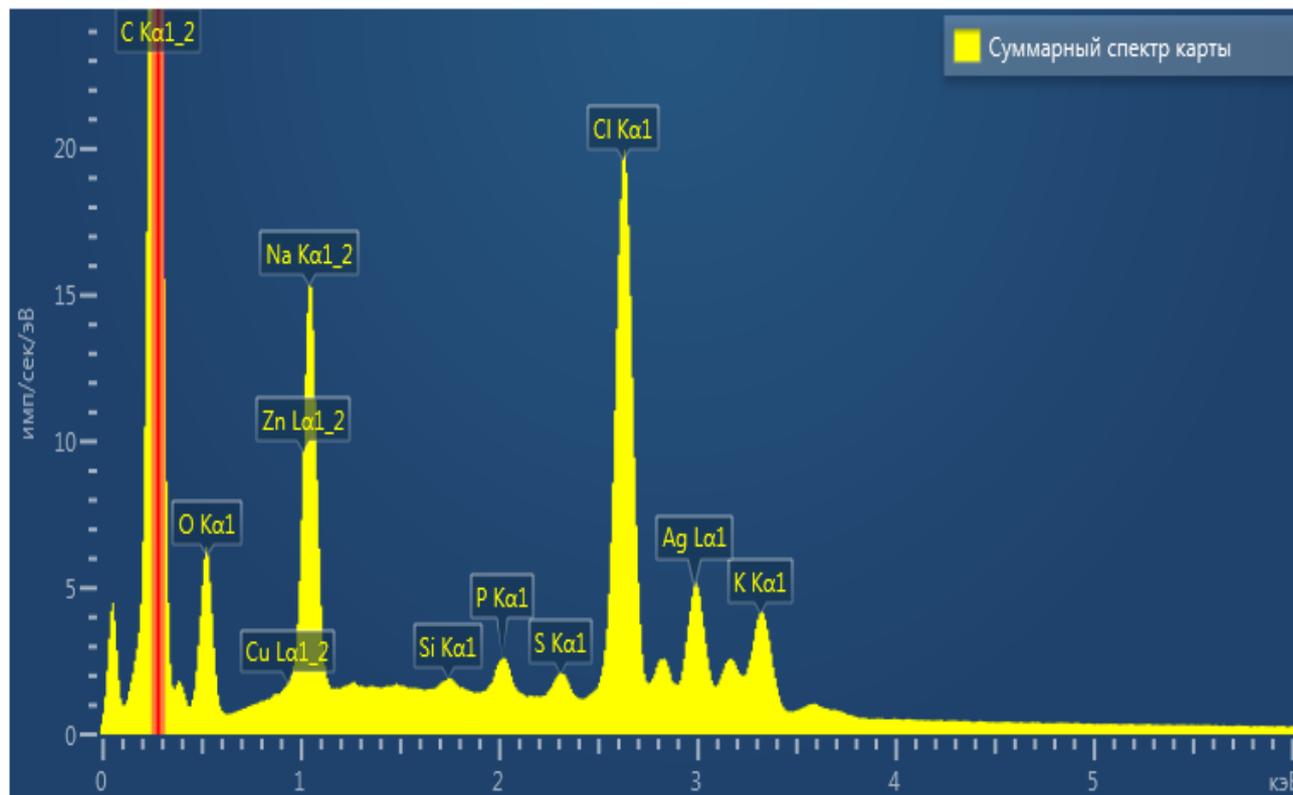


Рис. 4 – Характерный рентгеновский спектр наночастиц серебра, образованных дрожжевым грибом *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1 при концентрации соли AgNO_3 0.5 и 1.0 мМ

Заключение

С помощью методов спектрофотометрического, электронно-микроскопического и рентген спектрального анализа выявлено, что дрожжевой грибок *Saccharomyces ellipsoideus* BDU - XR1 способен образовывать наночастицы серебра при концентрации соли нитрата серебра 0.5 и 1.0 мМ. А при высоких концентрациях (3.0; 5.0 и 10.0 мМ) нитрата серебра образование наночастиц не наблюдается. По мере увеличения концентрации нитрата серебра от 0.5 мМ до 1.0 мМ размер наночастиц увеличивается от 22.4 нм до 34.2 – 37.5 нм.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Азадалиева С.Ф. Возможность образования серебряных наночастиц из дрожжевого гриба *Saccharomyces ellipsoideus* BDU XR -1 в зависимости от температуры / С.Ф.Азадалиева, М.М.Джафаров, С.Э.Меджидова и др. // Перспективы развития науки и образования. Вестник научных конференций, Тамбов. – 2017. - Часть 4. - № 5. – С. 39
2. Азадалиева С.Ф. Влияние биомассы на образование наночастиц серебра штаммом дрожжевого гриба *Saccharomyces ellipsoideus* BDU XR -1 / С.Ф.Азадалиева, М.М.Джафаров, С.И.Гусейнова и др. // Научные исследования и разработки. XXX Международная научная конференция. Москва. – 2017. С.89
3. Азадалиева С.Ф. Влияние продолжительности инкубации на образование наночастиц серебра штаммом дрожжевого гриба *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1 / С.Ф.Азадалиева, М.М.Джафаров, З.А.Агамалиев и др. // Научные труды Института Микробиологии НАНА. - 2018.- Т.16. - №1. - С.42 – 47
4. Бозкурт Х.С.Получение наночастиц металла с помощью дрожжевых грибов и их изучение / Х.С.Бозкурт, М.М.Джафаров, Х.Г.Ганбаров // Вести Бакинского Университета, Серия естест. Науки. – 2017. - № 2. - С.34 – 42
5. Баранова Е.К.Взаимодействие ионов и кластеров серебра в водных и водно-органических растворах с клетками *Candida utilis* и *Saccharomyces cerevisiae* / Е.К.Баранов, А.Л.Мулюкин, А.Н.Козлова и др. // Наукоемкие технологии. – 2005. - Т.6.- № 5.- С.33 – 37
6. Abhishek K. Green and Rapid Synthesis of Anticancerous Silver Nanoparticles by *Saccharomyces boulardii* and Insight into Mechanism of Nanoparticle Synthesis / K.Abhishek, J.Sanyog, C.Uttam // Hindawi Publishing Corporation BioMed Research Internat. – 2013. - V.9. - P.112 – 119
7. Abo-state M.A. Microbial Production of Silver Nanoparticles by *Pseudomonas aeruginosa* Cell Free Extract / M.A.Abo-state, A.M.Partila // J. Eco. Heal. Env. – 2015. - V.3. - №3. - P.91 – 98
8. Ana M. Biosynthesis of crystalline silver and gold nanoparticles by extremophilic yeasts / M.Ana, G.Mario, R.Ana et al. // Bioinorganic Chemistry and Applications. – 2011.- V.55. - P.1 – 8
9. Atef H. Biosynthesis of silver nanoparticles (Ag-Nps) (a model of metals) by *Candida albicans* and its antifungal activity on some fungal pathogens / H.Atef, K.Mogda, H.Mahmoud // New York science Journal. – 2013. - V.6(3). - P.27 – 33
10. Azadaliyeva S.F. The influence of initial acidity (pH) on the production of silver nanoparticles by *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1 / S.F.Azadaliyeva // German Science Herald. – 2019. - №3. - P.55 – 57

11. Fatima H. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces boulardii* and study their biological activities / H.Fatime, H.Nawfal, M.Mohammad // European journal of pharmaceutical and medical research. – 2017. - V.4(9).- P.65-74
12. Ganbarov K.G. Silver nanoparticles synthesized by the Azerbaijanian environmental isolated *Aspergillus niger* / K.G.Ganbarov, I.S.Ahmadov, M.A.Ramazanov et al. // Jour. Microbiol. Biotechnol. Food Sciences. – 2014. - V.4 (2). - P.137 - 141
13. Ganbarov K..G.The concentration effect of the formation of silver nanoparticles by the mold fungus *Aspergillus niger* BDU A4 / K.G.Ganbarov, I.S.Ahmadov, M.A.Ramazanov et al. // Jour. Biotechnol. – 2014. - V.28. - P. 185
14. Hassan K. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces cerevisiae* / K. Hassan, M. Soudabeh, M. Rasoul et al. // An International Journal Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology. – 2016. - V.44. - P.235 – 239
15. Kaushik R. Photocatalytic activity of biogenic silver nanoparticles synthesized using yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) extract / R.Kaushik, C.Sarkar, C.Ghosh // Applied Nanoscience. – 2015. - V.5. - P.197 – 203
16. Msheik M. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces cerevisiae* with different pH and study of antimicrobial activity against bacterial pathogens / M.Msheik, M.Abdul // Chemical Science Transactions. – 2016. - V.5.- №4. - P.906 – 911
17. Monteiro D.R. Effect of silver nanoparticles against *Candida albicans* and *Candida glabrata* biofilms / D.R.Monteiro, S.C.Silva, M.Negri et al. // Lett.Appl. Microbiol. – 2012. - V.54. - P.383 – 391
18. Narayanan K.B. Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes / K.B.Narayanan, N.Sakthivel // Advances in Colloid and Interface Science. – 2010.- V.56. - №1–2. - P. 1–13
19. Niknejad F. Green synthesis of silver nanoparticles: Advantage of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* model / F.Niknejad, M.Nabili, R.Daie et al. // Curr. Med. Mycol. – 2015. - V.1. - №3. - P.17 – 24
20. Shailesh R. Ecofriendly production of silver nanoparticles using *Candida utilis* and its mechanistic action against pathogenic microorganisms / R.Shailesh, N.Mustopa, R.Suryakant et al. // Biotechnology. – 2015. - V.5. -№1, - P.33 – 38

Список литературы на английском языке / References in English

1. Azadaliyeva S.F. Vozmozhnost' obrazovaniya serebrnykh nanochastich iz drozhzhevogo griba *Saccharomyces ellipsoideus* BDU XR -1 v zavisimosti ot temperatury [The possibility of the formation of silver nanoparticles from the yeast fungus *Saccharomyces ellipsoideus* BDU XR -1 depending on temperature] / C.F.Azadaliyeva, M.M.Jafarov, S.E.Medzhidova et al. // Perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya. Vestnik nauchnykh konferencij [Prospects for the development of science and education. Bulletin of Scientific conferences], Tambov. - 2017. - Part 4. - No. 5. - p. 39 [in Russian]
2. Azadaliyeva S.F. Vliyanie biomassy na obrazovanie nanochastich serebra shtammom drozhzhevogo griba *Saccharomyces ellipsoideus* BDU XR -1 [The effect of biomass on the formation of silver nanoparticles by a strain of the yeast fungus *Saccharomyces ellipsoideus* BDU XR -1] / S.F.Azadaliyeva, M.M.Jafarov, S.I.Huseynova et al. // Nauchnye issledovaniya i razrabotki. HHH Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya [Scientific research and development. XXX International Scientific Conference]. Moscow. - 2017. p.89 [in Russian]
3. Azadaliyeva S.F. Vliyanie prodolzhitel'nosti inkubacii na obrazovanie nanochastich serebra shtammom drozhzhevogo griba *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1 [The effect of incubation duration on the formation of silver nanoparticles by the strain of the yeast fungus *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1] / S.F.Azadaliyeva, M.M.Jafarov, Z.A.Agamaliyev et al. // Nauchnye trudy Instituta Mikrobiologii NANA [Scientific Proceedings of the Institute of Microbiology of ANAS]. - 2018.- Vol.16. - No. 1. - pp.42-47 [in Russian]
4. Bozkurt H.S. Poluchenie nanochastich metalla s pomoshh'yu drozhzhevyyh gribov i ih izuchenie [Obtaining metal nanoparticles using yeast fungi and their study] / H.S.Bozkurt, M.M.Jafarov, H.G.Ganbarov // Vesti Bakinskogo Universiteta, Seriya estest. Nauki [Vesti of Baku University, A series of estest. Science]. - 2017. - No. 2. - p.34 - 42 [in Russian]
5. Baranova E.K. Vzaimodejstvie ionov i klasterov serebra v vodnyh i vodno-organicheskikh rastvorah s kletkami *Candida utilis* i *Saccharomyces cerevisiae* [Interaction of silver ions and clusters in aqueous and water-organic solutions with *Candida utilis* and *Saccharomyces cerevisiae* cells] / E.K.Baranova, A.L.Mulyukin, A.N.Kozlova et al. // Naukoemkie tehnologii [High-tech technologies]. - 2005. - Vol.6.- No. 5.- pp.33-37. [in Russian]
6. Abhishek K. Green and Rapid Synthesis of Anticancerous Silver Nanoparticles by *Saccharomyces boulardii* and Insight into Mechanism of Nanoparticle Synthesis / K.Abhishek, J.Sanyog, C.Uttam // Hindawi Publishing Corporation BioMed Research Internat. – 2013. - V.9. - P.112 – 119
7. Abo-state M.A. Microbial Production of Silver Nanoparticles by *Pseudomonas aeruginosa* Cell Free Extract / M.A.Abo-state, A.M.Partila // J. Eco. Heal. Env. – 2015. - V.3. - №3. - P.91 – 98
8. Ana M. Biosynthesis of crystalline silver and gold nanoparticles by extremophilic yeasts / M.Ana, G.Mario, R.Ana et al. // Bioinorganic Chemistry and Applications. – 2011.- V.55. - P.1 – 8
9. Atef H. Biosynthesis of silver nanoparticles (Ag-Nps) (a model of metals) by *Candida albicans* and its antifungal activity on some fungal pathogens / H.Atef, K.Mogda, H.Mahmoud // New York science Journal. – 2013. - V.6(3). - P.27 – 33
10. Azadaliyeva S.F. The influence of initial acidity (pH) on the production of silver nanoparticles by *Saccharomyces ellipsoideus* BDU – XR1 / S.F.Azadaliyeva // German Science Herald. – 2019. - №3. - P.55 – 57
11. Fatima H. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces boulardii* and study their biological activities / H.Fatime, H.Nawfal, M.Mohammad // European journal of pharmaceutical and medical research. – 2017. - V.4(9).- P.65-74
12. Ganbarov K.G. Silver nanoparticles synthesized by the Azerbaijanian environmental isolated *Aspergillus niger* / K.G.Ganbarov, I.S.Ahmadov, M.A.Ramazanov et al. // Jour. Microbiol. Biotechnol. Food Sciences. – 2014. - V.4 (2). - P.137 - 141
13. Ganbarov K..G.The concentration effect of the formation of silver nanoparticles by the mold fungus *Aspergillus niger* BDU A4 / K.G.Ganbarov, I.S.Ahmadov, M.A.Ramazanov et al. // Jour. Biotechnol. – 2014. - V.28. - P. 185
14. Hassan K. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces cerevisiae* / K. Hassan, M. Soudabeh, M. Rasoul et al. // An International Journal Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology. – 2016. - V.44. - P.235 – 239

15. Kaushik R. Photocatalytic activity of biogenic silver nanoparticles synthesized using yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) extract / R.Kaushik, C.Sarkar, C.Ghosh // Applied Nanoscience. – 2015. - V.5. - P.197 – 203
16. Msheik M. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces cerevisiae* with different pH and study of antimicrobial activity against bacterial pathogens / M.Msheik, M.Abdul // Chemical Science Transactions. – 2016. - V.5.- №4. - P.906 – 911
17. Monteiro D.R. Effect of silver nanoparticles against *Candida albicans* and *Candida glabrata* biofilms / D.R.Monteiro, S.C.Silva, M.Negri et al. // Lett.Appl. Microbiol. – 2012. - V.54. - P.383 – 391
18. Narayanan K.B. Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes / K.B.Narayanan, N.Sakthivel // Advances in Colloid and Interface Science. – 2010.- V.56. - №1–2. - P. 1–13
19. Niknejad F. Green synthesis of silver nanoparticles: Advantage of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* model / F.Niknejad, M.Nabili, R.Daie et al. // Curr. Med. Mycol. – 2015. - V.1. - №3. - P.17 – 24
20. Shailesh R. Ecofriendly production of silver nanoparticles using *Candida utilis* and its mechanistic action against pathogenic microorganisms / R.Shailesh, N.Mustopa, R.Suryakant et al. // Biotechnology. – 2015. - V.5. -№1, - P.33 – 38

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.030>

СИНТЕЗ, ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГИДРОКСИАМИНОКИСЛОТ С ИОНАМИ МЕДИ

Научная статья

Кузнецова Н.С.*

ORCID: 0000-0003-0615-8928,

Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

* Корреспондирующий автор (kns2702[at]yandex.ru)

Аннотация

Синтезированы новые комплексные соединения на основе ионов меди и протеиногенных аминокислот L-серина и L-треонина. Реакции проводились при нагревании в растворах с последующим промыванием и высушиванием выпавших осадков солей. Состав и строение полученных соединений изучены методами ИК-спектроскопии, pH-потенциометрии, титриметрии, спектрофотометрии. Показано, что образуются комплексы в мольном соотношении металл-лиганд 1 : 2. Подтверждена бидентатная координация меди аминокислотами и N,O-хелатирование за счет донорно-акцепторных связей карбоксильной и аминогруппы. В ИК-спектрах регистрируются полосы поглощения, характерные для связей Cu-N, Cu-O и смещение максимумов функциональных групп аминокислот. Рассчитаны константы нестойкости треонината и серината меди.

Ключевые слова: треонин, серин, медь, комплексное соединение, инфракрасная спектроскопия, потенциометрия, спектрофотометрия.

SYNTHESIS, INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPLEX COMPOUNDS OF HYDROXYL AMINO ACIDS WITH COPPER IONS

Research article

Kuznetsova N.S.*

ORCID: 0000-0003-0615-8928,

Transbaikal State University, Chita, Russia

* Corresponding author (kns2702[at]yandex.ru)

Abstract

The research synthesizes new complex compounds based on copper ions and proteinogenic amino acids L-serine and L-threonine. The reactions were carried out by heating in solutions followed by washing and drying of the precipitated salts. The composition and structure of the obtained compounds were studied by IR spectroscopy, pH potentiometry, titrimetry, and spectrophotometry. The study shows that complexes are formed in a molar metal-ligand ratio of 1 : 2. The authors confirm bidentate coordination of copper by amino acids and N,O-chelation due to donor-acceptor bonds of the carboxyl and amino groups. The absorption bands characteristic of Cu-N, Cu-O bonds, and the displacement of the maxima of functional groups of amino acids are recorded in the IR spectra. The instability constants of threoninate and copper serinate are calculated.

Keywords: threonine, serine, copper, complex compound, infrared spectroscopy, potentiometry, spectrophotometry.

Введение

Интерес к координационным соединениям металлов связан с их высокой биологической активностью, в то время как неорганические металлосодержащие вещества токсичны для живых организмов [5], [6], [7]. В биохимии и фармакологии в целях снижения негативного действия и повышения биодоступности используется перевод ионов металлов в комплексные соединения. В координационной химии нативные аминокислоты являются актуальными лигандами, благодаря наличию карбоксильной и аминогрупп, дополнительных функциональных, электронодонорных заместителей в радикале, способных к комплексообразованию, хелатированию с металлами [2], [5], [8].

На простых моделях взаимодействия металл – аминокислота можно изучать белковые, ферментные, рецепторные, регуляторные механизмы в клетках, понимание которых далеко не ясно в настоящее время [4], [7], [8]. Не создана и единая теория взаимодействия минерального и органического компонентов биомолекул, что может быть достигнуто только путем систематических исследований и накопления экспериментальных данных. Полученные результаты помогут в понимании фундаментальных биохимических закономерностей, послужат теоретической базой при направленном синтезе новых фармакологических препаратов для таргетной терапии.

Целью данной работы было получение и исследование комплексных соединений меди с гидроксиминокислотами.

Материалы и методы

В качестве исходных использовались реактивы марки «х.ч.»: L-аминокислоты (серин, треонин), производитель ООО «Панэко» (Россия) и оксид меди (II). Комплексы получали в водном растворе при температуре 70-80 °С путем смешивания взятых с точностью до 0,0001 г навесок прекурсоров лиганд : металл (L : M) в мольных соотношениях 2 : 1 в слабощелочной среде [5], [6]. Перемешивали содержимое 30 минут на магнитной мешалке и оставляли при комнатной температуре до кристаллизации. Выпавшие в виде синего осадка продукты реакции фильтровали, промывали дистиллированной водой, спиртом, высушивали при н.у.

Исследование строения хелатов, таблетированных с KBr, проведено методом инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре FTIR-8400S «Shimadzu» (в области 400-4000 см⁻¹). Интерпретацию спектров проводили по литературным данным [1], [3], [6], [9].

Процессы комплексообразования были изучены методом pH-потенциометрического титрования (pH-метр Mettler Toledo FEP20 - FiveEasy Plus), основанного на регистрации изменения равновесного потенциала электрода в процессе

химической реакции между потенциалопределяющим ионом в растворе и специально введенным реактивом (0,1 М NaOH) в качестве титранта [1], [10].

Количественный состав комплексов аминокислот с ионами меди (II) был исследован классическим методом изомольных смесей (метод разбавления Остромысленского-Жоба) на спектрофотометре СФ-2000 в кварцевых кюветках $l=1$ см при $\lambda=740$ нм. Определение содержания меди (II) в полученных соединениях проводили с помощью комплексонометрического титрования. Содержание аминокислот определяли формальным титрованием по методу Серенсена [1].

Результаты и их обсуждение

Практический выход синтеза составил 83,3% треонината меди и 85,6% серината меди, что несколько ниже, чем в данных литературы, где эти значения для других протеиногенных аминокислот составляют до 97 % [5].

Исследование комплексообразования Cu (II) с аминокислотами методом потенциометрического титрования показало, в водных растворах возможно образование соединений состава 1 : 2. На рисунке 1 приведены кривые титрования серина и системы «серин-медь» в координатах $pH = f(a)$, где a – степень оттитрованности раствора. Диаграмма треонина и треонината меди была сходной. В работе [10], где применялся этот же метод для исследования соединений цинка, зафиксированы аналогичные кривые, характеризующие образование комплексов с глицином, валином, аланином, серином, аспарагиновой кислотой мольного состава 1:1 и 1:2.

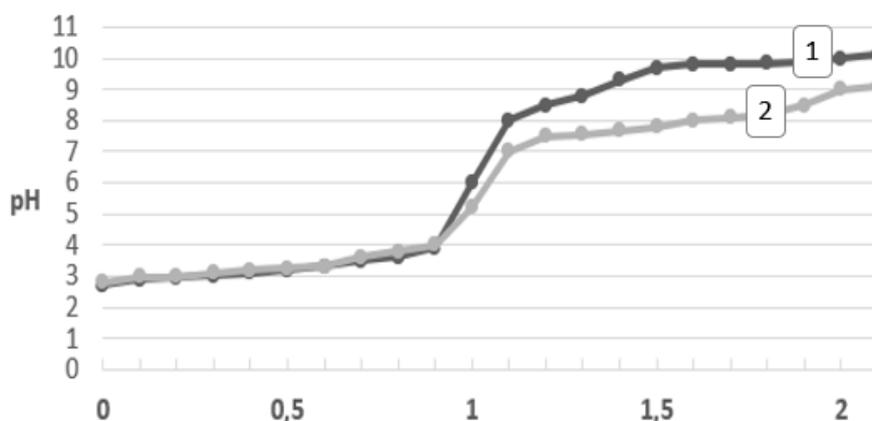


Рис. 1 – Интегральная pH-кривая потенциометрического титрования серина и его смеси с ионами меди:
1 – серин; 2 – серин : $Cu^{2+} = 2 : 1$

Рассчитанные по классическим формулам константы нестойкости (K) солей составили: $K=1,85 \times 10^{-4}$ для $Cu(Tre)_2$ и $K=1,83 \times 10^{-5}$ у $Cu(Ser)_2$. Их значения свидетельствуют о достаточной устойчивости соединений, что может быть связано с проявлением хелатного эффекта [2], [4], [10].

Результаты спектрофотометрического определения состава синтезированных соединений представлены в виде дифференциальной изомольной кривой зависимости « $\Delta A/\Delta V$ – состав комплекса» (рисунок 2).

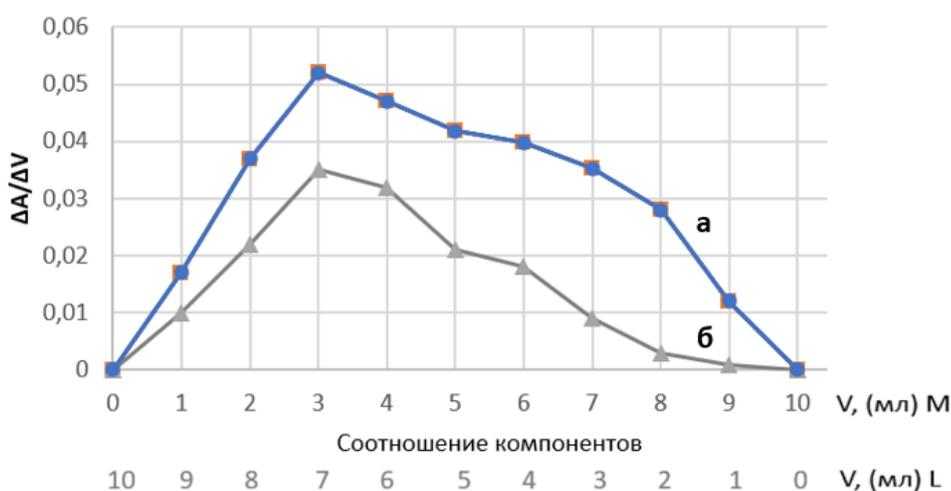


Рис. 2 – Зависимость оптической плотности (A) от соотношения компонентов водных растворов Cu^{2+} (M) с аминокислотами (L):
а) серин; б) треонин

На рисунке 2 видно, что максимум кривой лежит в области мольных отношений 3 : 7, что соответствует составу комплекса «металл : аминокислота» примерно 1 : 2,3. Наличие на графике одного резко выраженного максимума свидетельствует об образовании в системе устойчивого комплекса.

Результаты титриметрического определения содержания меди и аминокислот позволили рассчитать молярные соотношения серина и треонина относительно концентрации металла в образовавшихся комплексах. Так, пропорция

Cu^{2+} (М) : аминокислота (L) для серината меди составила $0,1752 : 0,3640 = 1 : 2,1$; для треонината меди соответственно: $0,1811 : 0,3919 = 1 : 2,2$. Это подтверждает состав продуктов синтеза $\text{Cu}(\text{Ser})_2$ и $\text{Cu}(\text{Tre})_2$. В работе [3] подобное взаимодействие показано на примере хлорида индия с аминокислотами аланином и фенилаланином.

Способ координации определяли по данным ИК-спектрального анализа синтезированных соединений. ИК-спектры серината и треонината меди достаточно характерны для интерпретации их как спектров координационных соединений меди (II) с аминокислотами (таблица 1). В ИК-спектре аминокислот наблюдаются характерные полосы поглощения карбоксильной и аминогрупп [2], [3], [7], [9]. В полученных комплексах зафиксированы изменения интенсивности и смещение максимумов характеристических полос функциональных групп.

При сопоставлении спектров исходных аминокислот и их комплексов с медью (II) значимыми отличиями являются появление интенсивных полос в области $3000 - 3200 \text{ см}^{-1}$ (колебания протонированной аминогруппы), что можно объяснить возникновением новой связи Cu-N по донорно-акцепторному механизму. В спектрах солей виден сдвиг полос, соответствующих валентным колебаниям карбоксилат-иона относительно спектров серина и треонина [2], [6], [9], что позволяет интерпретировать факты образованием связи Cu-O. N,O-координацию подтверждает появление полос в диапазоне $538-572, 605-616 \text{ см}^{-1} \nu(\text{Me-N}), 434-455 \text{ см}^{-1} \nu(\text{Me-O})$ [2], [3], [7], [9].

Таблица 1 – Волновые числа максимумов характеристических полос поглощения (см^{-1}) в ИК-спектрах исходных аминокислот (серина и треонина) и их комплексах с Cu^{2+}

Соединение	$\nu(\text{COO}^-)$			$\nu(\text{NH}_3^+)$			Me-N	Me-O
	as	s	δ	as	s	δ		
Серин	1594	1407	612	3070	3170	2040 1622 1480		
Треонин	1628	1418	635	3052	3206	1595		
Серинат меди	1615	1391		3291	3022	1579 1624	572 605 1116	434
Треонинат меди	1621	1385		3200	3101	1565	538 616 1080	455

Кроме того, в спектрах присутствовали характерные полосы поглощения углеводородных групп, которые заметно не меняли своей интенсивности при хелатировании: C-H валентные колебания (as, s) $2982, 2979, 2911, 2843 \text{ см}^{-1}$, деформационные при $1444, 1382, 1355 \text{ см}^{-1}$; C-C валентные при $933, 830 \text{ см}^{-1}$ [2], [3], [7], [9].

На основе анализа данных спектров комплексов Cu (II), учитывая литературные данные, можно предположить, что L-аминокислоты в $\text{Cu}(\text{Ser})_2, \text{Cu}(\text{Tre})_2$, являются бидентатными лигандами, которые взаимодействуют с Cu^{2+} за счет COOH- и NH_2 -групп [2], [5], [7], [9].

Заключение

Были синтезированы два координационных соединения протеиногенных аминокислот L-серина и L-треонина с ионами меди (II) в растворе. Состав полученных солей изучен химическими и инструментальными методами (потенциометрия, спектрофотометрия, ИК-спектроскопия, титриметрия). Проведенный анализ позволяет предположить образование комплексов состава 1 : 2 (металл : аминокислота) и рассчитать их константы нестойкости: $K=1,85 \times 10^{-4}$ для $\text{Cu}(\text{Tre})_2$ и $K=1,83 \times 10^{-5}$ у $\text{Cu}(\text{Ser})_2$. Координация иона металла происходит бидентатно, за счет карбоксильной и аминогруппы лигандов. Исследование взаимодействия гидроксиминокислот и Cu^{2+} представляет научный и практический интерес, так как позволяет расширить представления о лигандных взаимодействиях биомолекул, механизмах их биологической активности.

Финансирование

Работа выполнена в рамках гранта ЗабГУ №327.

Funding

The work was carried out within the framework of a grant from the Trans-Baikal State University №327.

Конфликт интересов

Не указан

Conflict of Interest

None declared

Список литературы / References

1. Бек М. Исследование комплексообразования новейшими методами. Пер. с англ. / М. Бек, И. Надьпал. Москва: Мир, 1989. 413 с.
2. Берестова Т.В. ИК-характеристики стереоизомеров транс-, бис- и разнолигандных комплексов Cu (II) с D,L-треонином / Т.В. Берестова и др. // Вестник ТвГУ. Серия Химия. – 2015. - № 2. – С. 118-124.
3. Вергейчик Е.Н. Получение и изучение соединений индия хлорида с α -аланином и фенилаланином / Е.Н. Вергейчик, М.А. Мокрушина // Курский научно-практический вестник "Человек и его здоровье". – 2007. - № 4. – С. 92-96.
4. Голованова О.А. Кинетика и термодинамика образования соединений ионов кальция с аминокислотами, их строение и устойчивость / О.А. Голованова, И.А. Томашевский // Журнал физической химии. – 2019. – Т. 93, №1. – С. 11-22.

5. Кадырова Р.Г. Синтез и свойства комплексных солей биогенных кислот макро- и микроэлементов. Монография / Р.Г. Кадырова, Г.Ф. Кабилов, Р.Р. Муллахметов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 115 с.
6. Крылова Л.Ф. Стереизомерные комплексы Pd (II) с серином, треонином и аллотреонином / Л.Ф. Крылова // Журнал неорганической химии. 2011. - Т. 56, № 1. - С. 56-64.
7. Новикова Г.В. Синтез и физико-химические характеристики комплексов $6s^2$ и nd^m -ионов металлов с аминокислотами: автореф. дисс... канд. хим. наук : 02.00.01 / Новикова Галина Владимировна. - Красноярск: СибГТУ, 2006. – 22 с.
8. Огородникова Н.П. Химическое взаимодействие металлов – меди, железа и марганца с α - и β -аминокислотами в водных и органических средах: автореф. дисс... канд. хим. наук : 02.00.04 / Огородникова Надежда Петровна. - Ростов-на-Дону: ЮжФУ – 2010. – 24 с.
9. Тачаев М.В. Комплексные соединения никеля (II), палладия (II) с аминокислотами, аденином и цитозином: автореф. дисс... канд. хим. наук : 02.00.01 / Тачаев Максим Владимирович. - Москва: РУДН, 2008. – 22с.
10. Чернова С.П. Потенциометрическое изучение поведения ионов Zn (II) в водных растворах аминокислот и комплексонов / С.П. Чернова, Л.В. Трубачева // Аналитика и контроль. – 2006. – Т.10, № 3-4. – С. 336 – 341.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bek M. Issledovanie kompleksobrazovaniya novejsimi metodami [Investigation of complexation by the latest methods]. Per. s angl. / M. Bek, I. Nad'pal. Moskva: Mir, 1989. 413 p. [in Russian]
2. Berestova T.V. IK-harakteristiki stereoisomerov trans-, bis- i raznoligandnykh kompleksov Su (II) s D,L-treoninom [IR characteristics of stereoisomers of trans-, bis-, and mixed-ligand complexes of Cu (II) with D, L-threonine] / T.V. Berestova et al. // Vestnik TvGU. Serija Himija. – 2015. - № 2. – P. 118-124. [in Russian]
3. Vergejchik E.N. Poluchenie i izuchenie soedinenij indija hlorida s α -alaninom i fenilalaninom [Preparation and study of compounds of indium chloride with α -alanine and phenylalanine] / E.N. Vergejchik, M.A. Mokrushina // Kurskij nauchno-prakticheskij vestnik "Chelovek i ego zdorov'e". – 2007. - № 4. – P. 92-96. [in Russian]
4. Golovanova O.A. Kinetika i termodinamika obrazovaniya soedinenij ionov kal'cija s aminokislotami, ih stroenie i ustojchivost' [Kinetics and thermodynamics of the formation of compounds of calcium ions with amino acids, their structure and stability] / O.A. Golovanova, I.A. Tomashevskij // Zhurnal fizicheskoy himii. – 2019. – Vol. 93, №1. – P. 11-22. [in Russian]
5. Kadyrova R.G. Sintez i svoystva kompleksnykh soley biogennykh kislot makro- i mikroelementov [Synthesis and properties of complex salts of biogenic acids of macro- and microelements]: Monografija / R.G. Kadyrova, G.F. Kabirov, R.R. Mullahmetov. – Kazan': Kazan. gos. jenerg. un-t, 2016. – 115 p. [in Russian]
6. Krylova L.F. Stereoizomernye komplekсы Pd (II) s serinom, treoninom i allotreoninom [Stereoisomeric complexes of Pd (II) with serine, threonine, and allotreonine] / L.F. Krylova // Zhurnal neorganicheskoy himii. - 2011. - vol. 56, № 1. - P. 56-64. [in Russian]
7. Novikova G.V. Sintez i fiziko-himicheskie karakteristiki kompleksov $6s^2$ i nd^m -ionov metallov s aminokislotami [Synthesis and physicochemical characteristics of complexes of $6s^2$ and nd^m metal ions with amino acids]: avtoref. dis... of PhD in Chemistry : 02.00.01 / Novikova Galina Vladimirovna. - Krasnojarsk: SibGTU, 2006. – 22 p. [in Russian]
8. Ogorodnikova N.P. Himicheskoe vzaimodejstvie metallov – medi, zheleza i marganca s α - i β -aminokislotami v vodnykh i organicheskikh sredah [Chemical interaction of metals - copper, iron and manganese with α - and β -amino acids in aqueous and organic media]: avtoref. dis... of PhD in Chemistry : 02.00.04 / Ogorodnikova Nadezhda Petrovna. - Rostov-na-Donu: JuzhFU – 2010. – 24 p. [in Russian]
9. Tachaev M.V. Kompleksnye soedineniya nikelja (II), palladija (II) s aminokislotami, adeninom i citozinom [Complex compounds of nickel (II), palladium (II) with amino acids, adenine and cytosine]: avtoref. dis... of PhD in Chemistry : 02.00.01 / Tachaev Maksim Vladimirovich. - Moskva: RUDN, 2008. – 22 p. [in Russian]
10. Chernova S.P. Potenciometricheskoe izuchenie povedeniya ionov Zn (II) v vodnykh rastvorah aminokislot i kompleksoinov [Potentiometric study of the behavior of Zn (II) ions in aqueous solutions of amino acids and complexones] / S.P. Chernova, L.V. Trubacheva // Analitika i kontrol'. – 2006. – Vol.10, № 3-4. – P. 336 – 341. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.031>

СИНТЕЗ N – ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЛИГАНДОВ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ЛИГАНДЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Научная статья

Пасюков Д.В.¹, Новикова Д.А.^{2,*}, Андреева А.Н.³, Шумская И.Ю.⁴

¹ ORCID: 0000-0002-1851-9017;

² ORCID: 0000-0002-4316-4932;

^{1, 2, 3, 4} Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия

* Корреспондирующий автор (diananovikova3773[at]gmail.com)

Аннотация

В работе проведен анализ применения органометаллических катализаторов, в частности, комплексов с N-гетероциклическими карбенами. Рассматриваемые субстраты могут быть использованы как стабилизирующие лиганды для синтеза устойчивых комплексов. В свою очередь, комплексы могут применяться в качестве эффективных катализаторов нового поколения образования связей углерод-углерод, углерод-гетероатом. В большинстве случаев, активность катализаторов прямо зависит от структуры N-гетероциклических карбенов в плане стерических и электронных свойств, что представляет наибольший интерес в качестве объектов для исследования. Представленные в работе методы позволяют получить как симметричные, так и несимметричные бензимидазольные, имидазольные и триазольные карбены.

Ключевые слова: N-гетероциклические карбены, алкилирование, пролиганды.

SYNTHESIS OF N - HETEROCYCLIC PROLIGANDS AS PROMISING NEW GENERATION OF STABILIZING LIGANDS

Research article

Pasyukov D.V.¹, Novikova D.A.^{2,*}, Andreeva A.N.³, Shumskaya I.Yu.⁴

¹ ORCID: 0000-0002-1851-9017;

² ORCID: 0000-0002-4316-4932;

^{1, 2, 3, 4} Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

* Corresponding author (diananovikova3773[at]gmail.com)

Abstract

The paper analyzes the use of organometallic catalysts, namely the complexes with N-heterocyclic carbenes. The substrates under study can be used as stabilizing ligands for the synthesis of stable complexes. In turn, the complexes can be used as effective catalysts of a new generation of carbon-carbon, carbon-heteroatom bond formation. In most cases, the activity of catalysts directly depends on the structure of N-heterocyclic carbenes in terms of steric and electronic properties, which is of the greatest interest as objects for research. The methods presented in this study allow for obtaining both symmetric and asymmetric benzimidazole, imidazole, and triazole carbenes.

Keywords: N-heterocyclic carbenes, alkylation, proligands.

Введение

Соединения палладия широко используются в разных сферах жизни человека: в производстве автомобильных «катализаторов», электронике, ювелирных изделиях и стоматологии. Тем не менее, важнейшим практическим применением палладия можно с уверенностью считать использование его соединений в качестве катализатора органических реакций [1]. В промышленности, палладий получил широкое распространение как гетерогенный катализатор, для многих органических реакций необходимо использовать гомогенный металлокомплексный катализатор, отличающийся высокой активностью и селективностью [2]. Это позволяет проводить экологические чистые процессы, и в ряде случаев имеют значительные преимущества перед гетерогенными аналогами. Металлоорганические комплексы успешно используются для синтеза полимеров, пластических масс, каучуков, лекарственных препаратов и получения сверхчистых металлов и полупроводников.

В настоящее время процесс синтеза органических веществ на основе гомогенных металл-катализируемых реакций кросс-сочетания, т.е. образования связей углерод-углерод или углерод-гетероатом (C-X, где X = S, O, N) находится в стадии интенсивного развития [3] и все более активно внедряется в промышленное производство фармацевтических препаратов [4]. Например, палладий-катализируемые реакции образования связей C-S и C-N активно используются в промышленном производстве лекарств (Рис. 1).

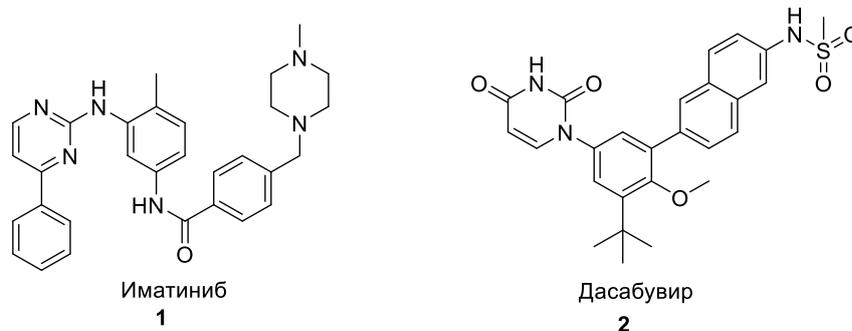


Рис. 1 – Лекарственные препараты, полученные с помощью палладий-катализируемых реакций

Применение комплексов металлов на основе палладия позволит получать сложные органические соединения минуя множество стадий, что позволяет существенно сократить затраты. За последние пять лет опубликовано более 100 000 статей, посвященных использованию органических комплексов металла в реакциях образования связей углерод-углерод и углерод-гетероатом.

Среди органометаллических катализаторов особое место занимают комплексы палладия в частности с N-гетероциклическими карбенами (NHC), которые характеризуются высокой прочностью связи металл-NHC и широкими возможностями для варьирования электронных и пространственных характеристик путем изменения структуры NHC лигандов [5], поэтому комплексы палладия с N-гетероциклическими лигандами (Pd/NHC) получили широкое распространение как катализаторы для уникальных органических реакций образования связей углерод-углерод углерод-гетероатом [5], [6].

Наиболее распространённым методом получения комплексов является реакция прекурсора палладия (PdCl₂, Pd(OAc)₂ и т.п.) с N-гетероциклическими пролигандами представляющие собой соли соответствующих лигандов имеющие общую структурную формулу [NHCH]⁺X⁻. Наиболее распространённые пролиганды для синтеза Pd/NHC комплексов представленные на Рис. 2.

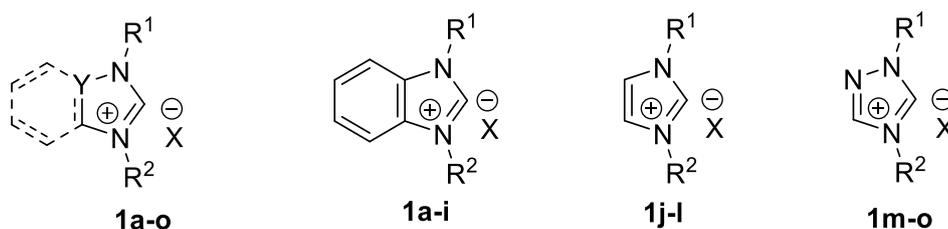


Рис. 2 – Общие структурные формулы N-гетероциклические пролигандов

Анализ представленных в данной статье показывает, что работа по детальному изучению методов синтеза NHC лигандов не потеряла своей актуальности.

Основная часть

В качестве начального этапа были проведены синтезы уже известных симметричных NHC лигандов – солей 1,3-диалкилбензимидазолия, 1,3-диарилимидазолия и 1,4-диалкилтриазиолия **1a-o** (табл. 1).

Таблица 1 – Полученные пролиганды

№	Полученные пролиганды								
	1a	1b	1c	1d	1e	1f	1g	1h	
1a-i	R ¹	Me	Et	Pr	i-Pr	Me	Me	Bu	Bn
	R ²	Me	Et	Pr	i-Pr	i-Pr	Bu	Bu	Bn
	X	I	Br	I	Br	I	I	Br	Cl
1j-l	№	1i	1j	1k	1l	1m	1n	1o	
	R ¹	Bn	Me	DiPP	Mes	Me	Bu	Bn	
	R ²	Bn	Me	DiPP	Mes	Me	Bu	Bn	
1m-o	X	Br	I	Cl	Cl	I	Br	Br	

Большинство азолиевых солей достаточно хорошо растворяются в воде, как и многие неорганические соли, эти обстоятельства позволяют провести реакцию обмена галогенов: Cl на Br, Br на I или другие анионы, например, BF₄ или PF₆. Данную процедуру совершают не только для получения нового противоиона в молекуле соли, но и для лучшей картины рентгеноструктурного анализа (Рис. 3).

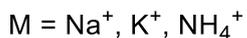
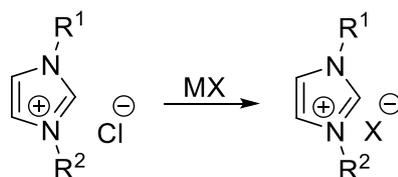


Рис. 3 – Реакция ионного обмена противоиона

Азолевые соли можно получать несколькими путями, в статье использовали самые распространенные: метод двукратного прямого алкилирования (**метод А**) для получения солей диалкилбензимидазола, -имидазола и -триазола и метод циклизации диимина (**метод Б**) для конструирования диарилимидазольных пролигандов.

Бензимидазольные соли получали по методу А (Рис. 4). Для этого нагревали бензимидазол и алкилирующий агент с избытком поташа в соответствующем растворителе, что приводило к моноалкилбензимидазолам, которые далее обрабатывали избытком реагента в ацетонитриле.

Двухстадийный подход к синтезу позволил получить несимметричные соли **1e,f**. Получение этих соединений требует особого контроля качества продукта на первой стадии реакции, т.к. даже небольшая примесь непрореагировавшего бензимидазола приводит к образованию неразделимой смеси солей.

По методу Б были синтезированы коммерчески-доступные соли 1,3-диарилимидазолия **1k,l** (Рис. 4). Этот путь включает две стадии: на первой проводили конденсацию ариламина с глиоксалем с образованием 1,4-диарил-1,4-диазабутадиена, который затем циклизовали с формальдегидом (в виде параформа) в присутствии триметилсилилхлорида или минеральной кислоты.

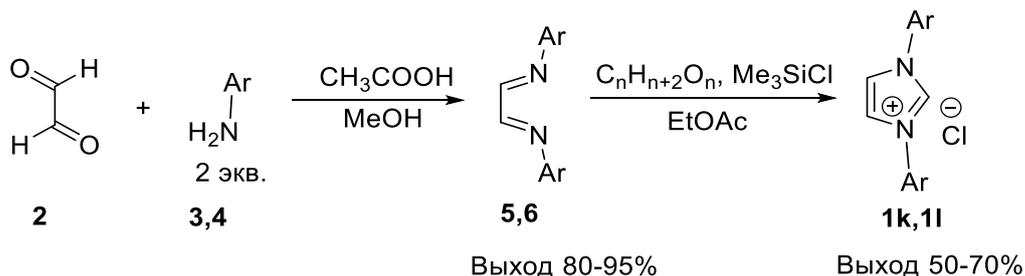


Рис. 4 – Получение имидазольных лигандов метод Б

Триазольные азолиевые соли получали по аналогии с бензимидазольными (Рис. 5) путем двукратного алкилирования.

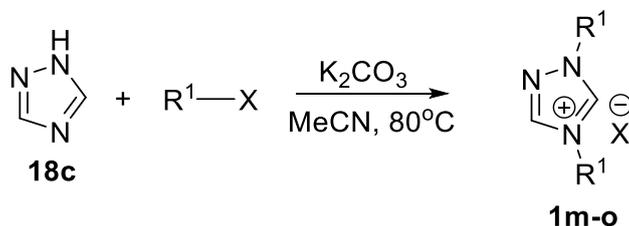


Рис. 5 – Получение триазольных лигандов метод А

Нужно отметить, что монозамещенные имидазолы и триазолы являются жидкостями или твердыми веществами с низкой температурой плавления, порядка 40°C и достаточно гигроскопичными соединениями в отличие от бензимидазольных, поэтому получение чистых лигандов этих типов затруднено.

При получении монозамещенных продуктов прямого алкилирования, чистоту продукта контролировали с помощью тонкослойной хроматографии (ТСХ) и газовой хромато-масс спектрометрией (ГХ-МС). Качество четвертичных азолиевых солей подтверждали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), а также методами ядерной магнитной спектроскопии (ЯМР)

Строение полученных соединений, включая не описанные в литературе и получены впервые в лаборатории соли **1c,e,f,i**, подтверждено всеми необходимыми физико-химическими исследованиями – методами ЯМР ¹H, ¹³C и масс-спектрометрией высокого разрешения (HRMS).

Экспериментальная часть

Общая методика получения соединений **1** кроме **1e**, **1f**.

Бензимидазол, триазол или имидазол (1 ммоль) алкил- арилгалогенид (2.5 ммоль) K_2CO_3 (5 ммоль) в ацетонитриле (15 мл) при сильном перемешивании, оставляли на 16 часов при 80°C. По истечению времени суспензию отфильтровывали от неорганической части, а маточный раствор упаривали на ротормном испарителе.

1,3-Диметил-1H-бензимидазолия йодит (1a) выход 2.37 г (76%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [8]

1,3-Диэтил-1H-бензимидазолия бромид (1b) выход 2.54 г (94%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [9]

1,3-Дипропил-1H-бензимидазол йодит (1c) Выход 2.94 г (89%), бесцветные кристаллы, т.пл. 103–105 °C. 1H NMR (DMSO- d_6 , 500 MHz): δ 0.92 (т, $J = 7.4$ Гц, 6H, $2CH_3$), 1.91–1.98 (м, 4H, $2CH_2$), 4.49 (т, $J = 7.2$ Гц, 4H, $2CH_2$), 7.67–7.71 (м, 2H, Ar), 8.11–8.15 (м, 2H, Ar), 9.89 (с, 1H, H-2). $^{13}C\{^1H\}$ NMR (DMSO- d_6 , 125 MHz): δ 10.7, 22.0, 48.1, 113.7, 126.5, 131.1, 142.0

1,3-Диизопропил-1H-бензимидазол бромид (1d) выход 2.75 г (92%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [7]

1,3-Дибутил-1H-бензимидазолия бромид (1g) выход 2.12 г (85%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [10]

1,3-Дибензил-1H-бензимидазолия хлорид (1h) выход 2.69 г (89%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [11]

1,3-Дибензил-1H-бензимидазолия бромид (1i) Выход 3.49 г (92%) бесцветные кристаллы, т.пл. 221–223 °C. 1H NMR (DMSO- d_6 , 500 MHz): 5.86 (с, 4H, $2CH_2$), 7.35–7.43 (м, 6H, Ar), 7.57–7.62 (м, 6H, Ar), 7.99–8.01 (м, 2H, Ar), 10.55 (с, 1H, H-2). $^{13}C\{^1H\}$ NMR (DMSO- d_6 , 125 MHz): δ 49.9, 114.0, 126.7, 128.3, 128.6, 128.9, 131.0, 134.0, 142.9.

1,3-Диметил-1H-имидазолия йодит (1j) выход 2.69 г (89%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [10]

1,3-Бис-(2,6-диизопропилфенил)-1,3-имидазолия хлорид (1k) выход 1.32 г (67%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [12]98

1,3-Бис(2,4,6-триметилфенил)-1,3-имидазол хлорид (1l) выход 1.37 г (72%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [12]

1,3-Диметил-1H-триазолия йодит (1m) выход 2.69 г (89%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [10]

1,3-Дибутил-1H-триазолия бромид (1n) выход 2.37 г (82%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [10]

1,3-Дибензил-1H-триазолия бромид (1o) выход 2.69 г (89%) бесцветные кристаллы Физические и спектральные характеристики соответствуют литературным данным [10]

Метод получения несимметричных азолевых солей **1e**, **1f**

Бензимидазол (1 ммоль) алкил- арилгалогенид (1 ммоль) K_2CO_3 (5 ммоль) в ацетонитриле (15 мл) при сильном перемешивании, контролировали время протекания реакции по методу **ГХ-МС** (время реакции от 24–72 часов). После детектирования окончания реакции, суспензию отфильтровывали, маточный раствор упаривали до образования масла (полупродукт алкилирования), после чего растворяли его в ацетоне (20 мл), добавляли необходимый арилгалогенид (1.5 ммоль), при сильном перемешивании оставляли на 5 часов, кипятится с обратным холодильником. После чего в ротормном испарителе упаривали растворитель, продукт кристаллизовали в диэтиловом эфире.

1-Метил-3-изопропил-1H-бензимидазолия йодит (1e) Выход 2.69 г (89%) бесцветные кристаллы, т.пл. 195–198 °C. 1H NMR (DMSO- d_6): δ 1.62–1.63 (м, 6H, $2CH_3$), 4.09 (с, 3H, CH_3), 5.04–5.12 (м, 1H, CH), 7.67–7.71 (м, 2H, Ar), 8.02–8.05 (м, 1H, Ar), 8.13–8.15 (м, 1H, Ar), 9.89 (с, 1H, H-2). $^{13}C\{^1H\}$ (DMSO- d_6): 21.6, 33.4, 50.3, 113.5, 113.7, 126.26, 126.34, 130.2, 131.9, 141.1.

1-Метил-3-бутил-1H-бензимидазолия бромид (1f) выход 2.11 г (96%) бесцветные кристаллы, т.пл. 37–39 °C. 1H NMR ($CDCl_3$, 500 MHz): δ 0.86–0.89 (м, 3H, CH_3), 1.29–1.37 (м, 2H, CH_2), 1.87–1.93 (м, 2H, CH_2), 4.18 (с, 3H, CH_3), 4.46–4.49 (м, 2H, CH_2), 9.27 (с, 1H, H-3), 11.28 (с, 1H, H-5). $^{13}C\{^1H\}$ NMR ($CDCl_3$, 125 MHz): δ 13.3, 19.3, 31.9, 39.5, 48.5, 143.0, 144.3.

Заключение

Анализ в представленной работе показывает, что необходимо более детально изучить методики синтеза ННС пролигандов, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве эффективных лигандов для создания улучшенных катализаторов. Структура N-гетероциклических карбенов наиболее вариативная как в плане стерических, так и электронных свойств, что представляет наибольший интерес в качестве объектов для исследования. Полученные в данной работе соединения были показаны наиболее оптимальные условия получения N-гетероциклических пролигандов.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Taccardi N. Gallium-rich Pd–Ga phases as supported liquid metal catalysts / N. Taccardi, M. Grabau, J. Debuschewitz et al. // Nature Chemistry. 2017. DOI: 10.1038/nchem.2822.

2. Афанасьев В.В. Перспективы использования палладий-катализируемых реакций в тонком органическом синтезе: создание связи углерод-углерод / В.В. Афанасьев, Н.Б. Беспалова, И.П. Белецкая // Рос. Хим. Ж. (Ж. Рос. Хим. Об-ва им. Менделеева), 2006, 81-93
3. O'Brien C. J. Easily Prepared Air- and Moisture-Stable Pd–NHC (NHC=N-Heterocyclic Carbene) Complexes: A Reliable, User-Friendly, Highly Active Palladium Precatalyst for the Suzuki–Miyaura Reaction / C. J. O'Brien, E. A. Kantchev, C. Valente et al. // Chemistry – A European Journal- 2006- 12: 4743-4748. DOI: 10.1002/chem.200600251
4. Dunbar K. L. Enzymatic Carbon–Sulfur Bond Formation in Natural Product Biosynthesis / K. L. Dunbar, D. H. Scharf; A. Litomska et al. // Chemical Reviews 2017, 117, p. 5521. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00697
5. Hopkinson M. N. An overview of N-heterocyclic carbenes / M. N. Hopkinson, C. Richter, M. Schedler et al. // Nature 2014, 510, p. 485.
6. Ziqin S. Synthesis method of aripiprazole / S. Ziqin, X. Fubiao, J. Ersheng ; Patent CN105085394 (A)- Nov 25- 2015
7. Hohloch S. Structural Characterization, Solution Dynamics, and Reactivity of Palladium Complexes with Benzimidazolin- 2-ylidene N-Heterocyclic Carbene Ligands / S. Hohloch, N. Deibel, D. Schweinfurth et al. // Eur. J. Inorg. Chem., 2014: 2131-2139. DOI: 10.1002/ejic.201301339
8. Er J. A. Synthesis and Study of 5,5'-Bibenzimidazolyliidenes and Their Bimetallic Complexes / J. A. Er, A. G. Tennyson, J. W. Kamplain et al. // Eur. J. Inorg. Chem., 2009: 1729-1738. DOI: 10.1002/ejic.200801188
9. Khazipov O. V. Fast and Slow Release of Catalytically Active Species in Metal/NHC Systems Induced by Aliphatic Amines / O. V. Khazipov, M. A. Shevchenko, A. Yu. Chernenko et al. // Organometallics 2018 37 (9), 1483-1492 DOI: 10.1021/acs.organomet.8b00124.
10. Chernyshev V. M. Revealing the unusual role of bases in activation/deactivation of catalytic systems: O-NHC coupling in M/NHC catalysis / V. M. Chernyshev, O. V. Khazipov, M.A. Shevchenko et al. // Chem. Sci., 2018, DOI: 10.1039/C8SC01353E
11. Astakhov A. V. Facile Hydrolysis of Nickel(II) Complexes with N-Heterocyclic Carbene Ligands / A. V. Astakhov, O. V. Khazipov, E. S. Degtyareva et al. // Organometallics 2015, 34, 5759–5766
12. Starikova O. V. Russ.Synthesis of 1,3-Dialkylimidazolium and 1,3-Dialkylbenzimidazolium Salts / O. V. Starikova, G. V. Dolgushin, L. I. Larina et al. // J. Org. Chem. 2003, 39, 1467–1470.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Taccardi N. Gallium-rich Pd–Ga phases as supported liquid metal catalysts / N. Taccardi, M. Grabau, J. Debuschewitz et al. // Nature Chemistry. 2017. DOI: 10.1038/nchem.2822.
2. Afanasyev V.V. Perspektivy ispol'zovaniya palladij-kataliziruemyh reakcij v tonkom organicheskom sinteze: sozdanie svjazi uglerod-uglerod [Prospects for the use of palladium-catalyzed reactions in fine organic synthesis: the creation of a carbon-carbon bond] / V.V. Afanasief, N.B. Bespalova, I.P. Beletskaya // Russian Chemical. Zh. (Zh. Russian Chemical. Ob-va im. Mendeleev), 2006, 81-93 [in Russian]
3. O'Brien C. J. Easily Prepared Air- and Moisture-Stable Pd–NHC (NHC=N-Heterocyclic Carbene) Complexes: A Reliable, User-Friendly, Highly Active Palladium Precatalyst for the Suzuki–Miyaura Reaction / C. J. O'Brien, E. A. Kantchev, C. Valente et al. // Chemistry – A European Journal- 2006- 12: 4743-4748. DOI: 10.1002/chem.200600251
4. Dunbar K. L. Enzymatic Carbon–Sulfur Bond Formation in Natural Product Biosynthesis / K. L. Dunbar, D. H. Scharf; A. Litomska et al. // Chemical Reviews 2017, 117, p. 5521. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00697
5. Hopkinson M. N. An overview of N-heterocyclic carbenes / M. N. Hopkinson, C. Richter, M. Schedler et al. // Nature 2014, 510, p. 485.
6. Ziqin S. Synthesis method of aripiprazole / S. Ziqin, X. Fubiao, J. Ersheng ; Patent CN105085394 (A)- Nov 25- 2015
7. Hohloch S. Structural Characterization, Solution Dynamics, and Reactivity of Palladium Complexes with Benzimidazolin- 2-ylidene N-Heterocyclic Carbene Ligands / S. Hohloch, N. Deibel, D. Schweinfurth et al. // Eur. J. Inorg. Chem., 2014: 2131-2139. DOI: 10.1002/ejic.201301339
8. Er J. A. Synthesis and Study of 5,5'-Bibenzimidazolyliidenes and Their Bimetallic Complexes / J. A. Er, A. G. Tennyson, J. W. Kamplain et al. // Eur. J. Inorg. Chem., 2009: 1729-1738. DOI: 10.1002/ejic.200801188
9. Khazipov O. V. Fast and Slow Release of Catalytically Active Species in Metal/NHC Systems Induced by Aliphatic Amines / O. V. Khazipov, M. A. Shevchenko, A. Yu. Chernenko et al. // Organometallics 2018 37 (9), 1483-1492 DOI: 10.1021/acs.organomet.8b00124.
10. Chernyshev V. M. Revealing the unusual role of bases in activation/deactivation of catalytic systems: O-NHC coupling in M/NHC catalysis / V. M. Chernyshev, O. V. Khazipov, M.A. Shevchenko et al. // Chem. Sci., 2018, DOI: 10.1039/C8SC01353E
11. Astakhov A. V. Facile Hydrolysis of Nickel(II) Complexes with N-Heterocyclic Carbene Ligands / A. V. Astakhov, O. V. Khazipov, E. S. Degtyareva et al. // Organometallics 2015, 34, 5759–5766
12. Starikova O. V. Russ.Synthesis of 1,3-Dialkylimidazolium and 1,3-Dialkylbenzimidazolium Salts / O. V. Starikova, G. V. Dolgushin, L. I. Larina et al. // J. Org. Chem. 2003, 39, 1467–1470.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.032>**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ Г. КОКШЕТАУ АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ**

Научная статья

Токтабаева З.К.^{1,*}, Сергазина С.М.², Нурмуханбетова Н.Н.³, Фахруденова И.Б.⁴
^{1, 2, 3, 4} Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова, Кокшетау, Республика Казахстан

* Корреспондирующий автор (zarina_0599[at]mail.ru)

Аннотация

Минеральные воды являются природными подземными водами формирующиеся в толще земной коры с определенными геолого - структурными, геотермическими, гидрогеологическими и геохимическими условиями, которые определяют закономерности их пространственной локализации, газовый, ионно-солевой и микроэлементный состав, температуру и другие показатели. В ходе работы были рассмотрены вопросы изучения химического состава вод из водных источников расположенных на территории г. Кокшетау и используемых при производстве минеральных вод таких как, «Кулагер-Арасан», «Свежесть», «Туран». Определено содержание хлорид-ионов, сульфат-ионов, катионов магния, кальция, натрия, гидрокарбонатов. Проведен сравнительный анализ на содержание химических веществ и органолептических характеристик.

Ключевые слова: органолептика, обеззараживание, сульфаты, хлориды, химический анализ, концентрация, классификация воды.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF DRINKING WATER IN THE CITY OF KOKSHETAU, AKMOLA REGION

Research article

Toktabaeva Z.K.^{1,*}, Sergazina S.M.², Nurmukhanbetova N.N.³, Fakhrudanova I.B.⁴
^{1, 2, 3, 4} Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov, Kokshetau, Republic of Kazakhstan

* Corresponding author (zarina_0599[at]mail.ru)

Abstract

Mineral waters are natural groundwater formed in the thickness of the Earth's crust with certain geological, structural, geothermal, hydrogeological and geochemical conditions that determine the patterns of their spatial localization, gas, ion-salt and trace element composition, temperature and other indicators. In the course of the study, the authors examine the issues of studying the chemical composition of waters from water sources located on the territory of Kokshetau and used in the production of mineral waters such as "Kulager-Arasan", "Svezhest", "Turan". The study determines the content of chloride ions, sulfate ions, magnesium cations, calcium, sodium, and bicarbonates and conducts a comparative analysis of the content of chemicals and organoleptic characteristics.

Keywords: organoleptics, disinfection, sulfates, chlorides, chemical analysis, concentration, classification of water.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам изучения воды, т.к. объем потребляемой воды на душу населения увеличивается изо дня в день. Ежегодный расход воды на земном шаре по всем видам водоснабжения составляет 3300-3500 км³. Еще академик В.И. Вернадский говорил: «Вода без жизни в биосфере не известна». Но, к сожалению ее уже не хватает во многих частях мира. Как утверждают эксперты, примерно одна пятая человечества не имеет доступа к чистой питьевой воде, а одна четвертая обходится без воды для бытовых нужд. По данным Всемирной организации здравоохранения более 80% всех болезней в мире связано с неудовлетворительным качеством питьевой воды. То, что течет из водопроводного крана, питьевой водой может быть названо только в исключительно редких случаях [1].

По статистике человек, за всю свою жизнь потребляет и выделяет около 75-ти тонн воды. Всасывание в кровь питательных веществ и переваривание пищи осуществляется в жидкой среде. Желудочно-кишечный тракт вырабатывает 1500 мл слюны, 2550 мл желудочного сока, 700 мл сока поджелудочной железы, 3000 мл кишечного сока ежедневно. Благодаря воде из человеческого организма выводятся вредные продукты метаболизма. Вода выполняет и механическую работу в теле человека, помогая облегчить скольжение трущихся поверхностей – суставов, связок, мышц и т.д. Известным фактом остается то, что без пищи человек может прожить примерно 2 месяца, а без воды не проживет и пяти дней. Когда человек теряет 2% воды, у него появляется чувство жажды, при потере 6-8% наступает полубодрное состояние, при 10% - галлюцинации, нарушение процесса глотания. Потеря 10-20% воды опасно для жизни. Животные погибают при потере 20-25% воды. Доля воды образуется также и при распаде белков, жиров и углеводов. При окислении 101 грамма жира образуется 108 г воды, при окислении 100 граммов углеводов - 55 г воды [2].

Многие ученые занимаются исследованиями структуры молекулы воды в различных ее состояниях. А поскольку вода - это, прежде всего, то, что мы пьем, то изучение ее свойств является актуальным вопросом. Обычно вода в природе всегда содержит растворенные соли, газы и органические вещества. Их состав и количество не являются постоянными. При концентрации соли до 1,1 г/кг вода пресная, до 26 г/кг – солоноватая, если больше, то соленая. В океане соленость воды колеблется в пределах 34 г/кг. Соленость морской воды не зависит от этих стандартов. Самые соленые воды наблюдаются в соленых озерах (до 301 г/кг) и в глубоководных удаленных подземных водах (до 500 г/кг). Вода с концентрацией соли от 100 мг/кг до 1000 мг/кг считается пригодной для питья. Для кислотно-щелочного баланса при pH =6-8 оптимальным значением является концентрация 200 мг/кг. По химическому составу можно выделить три основных типа минеральных вод: гидрокарбонатные, хлоридные и сульфатные [3].

Целью нашей работы было исследование питьевых источников г. Кокшетау, используемых при производстве минеральных вод «Кулагер-Арасан», «Свежесть», «Туран», на определение содержания химических веществ и проведение сравнительного анализа.

В качестве объектов исследования были выбраны следующие воды:

- со скважины №5492-Э, которая используется при производстве минеральной воды «Кулагер-Арасан»;
- со скважины №1943 («Кенетколь») - при производстве воды «Туран»;
- артезианская скважина – при производстве воды «Свежесть».

Здесь необходимо отметить, что данные воды являются продукцией АО «Кокшетауминводы», которая функционирует на территории г. Кокшетау. Это предприятие основано 1991 году. Одним из главных направлений в работе предприятия является изучение и эксплуатация гидроминеральных ресурсов северных регионов Казахстана.

Методика проведения исследования

Для оценки химического состава воды были использованы стандартные методики с применением титриметрических, гравиметрических, фотоколориметрических и сравнительных методов анализа.

Для определения сухого остатка использовали гравиметрический и расчетный методы. Сухой остаток воды - это то, что остается после испарения воды. В принципе, это те минералы, которые находятся в воде.

Минералы, содержащиеся в воде, необходимы для биохимических реакций в нашем организме. Минералы вызывают активные реакции в нашем организме. Без минералов мы мертвы. Но вода без минералов также является мертвой водой. Рыба умирает в дистиллированной воде. Другими словами, в воде без минералов все живое умирает [4].

Слабоминерализованная вода неприятна на вкус, длительное её употребление может привести к нарушению водно-солевого обмена, например, уменьшение содержания хлоридов в тканях. Такая вода, как правило, содержит мало микроэлементов.

Во время гравиметрического определения сухого остатка основную часть пробы выпаривали объемом 250-500 мл. Затем оставшуюся часть образца высушивали во взвешенном состоянии, довели до чашки постоянной массы в сушильном шкафу при стандартных условиях в два этапа. На первом этапе сушку проводили при температуре 103-105°C в течение 1-2 часов. На втором этапе сушку проводили при температуре 178-182°C также в течение 1-2 часов. В этих условиях кристаллогидраты разлагаются, органические вещества и некоторые соли испаряются и разлагаются более полно.

Концентрация ионов жесткости воды в пробе воды выражается как концентрация карбоната кальция. Временная твердость - это та часть общей твердости, которая исчезает при кипячении. Хотя использование ионоселективных электродов не принято в качестве стандартного метода, оно позволяет быстро измерять жесткость воды и может быть использовано для определения изменений жесткости. Прямой потенциометрический метод не рекомендуется для ионоселективного электрода, но рекомендуется косвенный потенциометрический метод, включающий титрование этилендиаминтетрауксусной кислоты. Используемый ионоселективный электрод представляет собой жидкий ионообменный электрод, который реагирует на двухвалентные ионы магния и кальция [7].

Воду с общей жесткостью до 3,5 мг-экв/л называют мягкой, 3,5-7 - средней жесткости, 7-10 - жесткой, свыше 10-ти - очень жесткой.

Метод определения жесткости воды основан на образовании прочного комплексного соединения трилона Б с ионами кальция и магния [5].

Цветность минеральной воды определялась по платино-кобальтовой шкале. На цвет воды из подземных источников влияют соединения железа, гораздо реже - гуминовые органические вещества. Согласно требованиям СанПиН 2.1.4.559-96 для питьевой воды, цвет минеральной воды не должен быть выше 20.

Температура воды наземных источников обычно зависит от температуры окружающего воздуха, а также от его влажности, скорости направления, характера и течения движения воды и ряда других факторов. Температура воды из подземных источников всегда относительно постоянна и обычно составляет 80 °С. Оптимальной температурой воды для питья обычно считается 110 С.

Мутность воды является показателем того, насколько она прозрачна или мутна. Чем мутнее вода, тем выше ее мутность. Чтобы быть немного более научным, мутность измеряет "относительную прозрачность" жидкости - или количество света, преломленного от материалов в образце жидкости. Чем больше света преломляется в образце воды, тем выше уровень мутности. Существует ряд материалов, которые могут вызывать помутнение, включая ил, неорганические и органические вещества, глину, водоросли и некоторые микроскопические организмы. По требованию СанПиН 2.1.4.559-96, мутность минеральной воды должна быть не выше 1,5 мг/л [8].

Вкус минеральной воды определяется наличием в воде растворенных ароматизирующих веществ. Он может быть соленым или горьким, сладким или кислым. Все природные минеральные воды обычно имеют соленый и горький вкус. Хлорид натрия придает воде соленый вкус, а сульфат магния - горький. Кислый вкус обычно придается содержанием большого количества растворенного углекислого газа. Минеральная вода иногда может иметь чернильный и железистый вкус. Он определяется солями железа или марганца. Терпкий вкус воде придает сульфат кальция. По требованию СанПиН 2.1.4.559-96, привкус воды должен быть всегда не больше 2 баллов. Содержание ионов кальция и магния определяли комплексометрическим методом [6].

Соли кальция постоянно входят в состав подземных и поверхностных вод. Их содержание определяется геологическими условиями водоносных горизонтов. Содержание растворимых солей кальция в воде и изменение их концентрации зависят от природных условий, от равновесия углекислого газа и двуокиси углерода. В очень жестких водах, когда нарушается баланс углекислого газа и концентрация углекислого газа снижается, может выделяться карбонат кальция. При отборе проб таких вод необходимо брать отдельную пробу для определения кальция и нейтрализации его «щелочности» соляной кислотой. Комплексометрическое титрование позволяет определить не менее 1 мг/л кальция.

Для определения магния применяли двойное титрование раствором трилон Б. Первым титрованием находили содержание кальция, вторым - содержания магния. Весь израсходованный на титрование объем трилон Б соответствует жесткости воды. Этим методом определили магний в концентрациях от 1 до 60 мг/л.

Органолептические показатели определяли по ГОСТу 23268.1-91. Оценивали прозрачность, цвет, вкус, запах, насыщенность диоксидом углерода. По органолептическим показателям минеральная вода должна соответствовать требованиям, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Органолептические показатели воды

Показатель	Характеристика
Внешний вид	Прозрачная жидкость, без посторонних включений, с незначительным естественным осадком минеральных солей
Цвет	Бесцветная жидкость или с оттенком от желтоватого до зеленоватого
Вкус и запах	Характерны для комплекса растворимых в воде компонентов

Прозрачность и цвет определяли визуально в проходящем дневном свете. Для определения вкуса минеральную воду в бутылках погружали в бак с водой и льдом и выдерживали 1 час при температуре $12 \pm 1^\circ\text{C}$.

Результаты и их обсуждение

По вышеописанной методике были проведены исследования вод, взятых из питьевых источников, используемых при производстве минеральной воды. В результате было определено в исследуемых водах содержание хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, катионов кальция, магния, натрия, калия, фтора, йода, общая жесткость и минерализация. Результаты химического анализа исследуемых вод приведены в таблице 2. Изменение катионов кальция и магния в исследуемых видах воды приведены на диаграмме 1.

Таблица 2 – Результаты исследования химического состава воды

Показатели	Ед. измерения	Содержание основных ионов, не более		
		скважина 5492-Э «Кулагер-Арасан»	скважина 1943 «Кенетколь» «Туран»	артезианская вода «Свежесть»
Общая минерализация (сухой остаток)	мг\дм ³	1800-4000	180-260	400-650
Гидрокарбонаты	мг\дм ³	150-300	90-150	130-155
Хлориды	мг\дм ³	600-910	15-40	65-170
Сульфаты	мг\дм ³	400-600	35-65	60-125
Кальций	мг\дм ³	70-140	25-40	35-48
Магний	мг\дм ³	85-135	5-15	15-30
Натрий+калий	мг\дм ³	400-650	10-20	40-125
Фтор	мг\дм ³	0,7-0,9	0,5-0,7	0,7-0,9
Йод	мг\дм ³	50-200	-	0,05-0,2
Жесткость общая	мг\дм ³	13,0-15,0	2,0-2,8	4,0-5,0

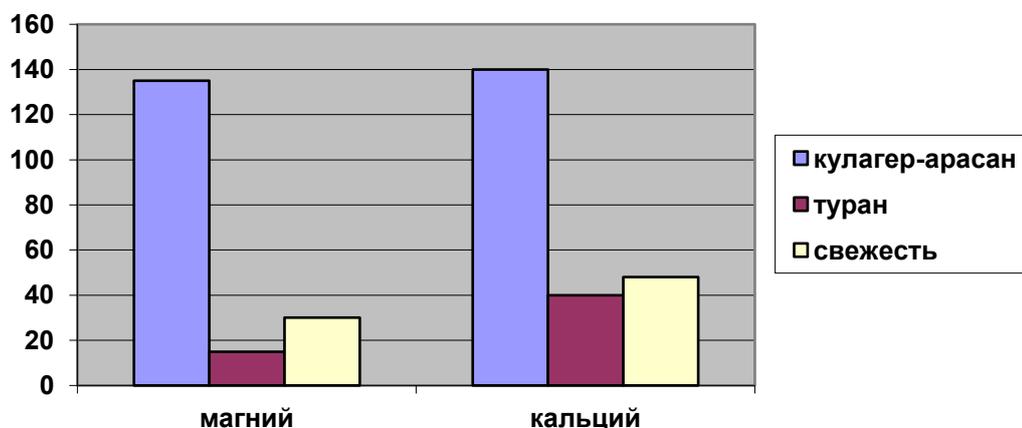


Рис. 1 – Изменение катионов кальция и магния в трех видах минеральной воды

Анализируя результаты, приведенные в таблице 2 все они в пределах допустимых, что соответствует СанПину по качеству питьевых вод. Наименьшее содержание всех показателей выявлено в водах со скважины 1943, что позволяет использовать данную воду для ежедневного употребления. Воду со скважины 5492-Э можно отнести к категории минерализованных вод. По содержанию показателей воды с артезианской скважины, данную воду можно отнести к категории лечебной. Как видно на диаграмме 1 содержание кальция и магния в исследуемых водах в пределах допустимых по СанПину: содержание кальция в пределах $35-48 \text{ мг\дм}^3$, магния $15-30 \text{ мг\дм}^3$.

Заключение

Минеральные воды являются природными подземными водами, формируются в толще земной коры с определенными геолого-структурными, геотермическими, гидрогеологическими и геохимическими условиями, которые определяют закономерности их пространственной локализации, газовый, ионно-солевой и микроэлементный состав, температуру и другие показатели.

Изучен химический состав трех источников вод, расположенных на территории г. Кокшетау и используемых в производстве минеральных и питьевых вод. Все полученные результаты в пределах допустимых по СанПиН.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Сергазина С.М. Легкая вода в Казахстане. ФГБОУ ВО «Алтайский гос.тех.университет им. И.И. Ползунова» / С.М. Сергазина, Е.А. Пятов, Г.А. Лоскутова // Ползуновский вестник. №3. 2016. С.28-31.
2. Пятов Е.А. Производство бутилированной «легкой» питьевой воды природного происхождения в Казахстане / Е.А. Пятов, С.М. Сергазина, А. Алпысова // VIII Международная конференция «Энергоэффективность и водосбережение в системах водоснабжения и водоотведения. Прогрессивные технологии, оборудование и материалы». SU ARNASY-Water Expo Central Azia. г.Астана. 2017. С-43-47.
3. СанПиН 3.01.067-97 Санитарные правила и нормы. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.
4. Пятов Е.А. Оценка изменения активности воды по отношению к железу при воздействии на нее монохроматическим красным поляризованным светом / Е.А. Пятов, Н.А. Белоконова, С.М. Сергазина и др. // Актуальные научные исследования в современном мире». г.Переслав-Хмельницкий. Выпуск 8(40) ч. 3 2018.
5. Резников А.А. Сборник методов анализов/ Методы анализа природных вод / А.А. Резников, Е.П. Муликовская, Н.Ю. Соколов. М.,: Недра, 1990 г. С.427 .
6. УМИ СЭВ-83 Унифицированные методы исследования качества вод. Часть 1.Т.2. Методы анализа вод. СЭВ. М., 1983.
7. Суков М.А. Том в Американском колледже медицины лабораторных животных / Марк А. Суков, Карла А. Стивенс и Рональд П. Уилсон. 2012 г. С. 23
8. Water&Waste Digest. [Electronic resource]. URL: <https://www.wwdmag.com/current-issue> (accessed 12.11.2021)
9. ГОСТ 23268.0-91 Воды минеральные питьевые, лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Правила приемки и методы отбора проб.
10. Storch K. Quality standard for medical spas and medical wellness providers in Europe / Kurtvon Storch. SchweizerbartSciencePublishers, Stuttgart, 2012.-181 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sergazina S.M. Legkaja voda v Kazahstane [Light Water in Kazakhstan]. / S.M. Sergazina, E.A. Pjatov, G.A. Loskutova // FGBOU VO «Altajskij gos.teh.universitet im. I.I. Polzunova». Polzunovskij vestnik [Polzunov Bulletin]. №3. 2016. pp. 28-31. [in Russian]
2. Pjatov E.A. Proizvodstvo butilirovannoj «legkoj» pit'evoj vody prirodnoho proishozhdenija v Kazahstane. VIII Mezhdunarodnaja konferencija «Jenergojeffektivnost' i vodosberezenie v sistemah vodosnabzhenija i vodootvedenija. Progressivnye tehnologii, oborudovanie i materialy». [Production of Bottled “Light” Drinking Water of Natural Origin in Kazakhstan. VIII International Conference “Energy Efficiency and Water Conservation in Water Supply and Sanitation Systems. Advanced Technologies, Equipment and Materials”.] SU ARNASY-Water Expo Central Azia. g.Astana. 2017. pp. 43-47. [in Russian]
3. SanPiN 3.01.067-97 Sanitarnye pravila i normy. Pit'evaja voda. Gigienicheskie trebovanija k kachestvu vody, centralizovannyh sistem pit'evogo vodosnabzhenija. Kontrol' kachestva. [SanPiN 3.01.067-97 Sanitary Rules and Regulations. Drinking Water. Hygienic Requirements for Water Quality, Centralized Drinking Water Supply Systems. Quality Control.] [in Russian]
4. Pjatov E.A. Ocenka izmenenija aktivnosti vody po otnosheniju k zhelezu pri vozdejstvii na nee monohromaticheskim krasnym poljarizovannym svetom. [Assessment of Changes in Water Activity in Relation to Iron When Exposed to Monochromatic Red Polarized Light.] / E.A. Pjatov, N.A. Belokonova, S.M. Sergazina // ISCIENCE.IN.UA «Aktual'nye nauchnye issledovanija v sovremennom mire». [“Actual Scientific Research in the Modern World”.] g.Perejaslav-Hmel'nickij. Vol. 8(40) Part 3 2018. [in Russian]
5. Reznikov A.A. Sbornik metodov analizov» [“Collection of Analysis Methods”] / A. A. Reznikov, E.P. Mulikovskaja, N.Ju. Sokolov // Metody analiza prirodnyh vod [Methods of Analysis of Natural Waters]. М.,: Nedra, 1990. p. 427 [in Russian]
6. UMI SJeV-83 Unificirovannye metody issledovanija kachestva vod. Metody analiza vod. [UMI SJeV-83 Unified Methods of Water Quality Research. Part 1. Vol.2. Methods of Water Analysis.] SJeV. М., 1983. [in Russian]
7. Suckow M. A. Tom v Amerikanskom kolledzhe mediciny laboratornyh zhivotnyh [Volume at the American College of Laboratory Animal Medicine] / Mark A Suckow; Karla A Stevens; Ronald P Wilson. 2012. p. 23 [in Russian]
8. Water&Waste Digest. [Electronic resource].URL: <https://www.wwdmag.com/current-issue> (accessed 12.11.2021)
9. GOST 23268.0-91 Vody mineral'nye pit'evye, lecebnye, lecebno-stolovye i prirodnye stolovye. Pravila priemki i metody otbora prob. [GOST 23268.0-91 Mineral Drinking Waters, Medicinal, Therapeutic and Natural Canteens. Acceptance Rules and Sampling Methods] [in Russian]
10. Storch K. Quality standard for medical spas and medical wellness providers in Europe / Kurtvon Storch. SchweizerbartSciencePublishers, Stuttgart, 2012.-181 p.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.033>

АНТИОКСИДАНТЫ ЛИСТЬЕВ ИРГИ КРУГЛОЛИСТНОЙ

Научная статья

Тихомирова Т.И.¹, Андреева О.А.², Червонная Н.М.³, Аджихметова С.Л.⁴*, Лигай Л.В.⁵³ ORCID: 0000-0001-9685-1384;⁴ ORCID: 0000-0001-9685-1384;⁵ ORCID: 0000-0001-7754-8793;^{1, 2, 3, 4, 5} Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ВолГМУ, Пятигорск, Россия

* Корреспондирующий автор (similla503[at]mail.ru)

Аннотация

Проведено сравнительное изучение весенних и осенних листьев ирги круглолистной (*Amelanchier rotundifolia*) на общее количество антиоксидантов, в том числе фенольных соединений и флавоноидов. Содержание антиоксидантов определяли амперометрическим методом на жидкостном хроматографе «Цвет Яуза-01-АА». Общее содержание фенольных соединений устанавливали с использованием реактива Фолина-Чокальтеу, содержание флавоноидов методом дифференциальной спектрофотометрии. Установлено, что оптимальным экстрагентом для извлечения всех антиоксидантов из анализируемого сырья является спирт этиловый 50%. Наибольшее количество антиоксидантов, фенольных соединений и флавоноидов накапливается в весенних листьях. Причём наблюдается чёткая корреляция между общим содержанием антиоксидантов, фенолов и флавоноидов.

Ключевые слова: ирга круглолистная, листья осенние, листья осенние антиоксидантная активность, фенольные соединения, флавоноиды.

ANTIOXIDANTS OF THE LEAVES OF AMELANCHIER ROTUNDIFOLIA

Research article

Tikhomirova T.I.¹, Andreeva O.A.², Chervonnaya N.M.³, Adzhiakhmetova S.L.⁴*, Ligay L.V.⁵³ ORCID: 0000-0001-9685-1384;⁴ ORCID: 0000-0001-9685-1384;⁵ ORCID: 0000-0001-7754-8793;^{1, 2, 3, 4, 5} Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute, branch of the Volgograd State Medical University, Pyatigorsk, Russia

* Corresponding author (similla503[at]mail.ru)

Abstract

The article features a comparative study of the spring and autumn leaves of *Amelanchier rotundifolia* for the total amount of antioxidants, including phenolic compounds and flavonoids. The content of antioxidants was determined by the amperometric method on a liquid chromatograph "Tsvet Yauza-01-AA". The total content of phenolic compounds was determined using the Folin-Chocalteu reagent, while the content of flavonoids was determined via differential spectrophotometry. It was found that the optimal extractant for extracting all antioxidants from the analyzed raw materials is ethyl alcohol, 50%. The greatest amount of antioxidants, phenolic compounds, and flavonoids accumulates in spring leaves. Moreover, there is a clear correlation between the total content of antioxidants, phenols, and flavonoids.

Keywords: *Amelanchier rotundifolia*, autumn leaves, autumn leaves antioxidant activity, phenolic compounds, flavonoids.

Введение

Плодовые культуры играют важную роль в жизни людей. Среди них много тех, которые выращиваются в большей степени для декоративных целей и часто называются «второстепенными» культурами, хотя имеют достаточно вкусные съедобные плоды и широко применяются в народной медицине при лечении ряда заболеваний. К таким растениям относится ирга (*Amelanchier*), которая относится к семейству розоцветные (*Rosaceae*), трибы яблоневые (*Maleae*). К настоящему времени известны несколько десятков видов ирги, произрастающих как в дикой природе, так и введённых в культуру [1], [2].

Наше внимание привлекла ирга круглолистная (*Amelanchier rotundifolia*), которая представляет декоративный листопадный кустарник высотой до 2,5 – 3,0 метров. Родиной её считается Малая Азия, но она широко распространена на Северном Кавказе. В настоящее время, в основном в кулинарии, применяются плоды ирги. Они имеют шарообразную форму и диаметр до 7 – 8 мм, черно-фиолетовый цвет и сладковатый вкус. В народной медицине применяют все части растения, в том числе и листья. Считается, что настой из листьев помогает при гипертонии, бессоннице, сердечно-сосудистых заболеваниях, а чай обладает обволакивающим и вяжущим свойствам [3].

Объяснить такое лечебное свойство листьев можно в первую очередь содержанием в них антиоксидантов и, прежде всего, фенольных соединений.

Целью работы явилось изучение листьев ирги круглолистных на наличие в них фенольных соединений и определение их количественного содержания.

Материалы и методы

Сырьём для исследования явились листья ирги круглолистной собранные весной (в мае) и осенью (в октябре) 2020 года в ботаническом саду Пятигорского медико-фармацевтического института. Листья сушили в тени до постоянной массы

Определение наличия в сырье фенольных соединений проводили с помощью качественных реакций в пробирках и методом бумажной хроматографии на бумаге марки FN 7.

Определение суммарного содержания антиоксидантов исследовали на жидкостном хроматографе «Цвет Яуза-01-АА» амперометрическим методом.

Используя градуировочный график зависимости выходного сигнала от концентрации кверцетина и галловой кислоты, измеряли массовую концентрацию антиоксидантов [4], [5, С. 10–14], [6, С.130–135].

Массовую концентрацию (мг/г) определяли по формуле 1:

$$X = \frac{X_{\Gamma} \cdot V_n \cdot N}{m_n \cdot 1000} \quad (1)$$

где: X_{Γ} – массовая концентрация антиоксидантов, найденная по градуировочному графику, мг/л; V_n – объем анализируемого извлечения, мл; m_n – навеска анализируемого сырья, г; N – кратность разбавления анализируемого извлечения.

Общее содержание фенольных соединений устанавливали спектрофотометрически по продуктам их окисления с реактивом Фолина-Чокальтеу [7, С. 373-380], [8, С. 242-251].

Концентрацию фенольных соединений в пересчете на галловую кислоту в анализируемом растворе определяли по градуировочному графику, а содержание в процентах (X) в пересчете на абсолютно сухое сырье рассчитывали по формуле 2:

$$X = \frac{C \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot 100}{a \cdot V_a \cdot (100 - W)} \quad (2)$$

где: C – концентрация фенольных соединений в исследуемом извлечении, найденная по градуировочному графику, г/100мл; a – навеска сырья, г; V_a – объем аликвоты, мл; W_1, W_2 – объемы мерных колб, мл; W – потеря в массе при высушивании, % [9, С. 152-178], [10, С. 15-22], [11, С. 225-232].

Сумму флавоноидов так же определяли спектрофотометрическим методом с использованием прибора спектрофотометр СФ-102. Расчёт их содержания проводили в пересчете на кверцетин и абсолютно сухое сырье в процентах (X_1) по формуле 3:

$$X_1 = \frac{A \cdot 25 \cdot 100 \cdot 100}{A_{1\text{см}}^{1\%} \cdot a \cdot 2 \cdot (100 - W)} \quad (3)$$

где: A – оптическая плотность исследуемого раствора; $A_{1\text{см}}^{1\%}$ – удельный показатель поглощения комплекса рутин а алюминия хлоридом при длине волны 408-415нм, равный 248; a – навеска сырья, г; W – влажность сырья, % [12].

Результаты и обсуждения

Качественные реакции, позволяющие установить в сырье наличие фенольных соединений, проводили как с осенними, так и с весенними листьями. Использовали порции сырья по 5 грамм. Часть порций экстрагировали водой дистиллированной, а часть 96%-ным этанолом в колбе с обратным холодильником на водяной бане в течение 45 минут. Извлечения сгущали до 1/3 объёма. С водными извлечениями проводили качественные пробирочные реакции. При добавлении нескольких капель 2%-ного водного раствора FeCl_3 наблюдали зелёную окраску. При добавлении 5%-ного водного раствора NaOH наблюдали ярко-жёлтую окраску. Оба результата могут быть следствием наличия в сырье фенольных соединений.

Спиртовые извлечения использовали для хроматографических исследований. В качестве элюирующих систем применяли системы: *n*-бутанол - кислота уксусная - вода (БУВ) с соотношении 4 : 1: 2 и кислота уксусная 15%. Хроматограммы просматривали в видимом и ультрафиолетовом свете, до и после обработки хромогенными реагентами. Использовали пары аммиака, 5%-ный водный раствор гидроксида натрия, 5%-ный спиртовой раствор хлорида алюминия, водный раствор хлорида железа (III). Как в извлечениях, полученных из осенних листьев, так и в извлечениях из весенних листьев, после обработки хроматограмм водным раствором хлорида железа (III), наблюдали по пять пятен, окрашенных в зелёный цвет. В УФ-свете эти пятна имели голубую, фиолетовую и темно-коричневую флюоресценцию. После обработки вышеописанными реагентами окраска пятен менялась: от паров NH_3 пятна становились ярко голубыми и жёлто-зелёными; от растворов NaOH и AlCl_3 в видимом свете – приобретали желтовато-зеленую окраску, а в УФ-свете жёлто-зелёную флюоресценцию. Такое поведение веществ на хроматограммах может подтверждать их фенольную природу.

Для определения суммарного содержания антиоксидантов, суммы фенольных соединений методом Фолина-Чокальтеу, суммы антиоксидантов и суммы флавоноидов в извлечениях пробы сырья по 1 грамму трижды экстрагировали на водяной бане в колбе с обратным холодильником спиртом этиловым: 90%-ным, 70%-ным, 50%-ным и водой *дистиллированной (очищенной)*. Объединённые водно-спиртовые и водные извлечения объединяли, фильтровали в колбы по 100 мл, отбирали пробы по 1мл и использовали для анализа.

Суммарное содержание антиоксидантов в исследуемых извлечениях

Содержание антиоксидантов в спиртовых, водно-спиртовых и водных извлечениях из листьев ирги в пересчете на кверцетин и галловую кислоту, площади пиков и кратность разбавления представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание антиоксидантов (в пересчете на кверцетин и галловую кислоту) в извлечениях из ирги круглолистной

Название сырья	Используемые экстрагенты	Кратность разбавления	Содержание антиоксидантов, мг/г (n=6) в пересчете на	
			кверцетин	галловую кислоту
Листья ирги, собранные осенью	спирт этиловый 90%	-	0,292±0,004	0,188±0,003
	спирт этиловый 70%	-	0,319±0,004	0,206±0,003
	спирт этиловый 50%	2	0,529±0,005	0,339±0,005
	вода очищенная	2	0,493±0,004	0,315±0,004
Листья ирги, собранные весной	спирт этиловый 90%	-	0,419±0,005	0,273±0,003
	спирт этиловый 70%	2	0,453±0,004	0,289±0,004
	спирт этиловый 50%	3	0,916±0,007	0,591±0,006
	вода очищенная	3	0,787±0,006	0,455±0,005

Амперометрическим методом установлено, что оптимальным экстрагентом суммы антиоксидантом из исследуемого сырья является спирт этиловый 50%, причём весенние листья по их содержанию значительно превосходят осенние листья.

Определение суммарного содержания фенольных соединений методом Фолина-Чокальтеу

Определение линейности методики и построение градуировочного графика [10, С. 15-22], [13] представлены в таблице 2 и на рисунке 1, содержание суммы фенольных соединений в извлечениях в таблице 3.

Таблица 2 – Оптическая плотность анализируемых растворов галловой кислоты с реактивом Фолина-Чокальтеу

Раствор, мкл	Концентрация галловой кислоты, г/100 мл	Оптическая плотность
25	0,00003	0,067
50	0,00006	0,126
75	0,00012	0,198
100	0,00018	0,318
125	0,00024	0,398
175	0,00036	0,641
200	0,00048	0,852

Визуальная оценка графика свидетельствует о его линейности, кроме того коэффициент корреляции составил 0,997, что позволяет использовать данный график для количественного определения фенольных соединений.

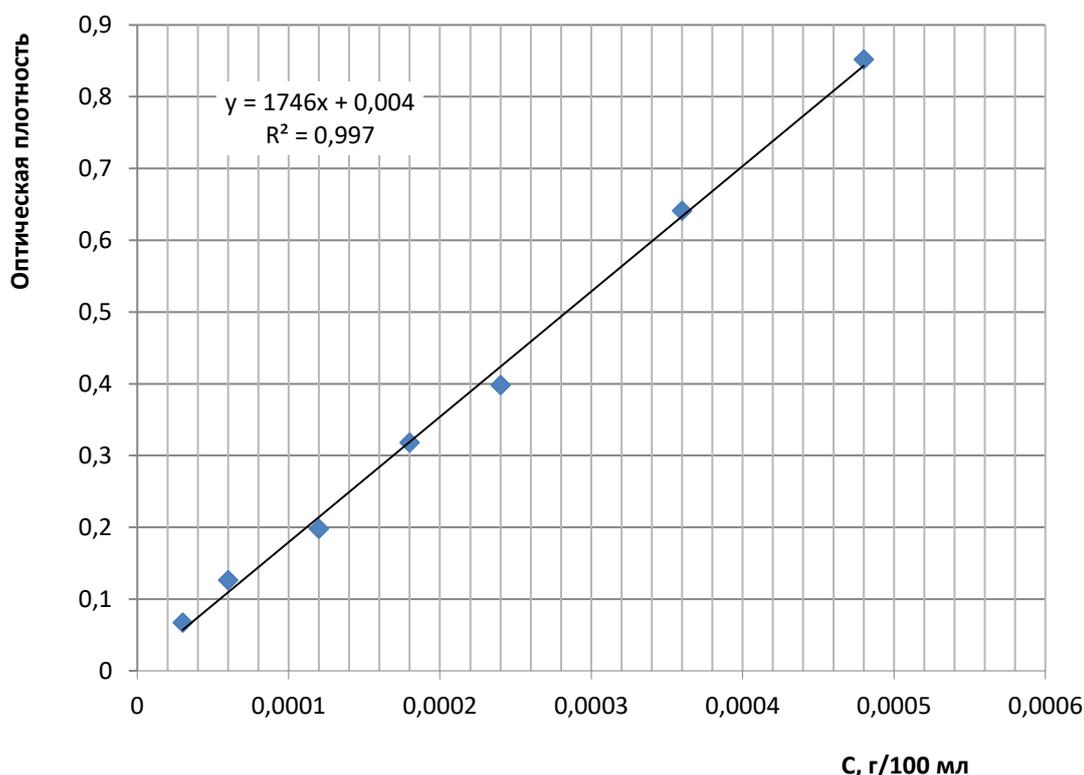


Рис. 1 – Градуировочный график взаимодействия кислоты галловой с реактивом Фолина-Чокальтеу

Уравнение градуировочного графика имеет вид: $y = 1746x + 0,004$.

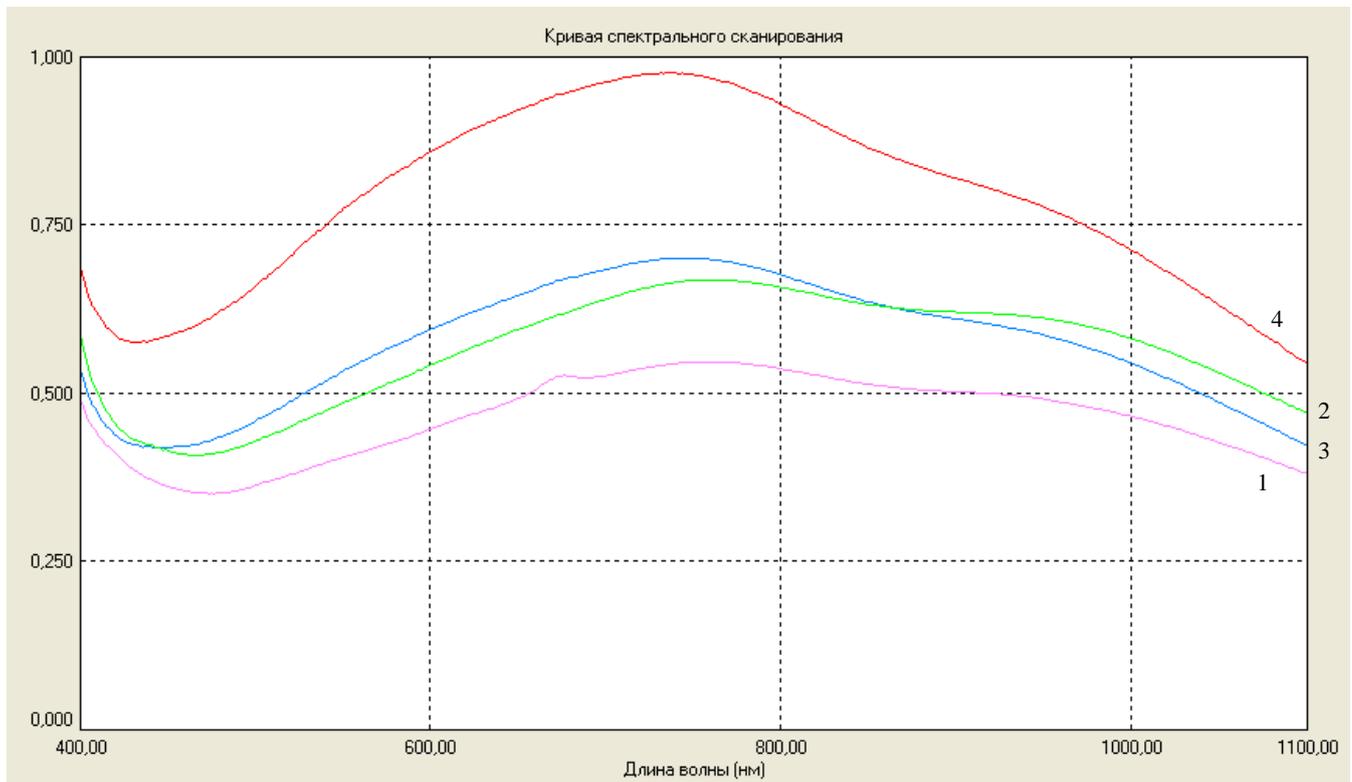


Рис. 2 – УФ-спектр поглощения комплекса извлечений полученных экстракцией 90% спиртом этиловым (1), водой очищенной (2), 70% (3) и 50% (4) спиртом этиловым из листьев ирги, собранных весной, с реактивом Фолина-Чокальтеу

Таблица 3 – Содержание суммы фенольных соединений в извлечениях из листьев ирги, полученных экстракцией спиртом этиловым различной концентрации и водой очищенной

Используемые экстрагенты	Название сырья			
	Листья ирги, собранные осенью		Листья ирги, собранные весной	
	Соотношение пробы извлечения и реактива Фолина-Чокальтеу	Общее содержание фенолов	Соотношение пробы извлечения и реактива Фолина-Чокальтеу	Общее содержание фенолов
спирт этиловый 90%	1:2	3,277±0,0010	1:2	4,212±0,013
спирт этиловый 70%	1:2	3,581±0,0011	1:2	5,421±0,015
спирт этиловый 50%	1:2	4,868±0,013	1:2	7,568±0,015
вода очищенная	1:2	2,353±0,009	1:2	5,163±0,013

Из данных таблицы следует, что максимальное содержание суммы фенольных соединений наблюдается в извлечении из листьев ирги, собранных весной, полученном экстракцией 50% спиртом этиловым, и составляет 7,568±0,015%.

Количественное определение флавоноидов

Установлено, что комплексное соединение рутина и извлечений из листьев ирги, полученного экстракцией 50% и 70% спиртом этиловым, с 2% спиртовым раствором алюминия хлорида, имеют максимальное поглощение при одной и той же длине волны 410±2 нм (рис. 3). Содержание суммы флавоноидов в извлечениях, полученных из листьев ирги представлено в таблице 4.

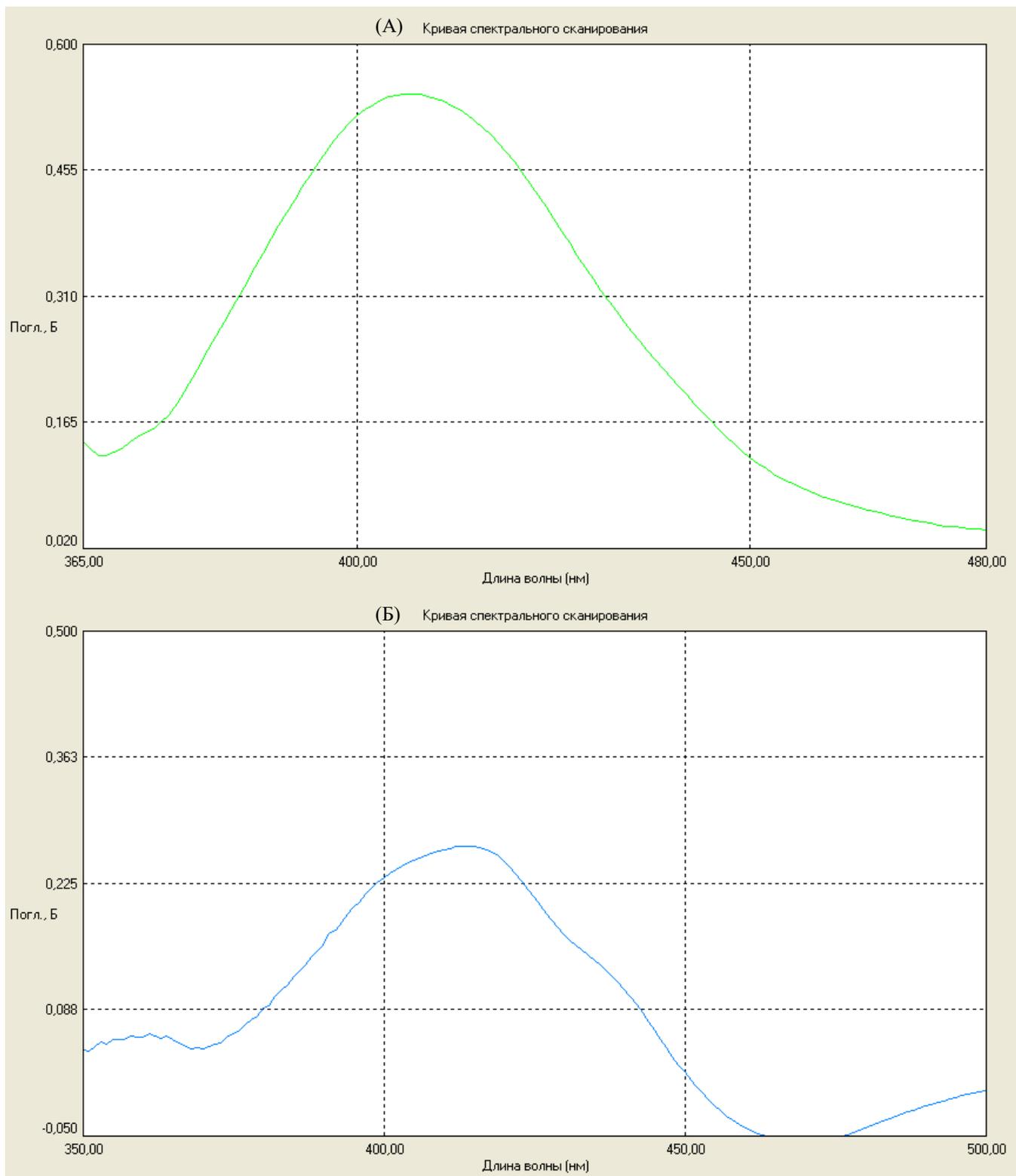


Рис. 3 – УФ-спектр поглощения комплекса 50% спиртового извлечения из листьев ирги круглолистной, собранных весной (А) и собранных осенью (Б), с 2% спиртовым раствором алюминия хлорида

Количественное определение флавоноидов проводили в 6 повторностях.

Таблица 4 – Содержание суммы флавоноидов в извлечениях, полученных из листьев ирги

Используемые экстрагенты	Название сырья			
	Листья ирги, собранные осенью		Листья ирги, собранные весной	
	Время (мин) стабилизации оптической плотности	Содержание флавоноидов, % (n=6)	Время (мин) стабилизации оптической плотности	Содержание флавоноидов, % (n=6)
спирт этиловый 70%	40	1,457±0,006	40	2,279±0,008
спирт этиловый 50%	35	1,222±0,005	45	2,980±0,008

Анализ полученных результатов позволил установить, что спирт этиловый 50% является лучшим экстрагентом для извлечения суммы флавоноидов, чем наиболее часто используемый для получения этих веществ, спирт этиловый 70%. Наибольшее количество флавоноидов накапливается в листьях ирги весной и составляет 2,980±0,008%.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что листья ирги круглолистной произрастающей в районе города Пятигорска содержат значительное количество антиоксидантов, в том числе фенольных соединений и флавоноидов. Выявлено соответствие между общим содержанием антиоксидантов, фенолов и флавоноидов наибольшее количество которых накапливается в листьях собранных весной. Оптимальным экстрагентом для выделения антиоксидантов является спирт этиловый 50%.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы

1. Ирга // Википедия. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ирга> (дата обращения: 12.11.2021)
2. Ирга: обзор ягодного кустарника и секреты его выращивания // Ferma.expert. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://ferma.expert/rasteniya/derevya/irga/irga> (дата обращения: 12.11.2021)
3. Применяем листья ирги для лечения правильно. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://medza.ru/listya-irgi-poleznye-svoystva-i-protivopokazaniya> (дата обращения: 12.11.2021)
4. Пат. 2238554 Российская Федерация, МКИ G01 N33/15 N27/26. Способ определения суммарной антиоксидантной активности биологически активных веществ / В.П. Пахомов [и др.] (РФ). № 2003123072/15; заявл. 25.07. 03; опубл. 20.10.04, Бюл. – № 15. – 3 с.
5. Яшин А.Я. Прибор для определения антиоксидантной активности растительных лекарственных экстрактов и напитков / А.Я. Яшин, Я.И. Яшин // Журн. междунар. информационная система по резонансным технологиям. – 2004. – №34. – С. 10–14.
6. Яшин А.Я. Инжекционно-проточная система с амперометрическим детектором для селективного определения антиоксидантов в пищевых продуктах и напитках / А.Я. Яшин // Рос.хим. журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2008. – № 2. – С.130–135.
7. Денисенко Т.А. Спектрофотометрическое определение суммы фенольных соединений в растительных объектах с использованием хлорида алюминия, 18-молибдодифосфата и реактива Фолина-Чокальтеу / Т.А. Денисенко, А.Б. Вишниккин, Л.П. Цыганок // Аналитика и контроль. – 2015. – 19(4). – С. 373-380.
8. Денисенко Т.А. Особенности взаимодействия 18-молибдодифосфата и реактива Фолина-Чокальтеу с фенольными соединениями / Т.А. Денисенко, А.Б. Вишниккин, Л.П. Цыганок // Аналитика и контроль. – 2015. – № 19 (3). – С. 242-251.
9. Singleton V.L. Analysis of total phenols and oxidations substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent / V.L. Singleton, R. Orthofer, R.M. Lamuela-Raventos // Methods in enzymology. – 1999. – № 299. – P. 152-178.
10. Аджиахметова С.Л. Содержание фенолов (в том числе флавоноидов) и антиоксидантов в листьях *Viscum album* L. и *Pyrus communis* L. / С.Л. Аджиахметова, Н.М. Червоная, Д.И. Поздняков и др. // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. – 2021. – Т. 24. № 2. – С. 15-22.
11. Леонова В.Н. Количественное определение суммы фенольных соединений в плодах *Rhus typhina* (L.) / В.Н. Леонова, И.В. Попов, О.И. Попов и др. // Химия растительного сырья. – 2019. – №1– С. 225-232.
12. Государственная фармакопея Российской Федерации [Электронный ресурс]. 14-е изд. URL: <http://femb.ru/feml> (дата обращения: 12.11.2021)
13. Волкова А.А. Исследование полифенольных соединений одно- и двулетних побегов вишни обыкновенной (*Cerasus vulgaris* Mill.): дис. канд. фарм. наук: 14.04.02 / Волкова Алла Андреевна. – Пятигорск, 2011. – 159 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Shedbush // Wikipedia. [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Irga> (accessed 15.11.2021) [in Russian]
2. Irga: obzor jagodnogo kustarnika i sekrety ego vyrashhivaniya [Shadbush: an overview of the berry bush and the secrets of its cultivation] // Ferma.expert [Electronic resource]. URL: <https://ferma.expert/rasteniya/derevya/irga/irga> (accessed 15.11.2021) [in Russian]
3. Primenjaem list'ja irgi dlja lechenija pravil'no [Correctly Applying Shadbush leaves for treatment]. [Electronic resource]. URL: <https://medza.ru/listya-irgi-poleznye-svoystva-i-protivopokazaniya> (accessed: 15.11.2021) [in Russian]
4. Pat. 2238554 Russian Federation, MCI G01 N33/15 N27/26. Sposob opredelenija summarnojj antioksidantnoj aktivnosti biologicheski aktivnykh veshhestv [A method for determining the total antioxidant activity of biologically active substances] / V.P. Pakhomov [et al.] (RF). No. 2003123072/15; application 25.07. 03; publ. 20.10.04, Bull. – No. 15– - 3 p. [in Russian]
5. Yashin A.Ya. Pribor dlja opredelenija antioksidantnoj aktivnosti rastitel'nykh lekarstvennykh ehkstraktov i napitkov [A device for determining the antioxidant activity of herbal medicinal extracts and beverages] / A. Ya. Yashin, Ya. I. Yashin // Zhurn. mezhdunar. informacionnaja sistema po rezonansnym tekhnologijam [Journal. international. information system on resonant technologies]. - 2004. - No. 34. - pp. 10-14 [in Russian]
6. Yashin A.Ya. Inzhekcionno-protocnaja sistema s amperometricheskim detektorom dlja selektivnogo opredelenija antioksidantov v pishhevykh produktakh i napitkakh [Injection-flow system with an amperometric detector for the selective determination of antioxidants in food and beverages] / A. Ya. Yashin // Ros.khim. zhurn. Ros. khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva [Russian Chemical Journal]. - 2008. - No. 2. - pp.130-135 [in Russian]

7. Denisenko T.A. Spektrofotometricheskoe opredelenie summy fenol'nykh soedinenij v rastitel'nykh ob'ektakh s ispol'zovaniem khlorida aljuminija, 18-molibdodifosfata i reaktiva Folina-Chokal'teu [Spectrophotometric determination of the number of phenolic compounds in plant objects using aluminum chloride, 18-molybdenum diphosphate, and Folin-Chokalteu reagent] / T. A. Denisenko, A. B. Vishnikin, L. P. Tsyganok // *Analitika i kontrol'* [Analytics and control]. - 2015. - 19(4). - pp. 373-380 [in Russian]
8. Denisenko T.A. Osobennosti vzaimodejstvija 18-molibdodifosfata i reaktiva Folina-Chokal'teu s fenol'nymi soedinenija [Features of the interaction of 18-molybdenum diphosphate and Folin-Chokalteu reagent with phenolic compounds] / T. A. Denisenko, A. B. Vishnikin, L. P. Tsyganok // *Analitika i kontrol'* [Analytics and control]. - 2015. - № 19 (3). - pp. 242-251 [in Russian]
9. Singleton V.L. Analysis of total phenols and oxidations substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent / V.L. Singleton, R. Orthofer, R.M. Lamuela-Raventos // *Methods in enzymology*. - 1999. - № 299. - P. 152-178.
10. Adziakhmetova S.L. Soderzhanie fenolov (v tom chisle flavonoidov) i antioksidantov v list'jah *Viscum album L.* i *Pyrus communis L.* [The content of phenols (including flavonoids) and antioxidants in the leaves of *Viscum album L.* and *Pyrus communis L.*] / S. L. Adziakhmetova, N. M. Chervonnaya, D. I. Pozdnyakov, et al. // *Voprosy biologicheskoy, medicinskoy i farmaceuticheskoy khimii* [Issues of biological, medical and pharmaceutical chemistry]. - 2021. - Vol. 24. No. 2. - pp. 15-22 [in Russian]
11. Leonova V.N. Kolichestvennoe opredelenie summy fenol'nykh soedinenij v plodakh *Rhus typhina (L.)* [Quantitative determination of the amount of phenolic compounds in fruits *Rhus typhina (L.)*] / V. N. Leonova, I. V. Popov, O. I. Popov // *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of plant raw materials]. - 2019. - No. 1- pp. 225-232 [in Russian]
12. The State Pharmacopoeia of the Russian Federation [Electronic resource]. 14th ed. URL: <http://femb.ru/feml> (accessed 15.11.2021) [in Russian]
13. Volkova A.A. Issledovanie polifenol'nykh soedinenij odno- i dvuletnikh pobegov vishni obyknovennykh (*Cerasus vulgaris Mill.*) [Investigation of polyphenolic compounds of one- and two-year-old cherry shoots (*Cerasus vulgaris Mill.*): Candidate's thesis. Pharmaceutical Sciences: 04/14/02 / Volkova Alla Andreevna. - Pyatigorsk, 2011– 159 p. [in Russian]