№ 12 (78) ▪ 2018
Часть 1 ▪ Декабрь

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЖУРНАЛ

INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL

ISSN 2303-9868 PRINT
ISSN 2227-6017 ONLINE

Екатеринбург
2018

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЖУРНАЛ
INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL
ISSN 2303-9868 PRINT
ISSN 2227-6017 ONLINE

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: 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4, корп. А, оф. 17.
Электронная почта: editors@research-journal.org
Сайт: www.research-journal.org
16+

№ 12 (78) 2018
Часть 1
Декабрь

Дата выхода 19.12.2018.
Подписано в печать 19.12.2018.
Тираж 900 экз.
Цена: бесплатно.
Заказ 28490.
Отпечатано с готового оригинал-макета.
Отпечатано в типографии ООО "Компания ПОЛИГРАФИСТ",
623701, г. Березовский, ул. Театральная, дом № 1, оф. 88.

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

Номер свидетельства о регистрации в Федеральной Службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: **ПИ № ФС 77 – 51217.**

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);
Свистунов Ю.А. д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

Географические науки:
Умывакин В.М. д-р геогр. наук, к.техн.н. проф., Военный авиационный инженерный университет (Воронеж, Россия);
Брылев 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);
Шеуджен А.Х. д-р биол. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);
Ларионов М.В. д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, 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 Мдицинская Академиия (Ижевск, Россия).

Исторические науки:
Меерович М.Г. д-р ист. наук, к.архитектуры, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия);
Бакулин В.И. д-р ист. наук, проф., Вятский государственный университет (Киров, Россия*);*
Бердинских В.А. д-р ист. наук, Вятский государственный гуманитарный университет (Киров, Россия);
Лёвочкина Н.А. к.ист.наук, к.экон.н. ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия).

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 университетв 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:
Бурда А.Г. д-р экон. нау, проф., Кубанский Государственный Аграрный Университет (Краснодар, Россия);
Лёвочкина Н.А. д-р экон. наук, к.ист.н., ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия);
Ламоттке М.Н. к.экон.н., Нижегородский институт управления (Нижний Новгород, Россия);
Акбулаев Н. к.экон.н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан);
Кулиев О. к.экон.н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан).

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

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

Екатеринбург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Бобров А.А., Бронин С.Я., Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И ПРОВОДИМОСТЬ В УЛЬТРАХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЕ. РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ 8

Рябов В.М., Бурова И.Г., Кальницкая М.А., Малевич А.В., Лебедева А.В., Борзых А.Н.

О ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С ПЛОХО ОБУСЛОВЛЕННЫМИ МАТРИЦАМИ 13

Казачек М.В., Гордейчук Т.В.

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В СПЕКТРАХ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ 18

Омельян О.М.

О МЕТРИЧЕСКОЙ СВЯЗНОСТИ ЛЕВИ-ЧИВИТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОСКОСТЕЙ 26

Прокопенко Е.А., Савищенко Н.П., Шевченко А.В., Поняев С.А., Твердохлебов К.В., Яшков С.А.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СВЕРХЗВУКОВОЙ АТМОСФЕРНО-ВАКУУМНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ 31

Радионов А.А., Панаэтова О.С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ГОРНЫХ УЩЕЛЬЯХ ОТ СУТОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ 37

Савченко С.П.

ФОКУСИРОВКА МАГНОНОВ В КРИСТАЛЛАХ СО СТРУКТУРОЙ АЛЬФА-ЖЕЛЕЗА 43

Седов А.В.

АППРОКСИМАЦИЯ И ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ В БАЗИСЕ ОКАЙМЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ИНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ 47

Аксенов В.П., Дудоров В.В., Колосов В.В., Филимонов Г.А.

СТАТИСТИКА МОДОВОГО СОСТАВА ВИХРЕВЫХ МАТРИЧНЫХ ПУЧКОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В АТМОСФЕРЕ 51

Юртаева Т.П., Рудин А.В., Сабурова Д.А., Серсков В.Ю., Денисова О.М., Журина А.Е.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОРЕЗИСТОРОВ 57

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Булаев А.Г., Меламуд В.С.

БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ 63

Булаев А.Г., Меламуд В.С., Бодуэн А.Я.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МЕДИ И ЦИНКА ИЗ НЕКОНДИЦИОННОГО КОНЦЕНТРАТА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЫШЬЯКА 72

Грудинский П.И., Смирнова В.Б., Дюбанов В.Г., Козлов П.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЛЬФАТОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЦИНКОВЫХ КЕКОВ 77

Грудинский П.И., Дюбанов В.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ХВОСТОВ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЛЬФАТОВ ЖЕЛЕЗА 83

Мехтиев А.Д., Югай В.В., Алькина А.Д., Есенжолов У.С., Калиаскаров Н.Б.

МНОГОТОПЛИВНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ С ТЕПЛОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ, СПОСОБНАЯ ЭФФЕКТИВНО РАБОТАТЬ В УСЛОВИЯХ СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ КАЗАХСТАНА 88

Иванов И.Е.

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 95

Кузьмина Т.О., Стоцкая А.Д., Поляхов Н.Д.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УПОРНЫМ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ, КАК УЗЛОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА 101

Макашова З.Э., Чередниченко Л.А., Чередниченко Ф.Л.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПОРТИВНОЙ ВЕРЕВКИ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ. 107

Масенко А.В., Сбитнева Н.И., Скворцов В.А., Щебетеев В.А.

ОСОБЕННОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ 0, 4 КВ 111

Миронова Э.Ю.

ОБЗОР ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА STARLINK 117

Елуферьева Ю.С., Пальмов С.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВОКЗАЛА СРЕДСТВАМИ ANYLOGIC 121

Путилова Е.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ Р110 128

Супроненко Н.Н., Щеголева А.Б.

ЗАЩИТА СКВАЖИННЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ СЕЛЬСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ 133

Лысенко Ю.Д., Звягинцев В.А., Лукачев С.В., Шиманова А.Б., Захаров М.О.

ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО КОМПОНОВОЧНЫМ РЕШЕНИЯМ БЛОКА ИСПАРИТЕЛЯ-КОНДЕНСАТОРА ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ 137

Яковенко С.В., Будрин С.С., Швец В.А.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ФЛУКТУАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ 141

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / CHEMISTRY

Падалка С.Д., Фотина Н.С., Подварко А.Т., Беседина Е.Н., Балахнина И.В., Савва А.П., Есипенко Л.П.

СТЕРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ В ТРЕХСТАДИЙНОМ СИНТЕЗЕ ПОЛОВОГО ФЕРОМОНА КОМНАТНОЙ МУХИ (*MUSCA DOMESTICA* L.) ЦИС-9-ТРИКОЗЕНА 146

Протопопов А.В., Бобровская С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОКИСЛЕНИЯ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА 152

Фоменко Е.В., Акимочкина Г.В., Аншиц А.Г.

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ УЗКИХ ФРАКЦИЙ ИЗ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА 156

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ / MEDICINE

Газизов Р.А., Шамсетдинов Ф.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНАКТИВАЦИИ *BACILLUSATROPHAEUS* С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСТОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА 165

Алексеев Р.З, Гольдерова А.С., Мамаева С.Н., Платонова В.А., Саввинова Л.Н., Афанасьева С.С., Кычкина Т.В.

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ЭРИТРОЦИТОВ У ЛИЦ УМЕРШИХ ОТ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ 169

Сорокина Ю.А., Гаврилова Д.М., Копылова М.В., Барсук А.Л.

ФИКСИРОВАННЫЕ КОМБИНАЦИИ САХАРОСНИЖАЮЩИХ ПРЕПАРАТОВ: СТАНДАРТЫ ПРИМЕНЕНИЯ В РФ, США И ЕВРОПЕ 173

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / BIOLOGY

Агасьева И.С., Нефедова М.В., Настасий А.С., Исмаилов В.Я.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИНТЕТИЧЕСКОГО ПОЛОВОГО ФЕРОМОНА КАЛИФОРНИЙСКОЙ ЩИТОВКИ 177

Нененко Н.Д., Максимова Т.А.

КОРРЕКЦИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ ЖЕНЩИН ПЕРВОГО ЗРЕЛОГО ВОЗРАСТА ПОСРЕДСТВОМ ЗАНЯТИЙ ФИТНЕСОМ ПО СИСТЕМЕ HOT IRON™ 181

Леонова Т.С., Вихнина М.В., Гришина Т.В., Леонова Л.Е., Фролов А.А., Романовская Е.В.[6]

ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНЫХ ПРОДУКТОВ ГЛУБОКОГО ГЛИКИРОВАНИЯ НА КЛЕТОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ . 185

Мальцев А., Омаркожаулы Н., Сенкебаева Д.

ВЫВОДИМОСТЬ И ПОЛОВАЯ ДЕТЕРМИНАЦИЯ НЕКОТОРЫХ ПТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЯИЦ..... 195

ВЕТЕРИНАРНЫЕ НАУКИ / VETERINARY SCIENCE

Адельгейм Е.Е., Шепелев С.И.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ КОРМОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЦЫПЛЯТ-БРОЙЛЕРОВ КРОССА «КОББ-500»..... 200

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.001

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И ПРОВОДИМОСТЬ В УЛЬТРАХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЕ. РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Научная статья

Бобров А.А.[1,] *, Бронин С.Я.[2], Зеленер Б.Б.[3], Зеленер Б.В.[4]

[1, 2, 3, 4] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия;

[3] Национальный исследовательский университет – Московский энергетический институт, Москва, Россия;

[3] Национальный исследовательский университет – Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (abobrov[at]inbox.ru)

Аннотация

В работе методом молекулярной динамики исследован электрический ток в ультрахолодной сильно неидеальной плазме. Ток вызывается электрическим полем, приложенным к плазме. Расчеты сделаны для разных значений параметра неидеальности. Проводимость плазмы определялась из отношения тока и электрического поля. Проведено сравнение с результатами, полученными другими методами. Обсуждается отличие от результатов, полученных ранее на основе анализа коэффициента диффузии и автокорреляционной функции тока.

Ключевые слова: молекулярная динамика, неидеальная плазма.

ELECTRICAL CURRENT AND CONDUCTIVITY IN ULTRACOLD PLASMA. CALCULATION BY THE METHOD OF MOLECULAR DYNAMICS

Research article

Bobrov A. A.[1,] *, Bronin S. Ya.[2], Zelener B. B.[3], Zelener B. V.[4]

[1, 2, 3, 4] Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia;

[3] National Research University – Moscow Power Engineering Institute, Russia, Moscow;

[3] National Research University – Moscow Engineering Physics Institute, Russia, Moscow

* Corresponding author (abobrov[at]inbox.ru)

Abstract

Electric current in the ultracold highly collisional plasma was considered in the work by the method of molecular dynamics. The current is caused by the electric field applied to plasma. Calculations are made for different values of the collisional parameter. Plasma conductivity was determined from the ratio of current and electric field. Comparison with the results obtained by other methods was performed. The difference from the results obtained earlier on the basis of the analysis of the diffusion coefficient and the autocorrelation function of the current is discussed.

Keywords: molecular dynamics, collisional plasma.

Введение

Ультрахолодная плазма – это плазма, получаемая при температуре несколько кельвинов при ионизации атомов, охлаждаемых в магнитооптической ловушке. Впервые такая плазма была получена в 1999 [1], [2], [3]. Ультрахолодная плазма имеет ряд особенностей, позволяющих моделировать кинетические процессы сильно неидеальных кулоновских систем. В частности, ультрахолодная плазма является нейтральной и полностью ионизованной плазмой, поэтому ее свойства определяются исключительно столкновениями заряженных частиц. Это важное отличие от обычной низкотемпературной плазмы, где важную роль играют столкновения заряженных частиц с нейтральными.

Ультрахолодная плазма, как правило, сильно неидеальная, так как она производится из ультрахолодного атомного газа, который может быть приготовлен при относительно высокой плотности. Когда атомы ионизуются лазером, температура образующихся электронов определяется разницей энергии фотона и потенциала ионизации атома. Эта разница может быть очень мала – всего несколько кельвинов.

Теоретическое рассмотрение сильно неидеальной плазмы существенно затруднено в силу отсутствия малого параметра (в качестве которого в слабонеидеальной плазме служит отношение длины Ландау к радиусу Дебая), поэтому для решения задач в области сильной неидеальности используют различные численные методы. Ранее в [4] мы исследовали численным методом молекулярной динамики коэффициент самодиффузии ионов в сильно неидеальной плазме. Наши результаты находятся в хорошем согласии с недавними экспериментами [5] по определению коэффициента самодиффузии в ультрахолодной плазме. Также мы рассчитали коэффициент диффузии электронов, экспериментальных данных для которого еще нет.

В рамках одноэлектронного приближения по коэффициенту диффузии для электронов мы оценили электрическую проводимость в широком диапазоне параметра неидеальности плазмы.

Необходимо отметить, что наши результаты [4] для диффузии в ультрахолодной плазме хорошо согласуются с оценкой диффузии работы [6], в которой методом молекулярной динамики моделировалась горячая плотная плазма, но с тем же значением параметра неидеальности. В [6] также определялась проводимость, но другим методом – по автокорреляционной функции тока, и этот результат не совпадает с оценкой проводимости [4]. И в [4] и в [6] проводимость оценивалась непрямыми методами и в настоящей работе мы представляем расчет проводимости прямым методом – используя моделирование электрического тока в плазме.

Теоретическая модель

Ультрахолодная плазма, получаемая в экспериментах является существенно неравновесной и нестационарной системой. Равновесная степень ионизации, которая получается из распределения Больцмана, должна обратится в ноль при таких низких температурах. Но, как наблюдается в экспериментах и показано в теоретических работах, главный процесс, приводящий к рекомбинации, – тройная рекомбинация, – существенно подавлен в ультрахолодной плазме. Причиной низкой скорости рекомбинации является существенная неидеальность плазмы. Ультрахолодная плазма с высокой степенью ионизации наблюдается в экспериментах в течение длительных времен – до десятков микросекунд.

В типичных экспериментальных условиях ультрахолодная плазма также не находится в термическом равновесии. Температуры электронов T_e и ионов T_p устанавливаются независимо, однако, в силу большого различия масс электронов и ионов, обмен энергиями между этими подсистемами очень медленный.

В нашей работе, мы рассмотрели кинетику полностью ионизованной ультрахолодной сильно неидеальной плазмы. Мы моделировали плазму на временах, много меньших как характерного времени рекомбинации, так и времени электрон-ионного обмена энергиями. Это позволило нам рассматривать плазму, как квазистационарную и квазиравновесную систему.

Для моделирования ультрахолодной плазмы мы использовали метод молекулярной динамики. Мы рассматривали кубическую ячейку моделирования, заполненную заряженными частицами – электронами и ионами (протонами). Для частиц мы решали классические уравнения движения. Мы рассматривали нейтральную плазму. Неизмененный кулоновский потенциал использовался для учета межчастичного взаимодействия как для одноименных, так и для разноименных зарядов. Для описания поведения частиц при близких пролетах, мы использовали метод “leapfrog” с переменным шагом по времени.

В рассматриваемых условиях мы ограничились решением классических уравнений движения, поскольку среднее расстояние между частицами было много больше длины волны ДеБройля для частиц. Что касается образования атомов, единственным процессом рекомбинации в ультрахолодной плазме является трехчастичная рекомбинация, при которой за рассматриваемые времена могут образоваться только высоковозбужденные связанные состояния. Эти состояния описываются классической механикой с высокой степенью точности.

В работе мы рассмотрели системы, состоящие из 1000 частиц в ячейке моделирования ($N_e = 500$ электронов и $N_p = 500$ протонов). Размер ячейки моделирования выбирался из соотношения задаваемой концентрации электронов n_e и числа электронов N_e. Начальные координаты частиц в ячейке задавались случайным образом. Начальные скорости частиц задавались так, чтобы суммарные кинетические энергии электронов и ионов равнялись заданным значениям ($E_e(0)$ и $E_p(0)$ соответственно). Более детальное описание моделирования см. в работе [4].

Для моделирования электрического тока в плазме, электрическое поле E прикладывалось к ячейке моделирования, спустя некоторое время после начала интегрирования уравнений движения. Задержка включения поля требовалась для установления электронной температуры. Электрическое поле направлялось вдоль одного из ребер ячейки (параллельно оси x).

Результаты и обсуждение

В настоящей работе мы численно моделировали плазму для концентрации электронов $n_e = 10^{10}$ см$^{-3}$ и начальной энергии электронов из интервала $E_e = 2 - 30$ К, что соответствует сильно неидеальной плазме. Неидеальность плазмы приводит к известному эффекту нагрева “disorder induced heating” [7]: после начала вычислений кинетическая энергия электронов быстро растет в течение времени, примерно равного обратной плазменной частоте:

$$\omega_p^{-1} = \sqrt{m_e/4\pi n_e e^2}\,,$$

где m_e - масса электрона, e – элементарный заряд. После нагрева электроны получают энергию порядка энергии на среднем расстоянии $\sim e^2/n_e^{1/3}$, устанавливается равновесная температура электронов и включается поле.

Приложенное электрическое поле приводит к протеканию тока по плазме вдоль оси x. Для предотвращения появления нелинейных эффектов, таких как образование убегающих электронов, мы в расчетах использовали малое значение поля E по сравнению с критическим полем E_c (при котором доля убегающих электронов становится значительной) [8]:

$$E_c = \frac{4\pi e^3 L n_e}{T_e},$$

где L - это кулоновский логарифм:

$$L = \ln\frac{\sqrt{T_e/4\pi n_e e^2}}{e^2/T_e}.$$

Ток рассчитывался по формуле:

$$\vec{I}(t) = \sum_{j=1}^{N_e} e\vec{v}_j(t),$$

где $\vec{v}_j(t)$ - это скорость j-го электрона в момент времени t.

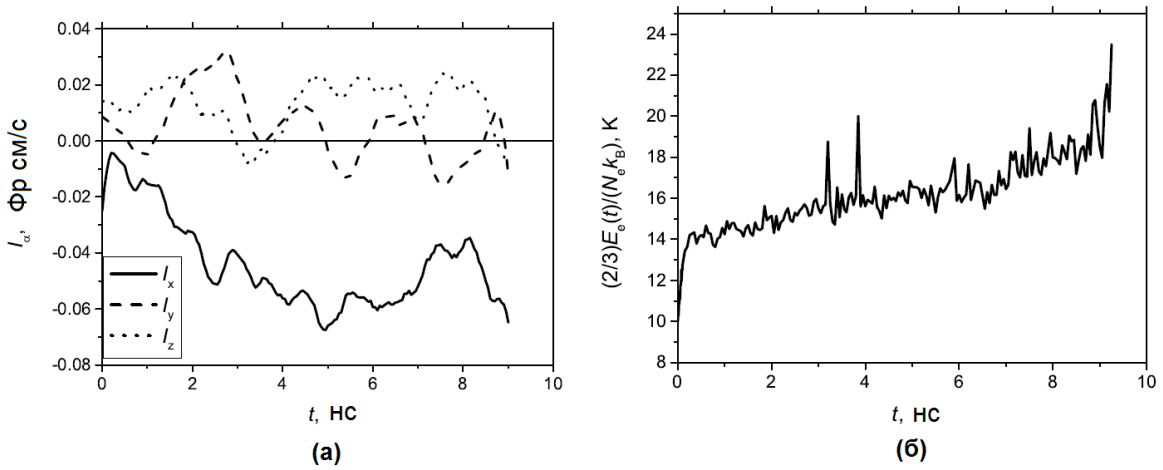


Рис. 1 – Электрический ток *(а)* и кинетическая энергия на один электрон *(б)* для одного из расчетов для $n_e = 10^{10}$ см$^{-3}$, $T_e(0) = 10$ К, $E = 3 \cdot 10^{-4}$ статВ/см

На рис. 1 типичные временные зависимости тока и соответствующей суммарной кинетической энергии электронов представлены для одного из расчетов для $n_e = 10^{10}$ см$^{-3}$ и $T_e(0) = 10$ К. Электрическое поле, равное $E = 3 \cdot 10^{-4}$ статВ/см было включено в расчете в момент времени $t = 1$ нс. Для этих условий значение критического поля составляет примерно $E_c \approx 6 \cdot 10^{-3}$ статВ/см, что в 20 раз превышает значение поля, использованного в этом расчете. На рис. 1(б) хорошо виден быстрый рост энергии электронов из-за первичного разогрева, за которым следует медленный джоулев нагрев. Так как мы использовали малые значения электрического поля в расчетах, рост температуры электронов из-за протекания тока был очень медленным.

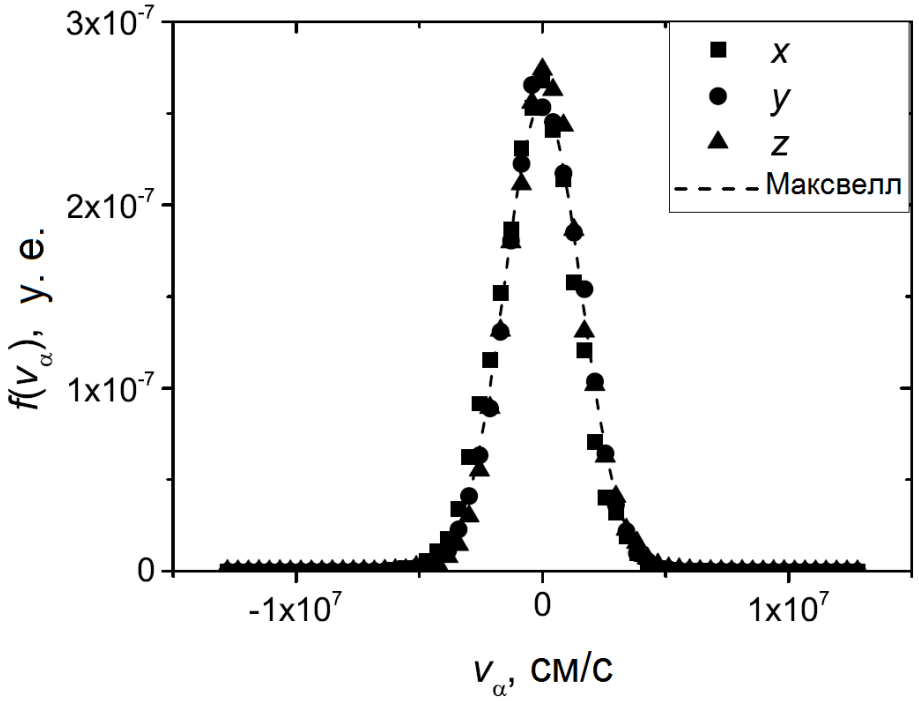


Рис. 2 – Распределение электронов по проекциям скоростей для расчета на рис. 1 в момент времени $t = 5$ нс. *Точки* – результат расчета, *линия* – распределение Максвелла для $T_e = 15$ К

На рис. 2 распределения электронов по проекциям скоростей на оси координат показаны для расчета, результаты которого представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что искажение распределения вдоль оси x незначительно и эффектом убегания электронов можно пренебречь.

Для определения проводимости σ использовалось следующее выражение для плотности тока:

$$J_x = \sigma E = \frac{I_x n_e}{N_e}.$$

Удобно представить проводимость в безразмерном виде:

$$\sigma^* = \sigma/\omega_p.$$

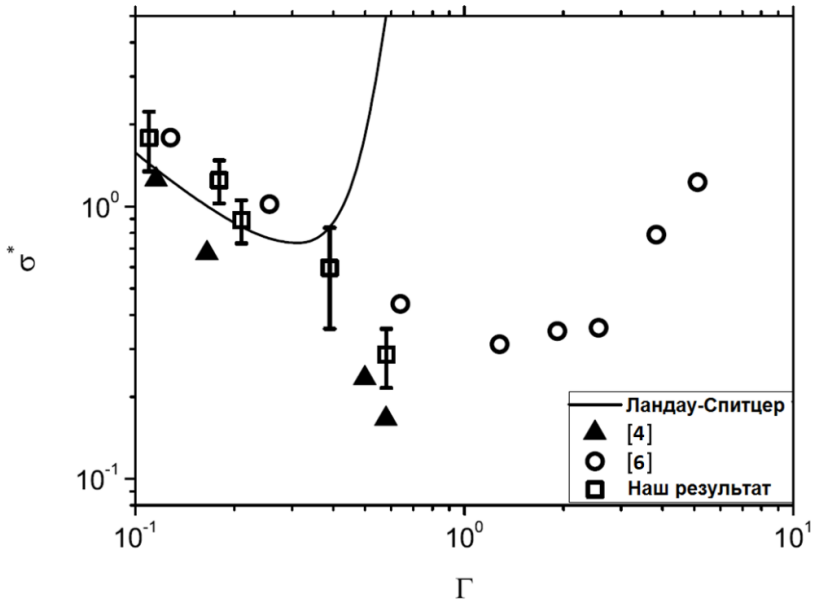


Рис. 3 – Безразмерная проводимость; проводимость по Ландау-Спитцеру получена с использованием частоты столкновений из [9]

На рис. 3 представлены результаты расчетов безразмерной проводимости в зависимости от параметра неидеальности плазмы $\Gamma = e^2/(T_e a)$, где $a = (4\pi n_e/3)^{-1/3}$. Теоретическая зависимость Ландау-Спитцера представлена сплошной линией. Для расчета проводимость мы усредняли траектории, полученные молекулярной динамикой за относительно короткие времена, так что рост температуры электронов из-за выделения джоулева тепла не превышал 10%. В результате, погрешность Γ не превышает размера точек на рис. 3. Но это, в свою очередь, приводит к довольно большой неопределенности в оценке электрического тока, что является главным источником погрешности определения проводимости, как видно на рис. 3. Для всех представленных результатов значение использованного в расчетах электрического поля E было на порядок (и более) меньше соответствующего значения критического поля E_c.

Так как на рис. 3 проводимость приведена в безразмерном виде в зависимости от Γ, то мы можем сопоставить наши результаты для ультрахолодной плазмы с результатами, полученными для горячей и плотной плазмы [6]. В работе [6] проводимость рассчитывалась с использованием функции автокорреляции тока. Из рисунка видно, что результаты нашей настоящей работы хорошо согласуются с [6] для умеренной неидеальности, однако начиная с $\Gamma \approx 0.5$ начинают расходиться. Мы считаем, что причиной этого расхождения является использование в [6] модифицированного потенциала Кулона. В [6] использовался потенциал Кельбга для описания электрон-ионных взаимодействий и, по-видимому, это влияет на результаты в области большой плотности и сильной неидеальности.

На рис. 3 приведены также наши предыдущие результаты [4]. В [4] мы получали проводимость на основе расчета автокорреляционной функции скорости (VAF). Из VAF мы получали оценку эффективной частоты столкновений электронов, на основе которой мы делали оценку проводимости. Видно, что результаты [4] отличаются как от результатов настоящей работы, так и от [6]. Это отличие можно объяснить тем фактом, что на проводимость влияют только столкновения электронов и ионов. Столкновения же электронов между собой на проводимость не влияют, так как при этом полный импульс электронов сохраняется. А эффективная частота столкновений содержит в себе вклады и ион-электронных, и элекрон-электронных столкновений. К похожему выводу пришли и авторы работы [10] при исследовании слабонеидеальной плазмы.

Заключение

В настоящей работе было проведено моделирование тока в ультрахолодной неидеальной плазме методом молекулярной динамики. Электрическая проводимость была оценена прямым методом на основе зависимости протекающего по плазме тока от приложенного поля. Проведено сравнение безразмерной проводимости с результатами, полученными другими непрямыми методами. Проанализировано отличие результатов других работ от результатов расчетов проводимости, полученных в настоящей работе.

Финансирование

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума Российской академии Наук «Исследование вещества в экстремальных состояниях» под руководством академика Фортова В.Е.

Funding

This work was supported by the Basic Investigations Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences “Study of Substance in Extreme States” under the guidance of Academician Fortov V.E.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Killian T. C. Creation of an ultracold neutral plasma / T. C. Killian, S. Kulin, S. D. Bergeson and others // Physical Review Letters. – 1999. – Vol. 83. – №. 23. – P. 4776.

2. Kulin S. Plasma oscillations and expansion of an ultracold neutral plasma / T. C. Killian, S. Kulin, S. D. Bergeson and others // Physical review letters. – 2000. – Vol. 85. – №. 2. – P. 318.

3. Killian T. C. Formation of Rydberg atoms in an expanding ultracold neutral plasma / T. C. Killian, M. J. Lim, S. Kulin // Physical review letters. – 2001. – Vol. 86. – №. 17. – P. 3759.

4. Zelener B. B. Self-diffusion and conductivity in an ultracold strongly coupled plasma: Calculation by the method of molecular dynamics / B. B. Zelener, B. V. Zelener, E. A. Manykin and others // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 946. – №. 1. – P. 012126.

5. Strickler T. S. Experimental measurement of self-diffusion in a strongly coupled plasma / T. S. Strickler,T. K. Langin, P. McQuillen and others // Physical Review X. – 2016. – Vol. 6. – №. 2. – P. 021021.3

6. Morozov I. V. Collisions and Langmuir waves in nonideal plasmas / I. V. Morozov, G. E. Norman //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2005. – Vol. 100. – №. 2. – P. 370-384.

7. Simien C. E. Using absorption imaging to study ion dynamics in an ultracold neutral plasma / C. E. Simien, Y. C. Chen, P. Gupta and others // Physical review letters. – 2004. – Vol. 92. – №. 14. – P. 143001.

8. Lifshitz E. M. Physical Kinetics, translated by JB Sykes and RN Franklin / E. M. Lifshitz, L. P. Pitaevskii. – 1981.

9. Spitzer L. Physics of fully ionized gases. – Courier Corporation, 2006.

10. Desjarlais M. P. Density-functional calculations of transport properties in the nondegenerate limit and the role of electron-electron scattering / M. P. Desjarlais, C. R. Scullard, L. X. Benedict and others // Physical Review E. – 2017. – Vol. 95. – №. 3. – P. 033203.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.002

О ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С ПЛОХО ОБУСЛОВЛЕННЫМИ МАТРИЦАМИ

Научная статья

Рябов В.М.[1], Бурова И.Г.[2,] *, Кальницкая М.А.[3], Малевич А.В.[4], Лебедева А.В.[5], Борзых А.Н.[6]

[1] ORCID: 0000-0002-1364-5428;
[2] ORCID: 0000-0002-8743-1377;
[3] ORCID: 0000-0001-5671-5070;
[4] ORCID: 0000-0003-0753-4621;
[5] ORCID: 0000-0001-9026-0292;
[6] ORCID: 0000-0001-5489-911X;
[1, 2, 3, 4, 5, 6] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (i.g.burova[at]spbu.ru)

Аннотация

Представлены результаты численного решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с симметричными и несимметричными плохо обусловленными матрицами методом регуляризации. Рассматриваются положительно определенные, а также осцилляционные матрицы. В статье показано, что для регуляризации вычислительного процесса по методу Тихонова достаточно заменить матрицу A_n системы матрицей $A_n + \alpha E_n$ где E_n – единичная матрица, а α – некоторое положительное число (параметр регуляризации), которое стремится к нулю.

Ключевые слова: плохо обусловленные системы линейных алгебраических уравнений, матрицы Гильберта, параметр регуляризации.

ON NUMERICAL SOLUTION OF SYSTEMS OF LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS WITH ILL-CONDITIONED MATRICES

Research article

Ryabov V.M.[1], Burova I.G.[2,] *, Kalnitskaya M.A.[3], Malevich A.V.[4], Lebedeva A.V.[5], Borzykh A.N.[6]

[1] ORCID: 0000-0002-1364-5428;
[2] ORCID: 0000-0002-8743-1377;
[3] ORCID: 0000-0001-5671-5070;
[4] ORCID: 0000-0003-0753-4621;
[5] ORCID: 0000-0001-9026-0292;
[6] ORCID: 0000-0001-5489-911X;
[1, 2, 3, 4, 5, 6] St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

***** Corresponding author (i.g.burova[at]spbu.ru)

Abstract

The results of the numerical solution of systems of linear algebraic equations (SLAE) with symmetric and asymmetrical ill-conditioned matrices by the regularization method are presented in the paper. Positive-definite and oscillatory matrices are considered. The article shows that in order to regularize the computational process according to the Tikhonov method, it is enough to replace the system matrix A_n with the matrix A_n + αE_n where E_n is the identity matrix, and α is some positive number (regularization parameter) that tends to zero.

Keywords: ill-conditioned systems of linear algebraic equations, Hilbert matrices, regularization parameter.

Введение

При решении различных задач возникает необходимость решать плохо обусловленные СЛАУ с положительно определенными симметричными матрицами. Такие системы линейных алгебраических уравнений возникают, например, когда функцию $f(x)$ аппроксимируют алгебраическими многочленами в метрике пространства $L_2(0,1)$: если мы возьмем полином в виде $\sum_{i=0}^{n} c_i x^i$ и определим погрешность аппроксимации как $E = \int_0^1 (\sum_{i=0}^{n} c_i x^i - f(x))^2\, dx$, то из условия минимизации E придем к СЛАУ с матрицей Гильберта. Такие системы линейных алгебраических уравнений также возникают при решении обыкновенных дифференциальных уравнений методом Ритца, что приводит к матрицам Грама. Эти матрицы размерности n являются симметричными и положительно определенными, но при неограниченном увеличении n наименьшее собственное значение может стремиться к нулю, что приводит к неустойчивости решения.

Обычно для получения надежного решения используют методы регуляризации. Общей стратегией является использование стабилизатора Тихонова [1] или его модификаций [2], [3], [4], [5], [6], [7]. В этой статье рассматриваются особенности численного решения СЛАУ с положительно определенной симметричной матрицей с использованием регуляризации. В следующих разделах показано, что для регуляризации вычислительного процесса по методу Тихонова достаточно заменить матрицу системы A_n матрицей $A_n + \alpha E_n$, где E_n – единичная матрица, а α – положительное число (параметр регуляризации), стремящееся к нулю. Таким образом, мы уменьшаем число обусловленности системы линейных алгебраических уравнений, что увеличивает устойчивость.

Постановка задачи

Пусть A – невырожденная вещественная квадратная матрица порядка n. В этом случае решение СЛАУ $Az = f$ существует и единственно. Известны различные модификации метода Гаусса для решения СЛАУ, например, метод Гаусса с выбором ведущего элемента (в столбце или в матрице) и другие. Предположим, что число обусловленности $cond\ (A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|$ матрицы A велико, т.е. матрица системы уравнений плохо обусловлена. Решение плохо обусловленных СЛАУ методом Гаусса не всегда дает удовлетворительное решение. Например, пусть

$$\mathrm{A} = \begin{pmatrix} 0.0000001 & 333 & 555 \\ 33333333 & 1 & 70 \\ 55555555 & 70 & 32 \end{pmatrix},\ f = \begin{pmatrix} 888 \\ 33333404 \\ 55555657 \end{pmatrix}$$

Число обусловленности матрицы A приближенно равно 10^7. Решая эту систему методом Гаусса без перестановок (с помощью программы, написанной на C++ с вещественными числами типа double), получим $z = (1.0,\ 1.555556,\ 0.666667)^T$, что существенно отличается от точного решения $(1.0,\ 1.0,\ 1.0)^T$. Подобные примеры были рассмотрены в [6]. Эти примеры показывают, что в процессе решения необходимо избегать деления на малые по абсолютной величине элементы. Избежать эту ситуацию помогает использование модифицированного метода Гаусса, заключающегося в выборе ведущего элемента, являющегося наибольшим по абсолютному значению элементом в столбце (стратегия Уилкинсона) или по всей матрице (стратегия полного упорядочения Жордана) [2]. Применение метода Гаусса с выбором ведущего элемента по столбцам дает решение $z = (1.0,\ 1.0,\ 1.0)^T$. Если система уравнений является плохо обусловленной, например, в случае СЛАУ с матрицей Гильберта $H_n = (h_{ij})_{i,j=1}^n$ порядка n с элементами $h_{ij} = 1/(i+j-1)$, то практически невозможно получить приемлемое решение СЛАУ с помощью известных методов (прямыми методами, такими как метод Гаусса, метод квадратного корня, итерационными методами и др.).

В таблице 1 приведены числа обусловленности матриц Гильберта порядков от 3 до 20, полученные с помощью пакета Maple (Digits=50). В таблице 2 представлены решения СЛАУ $Az = f$ с матрицами Гильберта H_n, полученные методом Гаусса (стратегия Уилкинсона). Здесь представлены решения, полученные при решении систем уравнений для $n = 10, 12, 14, 20$, вычисленные в C++ с числами типа double. Решения, представленные в таблице 2, далеки от истинных решений. В следующих разделах представлен метод регуляризации, с помощью которого получены решения исходной системы $Az = f$ с матрицами Гильберта $A = H_n$ при использовании нормы

$$\| H_n \| = \max_i \sum_{j=1}^{n} | h_{ij} |.$$

Таблица 1 – Числа обусловленности матриц Гильберта H_n

n	cond (H_n)	n	cond (H_n)
3	748	12	$4.1154 \cdot 10^{16}$
4	28375	13	$1.3244 \cdot 10^{18}$
5	$9.4366 \cdot 10^{5}$	14	$4.5378 \cdot 10^{19}$
6	$2.9070 \cdot 10^{7}$	15	$1.5392 \cdot 10^{21}$
7	$9.8519 \cdot 10^{8}$	16	$5.0628 \cdot 10^{22}$
8	$3.3873 \cdot 10^{10}$	17	$1.6808 \cdot 10^{24}$
9	$1.0996 \cdot 10^{12}$	18	$5.7661 \cdot 10^{25}$
10	$3.5357 \cdot 10^{13}$	19	$1.9258 \cdot 10^{27}$
11	$1.2337 \cdot 10^{15}$	20	$6.2836 \cdot 10^{28}$

Таблица 2 – Решения СЛАУ с матрицами H_n.

n=10	n=12	n=14	n=20
1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1.000000	1.000003	0.999990	1.000075
0.999998	0.999916	1.000310	0.997232
1.000020	1.001125	0.996220	1.043007
0.999903	0.991859	1.019948	0.657461
1.000267	1.035385	0.981738	2.485524
0.999563	0.902315	0.675197	-2.218021
1.000421	1.175419	2.922896	2.012694
0.999779	0.795768	-4.498100	11.914026
1.0000480	1.148663	10.515965	-20.728838
	0.938525	-9.428208	5.732215
	1.011022	8.094763	34.233277
		-1.740964	-42.153623
		1.460245	18.727738
			2.721547
			-16.803379
			49.405743
			-57.516277
			33.288344
			-5.798746

Численное решение плохо обусловленной системы уравнений

Различные подходы к решению систем уравнений с плохо обусловленными матрицами известны (см. [1-7]). В данной работе для получения приемлемого решения СЛАУ рассматривается применение модификации метода регуляризации. Известный стандартный метод регуляризации Тихонова позволяет найти нормальное решение системы $Az = f$. Этот метод основан на поиске элемента, на котором функционал $M_\alpha(z, A, f) = \|Az - f\|^2 + \alpha\,\|z\|^2$ достигает наименьшего значения для фиксированного положительного α. Для этого необходимо решить уравнение Эйлера $(A^*A + \alpha E)z = A^*f$, где A^* - сопряженная матрица. Решение уравнения Эйлера зависит от числа обусловленности матрицы A^*A. Это число может быть очень большим. Если матрица A симметрична и положительно определена, мы предлагаем найти нормальное решение другим способом. В данной работе предлагается найти нормальное решение путем решения системы уравнений, для которой число обусловленности значительно меньше.

Пусть матрица СЛАУ

$$Az=f \tag{1}$$

является симметричной и положительно определенной (например, матрица Гильберта). В этом случае существует единственный положительно определенный корень из матрицы $B = \sqrt{A}$, т.е. положительно определенная матрица B такая, что $B^2 = A$. Установим связь между собственными значениями и собственными векторами матриц A и B: пусть μ и $x -$ собственное значение и собственный вектор матрицы B:

$$B=\mu x \tag{2}$$

Умножив (2) на B, получаем

$$Ax=\mu Bx \tag{3}$$

Используя (2), перепишем (3) как $Ax = \mu^2 x$. Это равенство означает, что собственные векторы матриц A и B одинаковы, а собственные значения матрицы A равны квадратам собственных значений матрицы B. Умножив (1) на B^{-1} , получаем

$$Bz=B^{-1}f \tag{4}$$

Запишем для (4) уравнение Эйлера для минимизации сглаживающего функционала $M_\alpha(z, B, B^{-1}f) = \|Bz - B^{-}1f2 + \alpha z2$: оно имеет вид

$$(B^*B+\alpha E)z_a=B^*(B^{-1}f),\ a>0 \tag{5}$$

В случае симметричной матрицы A матрица B является самосопряженной, поэтому мы получаем уравнение

$$(A+\alpha E)\ Z\alpha=f \tag{6}$$

Формально в исходной системе осуществляется сдвиг, но фактически это метод регуляризации для уравнения (1).

В памяти компьютера числа обычно хранятся с некоторыми погрешностями. Будем считать, что матрица и вектор даны приближенно, т.е. вместо матрицы A и правой части f известны A_δ и f_δ такие, что $\|A - A_\delta\| \le \delta$, $\|f - f_\delta\| \le \delta$. Говорить о сходимости можно лишь при неограниченном увеличении точности исходной информации, т.е. при δ→0. Однако практически мы не можем неограниченно уменьшать δ , из-за чего результаты могут быть далеки от желаемых решений. Решая задачу (6), получаем приближенное решение системы (1).

Замечание. Методы вычисления квадратного корня матрицы описаны в [8-11]. Если матрица A симметрична, нам не нужно вычислять матрицу B. Применение регуляризации непосредственно к уравнению (1) просто увеличит число обусловленности результирующей системы, что невыгодно. В случае несимметричной положительно определенной матрицы уравнение Эйлера для системы (1) имеет вид (5). Сходимость метода регуляризации изложена в [1]. В отличие от стандартного подхода процедуры регуляризации представление (5) имеет меньшее число обусловленности, что очень важно. Но, в отличие от симметричных матриц, необходимо знать матрицу B в случае несимметричной матрицы. Последнее требование усложняет применение данного метода на практике.

Существуют классы несимметричных матриц, все собственные значения которых положительны. Покажем, как в этом случае можно осуществить процесс регуляризации в форме (5), а не в традиционной форме $(A^*A+\alpha E)z = A^*f$, $\alpha > 0$, что, как уже упоминалось выше, существенно уменьшает число обусловленности решаемой системы. Рассматривается класс осцилляционных матриц (см. [12]), все собственные значения которых положительны и попарно различны, а соответствующие собственные векторы обладают особыми свойствами колебаний.

Пусть матрица $A_n -$ осцилляционная, а V есть матрица собственных векторов A_n, $\Lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_n]$ $-$ диагональная матрица собственных чисел A_n. Тогда $A_n V = V A_n$ или $A_n = V\,\Lambda V^{-1}$. Пусть $\Lambda_1 = [\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_n}]$. Положим $B = V\Lambda_1 V^{-1}$. Понятно, что $B^2 = V\Lambda_1 V^{-1} V\Lambda_1 V^{-1} = V\Lambda_1^2 V^{-1} = V\Lambda V^{-1} = A_n$. Таким образом, процесс регуляризации может быть осуществлен в форме (5). Обобщенная матрица Вандермонда, то есть матрица вида $\left(a_i^{b_k}\right)_{i,k=1}^{n}$, $0 < a_1 < \dots < a_n$, $b_1 < \dots < b_n$, относится к классу осцилляционных матриц. Для регуляризации СЛАУ с такими матрицами применима описанная выше схема.

Результаты применения метода регуляризации

Проведена серия вычислительных экспериментов по применению метода регуляризации для решения СЛАУ с матрицами Гильберта порядков n=2,3,...,20. В таблицах 3, 4 показаны результаты применения метода регуляризации для различных параметров $\alpha = 10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-12}$ для решения возмущенной СЛАУ $(H_n + \alpha E_n)z = f$, где матрица исходной системы $H_n = (h_{ij})_{i,j=1}^{n}$ есть матрица Гильберта порядка n. Решение возмущенной системы получено методом Гаусса с выбором ведущего элемента по столбцам. Точное решение исходной невозмущенной системы $H_n z = f$ есть n-мерный вектор из единиц: $z = (1.0,\ 1.0,\ \dots, 1.0)^T$. Вычисляя решение возмущенной СЛАУ при различных значениях α, находим значение параметра, при котором погрешность решения имеет минимальное значение. Параметр α, соответствующий решению с наименьшей нормой, назовем оптимальным. Таким образом, для решения системы уравнений (1) необходимо решить несколько систем уравнений для различных α. В таблицах 3, 4

полужирным шрифтом выделено наименьшее значение нормы погрешности для заданного n, соответствующее оптимальному значению параметра возмущения α. В последней строке этих таблиц приведены нормы погрешностей решений, полученных без регуляризации. Погрешность решения вычислялась с помощью евклидовой нормы.

Таблица 3 – Нормы погрешностей решений СЛАУ с матрицами Гильберта порядка $n = 10, 12$ методом (6) при различных значениях параметра α

α	$n = 10$	$n = 12$
10^{-12}	$0.13\ 10^{-5}$	$0.22 \cdot 10^{-5}$
$\mathbf{10^{-11}}$	$\mathbf{0.14 \cdot 10^{-6}}$	$\mathbf{0.69 \cdot 10^{-7}}$
10^{-10}	$0.16 \cdot 10^{-6}$	$0.19 \cdot 10^{-6}$
10^{-8}	$0.16 \cdot 10^{-3}$	$0.20 \cdot 10^{-3}$
10^{-7}	$0.58 \cdot 10^{-3}$	$0.58 \cdot 10^{-3}$
10^{-6}	$0.17 \cdot 10^{-2}$	$0.19 \cdot 10^{-2}$
10^{-5}	$0.56 \cdot 10^{-2}$	$0.63 \cdot 10^{-2}$
10^{-4}	$0.18 \cdot 10^{-1}$	$0.19 \cdot 10^{-1}$
10^{-3}	$0.56 \cdot 10^{-1}$	$0.61 \cdot 10^{-1}$
10^{-2}	0.1799	0.1985
10^{-1}	0.5788	0.6355
Нормы погрешностей решений без применения метода регуляризации		
	$0.71 \cdot 10^{-3}$	0.3306

Точность арифметики с плавающей запятой можно охарактеризовать машинным ε, т.е. наименьшим положительным числом с плавающей запятой ε, для которого 1 + ε >1 (см. [6]). Мы можем вычислить машинное ε. Например, в 64-битном C++ переменные типа double дают $\varepsilon \approx 2.2 \cdot 10^{-16}$.

Таблица 4 – Нормы погрешностей решения СЛАУ с матрицами Гильберта порядков $n = 14, 20$ методом (6) при различных значениях параметра α

α	$n = 14$	$n = 20$
10^{-12}	$0.19 \cdot 10^{-4}$	$0.17 \cdot 10^{-4}$
10^{-11}	$0.27 \cdot 10^{-6}$	$\mathbf{0.23 \cdot 10^{-6}}$
10^{-10}	$\mathbf{0.20 \cdot 10^{-6}}$	$0.25 \cdot 10^{-6}$
10^{-8}	$0.20 \cdot 10^{-3}$	$0.25 \cdot 10^{-3}$
10^{-7}	$0.65 \cdot 10^{-3}$	$0.78 \cdot 10^{-3}$
10^{-6}	$0.21 \cdot 10^{-2}$	$0.25 \cdot 10^{-2}$
10^{-5}	$0.66 \cdot 10^{-2}$	$0.80 \cdot 10^{-2}$
10^{-4}	$0.21 \cdot 10^{-1}$	$0.25 \cdot 10^{-1}$
10^{-3}	$0.67 \cdot 10^{-1}$	$0.81 \cdot 10^{-1}$
10^{-2}	0.2153	0.2581
10^{-1}	0.6872	0.8220
Погрешности решении без регуляризации		
	17.0703	105.2819

Теорема Тихонова утверждает, что теоретически, по мере уменьшения α, регуляризованное решение улучшается, но в практических расчетах для достаточно малых α (в пределах точности машины в C++) погрешности округления и число обусловленности матрицы имеют значительное влияние. Это можно увидеть, изучив результаты, представленные в начале таблиц 3, 4.

Заключение

В данной работе представлены результаты численного решения СЛАУ с положительно определенными симметричными (или несимметричными, но почти симметричными) плохо обусловленными матрицами модифицированным методом регуляризации. Показано, что решение СЛАУ с матрицами Гильберта с использованием метода регуляризации может быть существенно улучшено.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. Изд. 2-е. – 284 с.

2. Фаддеев Д. К. Вычислительные методы линейной алгебры / Д. К. Фаддеев, В. Н. Фаддеева. – М.: Физматгиз, 1960. – 656 с.

3. Фаддеев Д.К. О плохо-обусловленных системах линейных уравнений / Д. К. Фаддеев, В. Н. Фаддеева // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1961. – Т. 1. – №3. – С. 412–417.

4. Гавурин М.К. О плохо-обусловленных системах линейных алгебраических уравнений / М. К. Гавурин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1962. – Т. 2. – №3. – С. 387–397.

5. Гавурин М. К. Применение полиномов Чебышева при регуляризации некорректных и плохо обусловленных уравнений в гильбертовом пространстве / М. К. Гавурин, В. М. Рябов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1973. – Т. 13. – №6. – С. 1599–1601.

6. Форсайт Дж. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений / Дж. Форсайт, К. Молер. Перевод с английского В.П. Ильина и Ю.И. Кузнецова. Под редакцией Г.И. Марчука. – М.: Мир, 1969. – 167 с.

7. Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи / С.И. Кабанихин. – Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. – 457 с.

8. Bjorck A. A Schur method for the square root of a matrix / A. Bjorck, S. Hammarling // Linear Algebra Appl. – 1983. – V. 52/53, P. 127–140.

9. Higham Nicholas J. Functions of matrices: Theory and computation / J. Higham Nicholas – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. – 425 p.

10. Deadman E. Blocked Schur algorithms for computing the matrix square root / E. Deadman, N.J. Higham, R. Ralha // Lecture Notes in Computer Science, V. 7782, Springer-Verlag. – 2012. P. 171–182.

11. Higham Nicholas J. Newton's Method for the Matrix Square Root / J. Higham Nicholas // Mathematics of computation. – 1986. – V. 46. – №174. – P. 537–549.

12. Гантмахер Ф. Р. Осцилляционные матрицы и ядра и малые колебания механических систем / Ф.Р. Гантмахер, М.Г. Крейн // Москва-Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы [ГИТТЛ], 1950. 359 с.

Список литературы на английском языке/ References in English

1. Tikhonov A. N. Solutions of Ill-Posed Problems / A. N. Tikhonov, V. Ya.Arsenin - Halsted, New York, 1977

2. Faddeev D. K. Vychislitelnye metody linejnoj algebry [Computational methods of linear algebra] / D. K. Faddeev, V. N. Faddeeva. – Moskow: Fizmatgiz, 1960. – 656 P. [in Russian]

3. Faddeev D. K. O plokho-obuslovlennykh sistemakh linejnykh uravnenij [On ill-posed systems of linear equations] / D. K. Faddeev, V. N. Faddeeva // Zhurnal vychislitelnoj matematiki i matematicheskoj fiziki [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. – 1961. – V. 1. – №3. – P. 412–417. [in Russian]

4. Gavurin M. K. O plokho-obuslovlennykh sistemax linejnykh algebraicheskikh uravnenij [On ill-posed systems of linear algebraic equations] / M. K. Gavurin // Zhurnal vychislitelnoj matematiki i matematicheskoj fiziki [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. – 1962. – V. 2. – №3. – P. 387–397. [in Russian

5. Gavurin M. K. Primenenie polinomov Chebysheva pri regulyarizacii nekorrektnykh i plokho obuslovlennykh uravnenij v gilbertovom prostranstve [Application of Chebyshev polynomials in the regularization of ill-posed and ill-conditioned equations in a Hilbert space] / M. K. Gavurin, V. M. Ryabov // Zhurnal vychislitelnoj matematiki i matematicheskoj fiziki [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. – 1973. – V. 13. – №6. – P. 1599–1601. [in Russian

6. Forsythe George E. Computer Solution of Linear Algebraic Systems / George E.Forsythe & Cleve B.Moler - Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1967

7. Kabanikhin S. I. Obratnye i nekorrektnye zadachi [Inverse and incorrect tasks] / S. I. Kabanikhin. – Novosibirsk: Sibirskoe nauchnoe izdatelstvo [Siberian Scientific Publishing], 2009. – 457 P. [in Russian

8. Bjorck A. A Schur method for the square root of a matrix / A. Bjorck, S. Hammarling // Linear Algebra Appl. – 1983. – V. 52/53, P. 127–140

9. Higham Nicholas J. Functions of matrices: Theory and computation / J. Higham Nicholas – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. – 425 P.

10. Deadman E. Blocked Schur algorithms for computing the matrix square root [Text] / E. Deadman, N. J. Higham, R. Ralha // Lecture Notes in Computer Science, V. 7782, Springer-Verlag. – 2012. P. 171–182.

11. Higham Nicholas J. Newton's Method for the Matrix Square Root / J. Higham Nicholas // Mathematics of computation. – 1986. – V. 46. – №174. – P. 537–549.

12. Gantmakher F. R. Oscillation matrices and kernels and small vibrations of mechanical systems. / F. R.Gantmakher, M.G.Krein - Dept. Commerce USA. Joint Publ. Service - 1961 (Translated from Russian)

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.003

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В СПЕКТРАХ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Научная статья

Казачек М.В.[1], Гордейчук Т.В.[2,] *
[1] ORCID: 0000-0001-9320-1124;
[2] ORCID: 0000-0001-8425-4080;
[1, 2] Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток, Россия

* Корреспондирующий автор (Tanya[at]poi.dvo.ru)

Аннотация

Представлен доработанный вариант модели формирования линий щелочных металлов в спектрах сонолюминесценции. Модель основана на гипотезе, что сложный профиль линий является результатом наложения спектров, излученных при различной плотности возмущающей среды, и успешно объясняет все особенности линии. Рассмотрено поведение модели при варьировании ее параметров. Рассмотрены варианты модели: при аппроксимации формы линии гауссовой, лоренцевой, треугольной функциями; для различного вида зависимости плотности от времени; с учетом зависимости интенсивности излучения металла от времени. В рамках модели обработан большой массив экспериментальных спектров Na, K, Li, произведены оценки диапазонов плотности, при которой происходит излучение металлов, вклада различных компонентов излучения в спектры. Модель позволяет существенно продвинуться в понимании механизма излучения металлов при сонолюминесценции.

Ключевые слова: сонолюминесценция, атомная эмиссия щелочных металлов, форма спектральной линии.

ON MECHANISM OF ALKALI METALS LINES FORMATION IN SONOLUMINESCENCE SPECTRA

Research Article

Kazachek M.V.[1], Gordeychuk T.V.[2,] *
[1] ORCID: 0000-0001-9320-1124;
[2] ORCID: 0000-0001-8425-4080;
[1, 2] Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russia

* Corresponding author (Tanya[at]poi.dvo.ru)

Abstract

A modified version of the alkali metal line formation model in the sonoluminescence spectra is presented in the paper. The model is based on the hypothesis that the complex profile of lines is the result of superposition of the spectra emitted at different densities of the disturbing medium, and successfully explains all the features of the line. The behavior of the model with its varying parameters is considered. The following options of the model are considered: when approximating the line shape of a Gaussian, Lorentzian, triangular functions; for various types of dependence of density on time; considering the dependence of the intensity of metal radiation on time. Within the framework of the model, a large array of experimental spectra of Na, K, Li is processed. The authors estimate density ranges at which metals are emitted and the contribution of various radiation components to the spectra occurs. The model makes significant progress in understanding the mechanism of metal radiation in sonoluminescence.

Keywords: sonoluminescence, alkali metal atomic emission, spectral line shape.

Сонолюминесценцией (СЛ) называют слабое световое излучение, сопровождающее ультразвуковую кавитацию в жидкостях. Для объяснения СЛ наиболее приемлемой считается гипотеза «горячего пятна» («hot-spot») [1], согласно которой нелинейные пульсации парогазовых пузырьков сопровождаются формированием внутри них пиковых температур и давлений в тысячи кельвинов и сотни атмосфер. Экстремальные условия обуславливают формирование большого разнообразия возбужденных состояний частиц. Оптические спектры многопузырьковой СЛ водных растворов содержат широкий континуум, источник которого относят к тормозному излучению, излучению черного тела и молекулярной эмиссии возбужденных состояний [2]. В спектрах водных растворов соединений щелочных металлов содержатся линии, соответствующие возбужденным состояниям атомов металлов. Эти линии обладают рядом особенностей [3], [4], [5], [6]. Они состоят из асимметричной широкой компоненты с центром, сдвинутым в длинноволновую область относительно спектра в пламени. На широкую компоненту налагается узкая компонента, соответствующая линиям в пламени. Широкую компоненту объясняют плотностным уширением [7], [8], что свидетельствует об излучении из сильно сжатой газовой фазы изнутри пузырька. Происхождение узкой несмещенной компоненты, излучение которой возможно только при низкой плотности среды, порядка плотности при нормальном давлении, остается неясным.

Мы исследовали механизм формирования линий металлов при СЛ на примере D-линии Na. Мы предположили, что причиной асимметричной сдвинутой формы широкой компоненты является ее интегральный характер, когда в процессе пузырькового коллапса, происходит наложение спектров, излученных при различной плотности возмущающей среды. Эта гипотеза легла в основу простой модели [4], которая позволяет успешно симулировать форму экспериментальных спектров, объясняя все особенности профиля линий (ширину, асимметрию, сдвиг, наличие узкой компоненты). Отметим, что то обстоятельство, что излучение металлов занимает значительный диапазон плотностей, получило экспериментальное и теоретическое подтверждение [9, 10]. В данной работе приведен усовершенствованный алгоритм модели. Модель позволила оценить верхний и нижний порог плотности фазы

излучения металла, характер временной зависимости плотности в течение этой фазы и вклад узкой компоненты в излучение по форме линий щелочных металлов в экспериментальных спектрах СЛ. Подробное описание экспериментальной установки и процедуры измерения спектров изложено ранее [2], [4], [5], [7]. При разработке модели в качестве экспериментального спектра использовали линию Na в спектре многопузырьковой СЛ высокого разрешения (0.26 нм, ширина щели монохроматора 0.2 мм) водного раствора NaCl, насыщенного аргоном. Частота ультразвука составляла 22 кГц, общая поглощенная ультразвуковая мощность 40 Вт. Спектры измеряли вблизи линии Na при различных температуре 5-15 ºС, концентрации 0.5-4 М и гидростатическом давлении 1-2 атм. Существенных изменений формы D-линии Na в исследованном диапазоне экспериментальных условий замечено не было. В работе также приводятся результаты моделирования линий K, Na, Li в спектрах многопузырьковой СЛ 3 М водных растворов KCl, NaCl, LiCl, насыщенных аргоном. Спектры измеряли вблизи линий металлов для частоты 20 кГц и общей поглощенной ультразвуковой мощности 20 Вт. Линии металлов в пламени с добавлением соответствующих солей, представленные в работе для сравнения, измеряли при том же разрешении спектрометра, что и спектры СЛ. Спектры СЛ 2 М водного раствора NaCl и 5 мМ водного раствора SDS (sodium dodecyl sulfate) измеряли для частоты ультразвука 20 и 870 кГц. Общая поглощенная мощность для частоты 870 кГц составляла 5 Вт. Температура растворов поддерживалась равной 10 ºС. Все спектры измерены методом сканирования на монохроматоре МДР-23 с использованием фотоумножителя ФЭУ-79.

На рисунке 1 показаны ход радиуса и температуры для классической модели пузырька вблизи момента пика коллапса t_p, взятые из [8], а также ход плотности, вычисленный нами по кривой радиуса в допущении, что временной интервал мал для процесса массообмена пузырек-жидкость. Плотность и температура внутри пузырька сохраняют высокие значения в течение нескольких нс вблизи момента t_p (рис.1). Длительность вспышки для однопузырьковой СЛ в воде, насыщенной аргоном, составляет ~0,15 нс [11], в дегазированной воде ~1,9 нс [12]. Длительность вспышки многопузырьковой СЛ ~ 1 нс [13]. Длительность вспышки резонансной радиации Na составляет~10-70 нс [12], т.е. превышает временной интервал высокоплотной фазы коллапса. В работе [9] экспериментально показано, что свечение Na в пузырьке, образованном вспышкой лазера, зарегистрированное с применением фильтра с полосой пропускания 585-595 нм, начинается за десятки нс и проходит максимум до вспышки континуума в диапазоне 250-450 нм. Эти данные подтверждают различие временных фаз излучения континуума и металлов во время СЛ.

Оценим, исходя из приведенных на рисунке 1 зависимостей, пиковую плотность в пузырьке n_p. На конечной фазе сжатия процесс приближается к адиабатическому, температура и плотность резко возрастают. Согласно [8], для пузырька, колеблющегося в ультразвуковом поле частотой 26.5 кГц, это происходит за ~20 нс до момента t_p. Допустим, что в момент (t_p - 20) нс плотность содержимого пузырька еще близка к нормальной, т.е. n_0~1 Амг (1 Амг=$2.6868\cdot10^{19}$ см$^{-3}$). Радиус пузырька уменьшается от R_0 ~8 мкм до R_p ~0.8 мкм. Тогда из соотношения $n_p/n_0=(R_0/R_p)^3$ получаем значение n_p~1000 Амг. Отметим, что плотность воды при нормальных условиях составляет ~1240 Амг, т.е. пиковая плотность в пузырьке может приближаться к плотности жидкости.

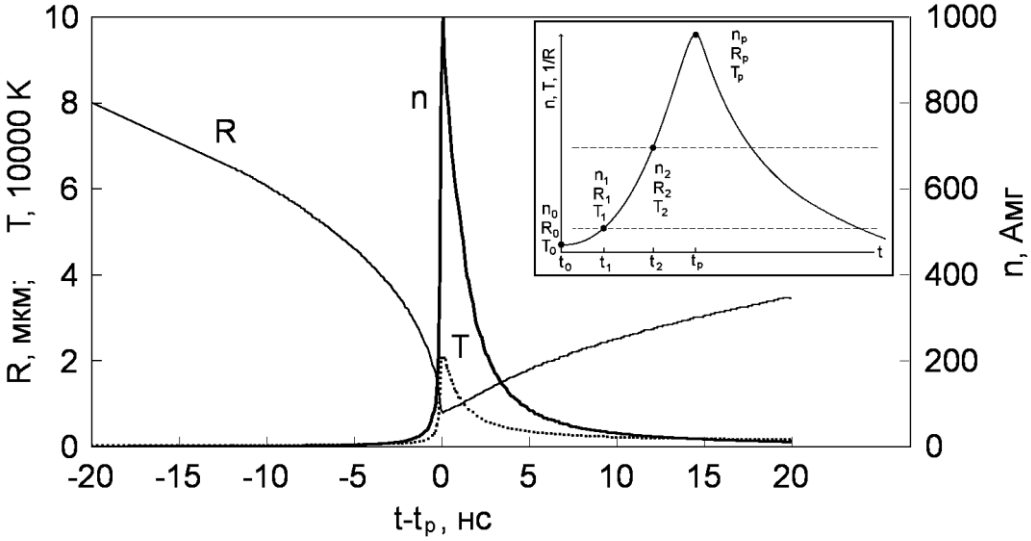


Рис. 1 – Расчетный ход радиуса R, температуры T [8] и плотности n (рассчитан по кривой R) вблизи коллапса для пузырька, подверженного колебаниям в ультразвуковом поле частотой 26.5 кГц

На врезке показана схематическая зависимость плотности n, обратного радиуса 1/R и температуры T от времени t: момент t_0 - низкая плотность, равновесный радиус, низкая температура; момент t_1 - начало свечения Na; момент t_2 - конец свечения Na; момент t_p - пиковые значения величин. Область между штриховыми линиями - зона свечения металла.

Для оценки плотности n_1, при которой металл начинает излучать, используем соотношения $T_1/T_0=(R_0/R_1)^{3(\Gamma-1)}$, $n_1/n_0=(R_0/R_1)^3$. Здесь R_1, T_1, n_1 - значения радиуса пузырька, температуры и плотности среды в момент начала эмиссии, соответственно; R_0, T_0, n_0 - их значения в некоторый момент, предшествующий адиабатическому сжатию (врезка к рис.1), Г - показатель политропы. Мы полагаем, что для смеси паров воды и аргона значение Г=1.5. Тогда плотность n_1, которая соответствует повышению температуры внутри пузырька от T_0~300 K до T_1~1400 K (положим, что это температура начала излучения), составит ~20 Амг. Допустим, что излучение Na может происходить до некоторой плотности $n_2 \leq n_p$. Заметим, что с точки зрения модели, факт высвечивания металла на фазе сжатия или расширения (до или после момента t_p) является равновероятным.

Ширина (FWHM, full width at half maximum) экспериментальной линии Na, (~3 нм, рис. 2) и коэффициент уширения γ для Na в Ar [14] позволяют оценить некоторую среднюю плотность в течение эмиссии n~125 Амг. Предложенные в [7], [15] оценки другими способами составили 60 и 70 Амг, соответственно. Давление можно оценить из известного соотношения $P=nkT$. Для T=2000 К и n=125 Амг получаем P~920 атм, что соответствует оценке пикового давления кавитации, сделанной нами ранее [7]. Заметим, что для значений γ, приведенных в [14], и n_p~1000 Амг в случае линии Na FWHM должна была составить ~22 нм, что значительно превышает ширину экспериментальной линии.

Оценка плотности прямо зависит от значений коэффициентов сдвига σ и уширения γ, которые точно не определены по следующим причинам - высокие значения плотности, для которых коэффициенты не изучались, неизвестный состав возмущающего вещества, неизвестная зависимость σ и γ от температуры. Если предположить, что Na светится в пограничном слое [16], то возмущающим веществом будет преимущественно вода. Этим можно объяснить отсутствие влияния типа насыщающего газа на ширину и сдвиг линии, отмеченное в [17], и иное, чем для аргона, отношение σ/γ, получаемое в нашей модели. Независимость формы линии от давления насыщенного пара растворителя может быть связана с тем, что в [17] исследован ряд однородных растворителей (спирты), для которых σ/γ могут быть близки, а пиковые плотности по какой-либо причине не влияют на спектр.

Согласно обзору [14], зависимость сдвига и уширения спектральных линий щелочных металлов инертными газами от плотности близка к линейной. Положение линии Λ и её полуширину S представим в виде:

$$\Lambda(n)=\Lambda_0+s\cdot\sigma\cdot n, \quad S(n)=S_0+\gamma\cdot n, \tag{1}$$

где Λ_0 и S_0 - длина волны и полуширина на полувысоте (HWHM, half width at half maximum) при плотности n_0=1 Амг, σ и γ - коэффициенты сдвига и уширения для каждой линии, соответственно, s - добавочный множитель к σ. Мы используем s в качестве параметра, для коэффициентов σ и γ мы используем значения [14].

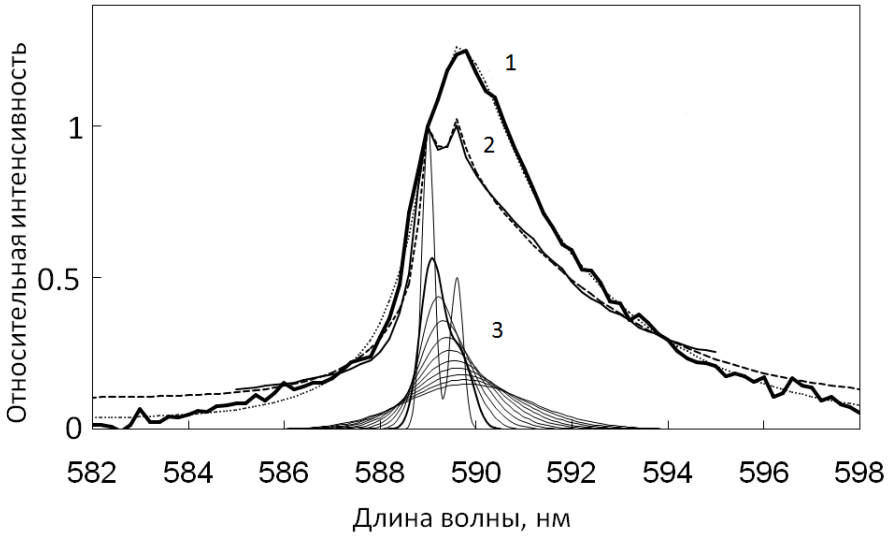


Рис. 2 – Кривые 1 и 2 – D-линии Na в экспериментальных спектрах СЛ водного раствора NaCl для частот 22 кГц (наш спектр) и 138 кГц [15] (сплошные линии) и их модели, рассчитанные по формуле (5) (пунктирные линии)

Спектры нормированы на длине волны первого компонента дублета. Параметры моделей, полученные наилучшим заполнением экспериментальной кривой, приведены в таблице 2. Семейство кривых 3 - модельные спектры, рассчитанные по формуле (2), иллюстрируют эволюцию формы линии при уширении одной плотностью с диапазоне от 0 до 100 Амг с шагом 10 Амг (нормированы по площади). Жирная линия соответствует плотности n=10 Амг

Внутри пузырька при максимальном сжатии содержится в основном аргон (86% Ar и 14% H_2O [18]), поэтому мы рассматриваем взаимодействие Na и Ar. Коэффициенты сдвига σ и полуширины γ для Na в Ar [14] сведены в таблицу 1. Эти коэффициенты определены для температуры порядка ~400-600 K, тогда как пиковая температура многопузырьковой СЛ значительно выше и имеет порядок ~2000-5000 K [19]. Кроме того, в пузырьке, кроме Na и Ar, присутствуют пары воды и продукты ее диссоциации. Однако в первом приближении можно принять, что возмущение другой частицей равно возмущению аргоном. В [15] для оценки пиковой плотности использовали коэффициент уширения линии Na в Ar $\gamma=3.31\cdot10^{-20}$ см$^{-1}$/см$^{-3}$ для T=2000 К. Это значение в 2.5 больше указанного в [14]. В нашей модели лучшее соответствие эксперименту дает использование значений коэффициента сдвига σ, приблизительно в 1.5 раза больших приведенных в [14]. Таким образом, коэффициенты сдвига и уширения, при соответствующем методическом подходе, могут быть экспериментально определены из спектров СЛ. Значение S_0 для наших экспериментальных результатов определяется инструментальной полушириной щели и составляет 0.13 нм.

Таблица 1 - Коэффициенты сдвига и полуширины линии Na в Ar. C - относительная яркость компонент дублета

№	переход Na	C	Λ_0, нм	σ, см$^{-1}$/см$^{-3}$	γ, см$^{-1}$/см$^{-3}$	σ, нм/Амг	γ, нм/Амг
1	$3s^2S_{1/2}$-$3p^2P_{3/2}$	2	589	$-7.5\cdot10^{-21}$	$1.17\cdot10^{-20}$	0.0070	0.0109
2	$3s^2S_{1/2}$-$3p^2P_{1/2}$	1	589.6	$-6.8\cdot10^{-21}$	$1.41\cdot10^{-20}$	0.0063	0.0132

Мы вычисляли форму линии для произвольной плотности возмущающей среды, используя в качестве начального спектра профиль D-линии Na в пламени. Согласно [14], в пределе растущей плотности профиль линии стремится к гауссовому, независимо от формы межатомного потенциала. Мы аппроксимировали профиль линии $G(\lambda)$ двумя гауссовыми кривыми, так как компоненты дублета в спектре пламени разрешены:

$$G(\lambda,n)=(C_1/S_1)\cdot\exp(-½(\Lambda_1-\lambda)^2/S_1^2)+(C_2/S_2)\cdot\exp(-½(\Lambda_2-\lambda)^2/S_2^2), \quad (2)$$

где C_1, C_2 - яркость компоненты; S_1, S_2 - HWHM; Λ_1, Λ_2 - длина волны для каждого компонента дублета; λ - текущее значение длины волны. Значения S и Λ зависят от плотности n, согласно формулам (1).

Подставив $S_j(n)$ и $\Lambda_j(n)$, где j=1,2 - компоненты дублета, в формулу (2) и задав плотность n от 0 до 100 Амг с шагом 10 Амг, мы получаем форму линии Na для каждого из этих значений плотности (семейство линий 3 на рисунке 2). Мы предположили здесь, что число излучающих атомов постоянно, и сила осциллятора измененной D-линии не изменяется, т.е. не изменяется площадь под каждой кривой. Из приведенной иллюстрации видно, что моделирование линии Na спектром одной плотности дает семейство профилей, которые, следуя увеличению плотности, сдвигаются в длинноволновую область. При этом дублет Na становится полностью неразрешённым уже при n=10 Амг (рис. 2).

Наша идея состояла в том, чтобы учесть изменение плотности возмущающей среды в пузырьке в течение времени высвечивания. Допуская, что ход плотности неизвестен, мы сделали его параметром модели и задали в виде

$$n(i)=n_1+(n_2-n_1)\cdot i^z, \quad (3)$$

где $0\le i\le 1$ - переменная (интегрирования), z - параметр кривизны хода плотности. Таким образом, n_1, n_2 и z являются параметрами модели. Переменная i может иметь физический смысл времени, либо координаты некоторой функции распределения, например, по размерам пузырьков или по локализации их в кавитационном облаке.

Суммарный спектр вычисляется по формуле

$$H(\lambda)=k\cdot\int_0^1 G(\lambda,n(i))di, \quad (4)$$

где k - коэффициент нормировки, спектры нормируются на длине волны Λ_0 (589 нм для Na).

Моделирование широкой компоненты спектра показало, что использование значений n_1>10 Амг даёт лучшее заполнение экспериментального спектра. Однако при этом теряется узкая компонента, которая становится неразрешенной. Ее присутствие в экспериментальных спектрах можно объяснить только вкладом спектров «низкой плотности». Для учета узкой компоненты мы вводим параметр d - добавочную долю спектра «низкой плотности». Как будет показано, d~3 %. Выражение для вычисления спектра:

$$H(\lambda)=k\cdot(d\cdot G(\lambda,0)+(1-d)\cdot\int_0^1 G(\lambda,n(i))\cdot di) \quad (5)$$

Результаты моделирования нашего спектра СЛ Na и спектра, взятого из [15], представлены на рисунке 2. Учет, в общем случае, уровня континуума спектра c в области линии металла дает окончательное выражение:

$$H(\lambda)=c+(1-c)\cdot k\cdot(d\cdot G(\lambda,0)+(1-d)\cdot\int_0^1 G(\lambda,n(i))\cdot di) \quad (6)$$

Модель дает очень хорошее воспроизведение формы линий металлов при СЛ. Рассмотрим ее свойства на примере линии Na. Ясно, что излучение при низкой плотности вносит вклад в полосу вблизи несмещенных пиков (узкая компонента спектра), тогда как излучение при высокой плотности увеличивает интенсивность спектра вдали и справа от него (широкая компонента спектра). Рассмотрим поведение модели при варьировании ее параметров. Использование добавочного множителя s~1.5 к σ хорошо воспроизводит крутой коротковолновый подъем и более плавный длинноволновый спад интенсивности широкой компоненты. При увеличении σ/γ изменяется наклон модельного спектра в точке 589 нм, а также уровень спектра слева и справа вдали от максимума. При увеличении значения n_2 поднимаются дальние крылья линии, и n_2 можно подобрать по отношению интенсивностей вдали и вблизи 589 нм. Уменьшение z при постоянном значении n_2 дает расширение профиля линии. Увеличение n_1 приводит к заметному росту интенсивности линии справа от 589 нм и смещению максимума. Для компенсации этого можно одновременно уменьшать n_2, что приводит к изменению наклона модельного спектра справа от максимума, и его форма становится более симметричной. Уменьшение n_1 (n_1<10 Амг) дает тот же эффект, что и увеличение d, т.е. увеличение вклада узкой компоненты спектра - спектра "низкой плотности". Для объяснения несмещенных пиков Na, как уже отмечалось, достаточно ~3 % вклада спектра «низкой плотности» в сумму, при этом, вследствие нормировки, существенно изменяется форма всей модельной линии. Это означает, что, если имеет место свечение Na при низкой плотности, оно занимает около 3% интенсивности или времени процесса.

Мы рассмотрели также вариант модели, когда ход плотности задается кривой $n(t)$ (рис. 1), и в котором отсутствует параметр z. Рассмотренный вариант модели на рисунках не показан, но его использование дало следующие результаты. Для лучшей симуляции профиля линии Na также требуется увеличить σ в 1.5-2 раза относительно данного [14], однако форма линии воспроизводится хуже, чем при выборе кривой $n(i)$ (3). Возможное объяснение состоит в том, что функция $n(i)$ лучше подходит для учёта динамики плотности в той фазе коллапса, когда светится Na, тогда как $n(t)$ охватывает весь коллапс. Мы рассматривали также аппроксимацию спектральной линии лоренцевой и треугольной формой. Результат моделирования давал такое же хорошее наполнение экспериментальной линии, как в случае гауссовой аппроксимации (2). Мы добавляли в модель зависимость интенсивности излучения от i, что приводило к плохой сходимости расчета. Простое "включение" (при n_1) и "выключение" (при n_2), согласно (3), дает удовлетворительную сходимость. Функцию $n(i)$ можно также восстановить из наблюдаемого спектра.

В среде MS EXCEL нами реализован интерактивный алгоритм подбора параметров модели. Для автоматического подбора параметров модели по экспериментальному спектру была создана программа на языке "фортран", использующая метод покоординатного спуска. Автоматический подбор параметров возможен с помощью опции MS EXCEL "поиск решения". Задача сводится к минимизации среднеквадратичного отклонения модельного спектра от экспериментального.

Как любая задача оптимизации, данная задача может иметь несколько решений. При моделировании мы нашли три типа решений: (1) $0<n_1<n_2$, $d>0$; (2) $0\sim n_1<n_2$, $d\sim 0$; (3) $n_1>n_2$. Наиболее приемлемым является первый тип решения. В

случае (3) n_1 может принимать очень большие значения (>1000 Амг), что не имеет физического смысла. Второй вариант отвергнут нами, поскольку в этом случае не удается представить в виде числового значения *d*.

Предложенная модель пригодна для численного разделения узкой и широкой компонент линии металла, как это отмечено в [3, 20], а также численного разделения этих компонент от излучения континуума.

В таблице 2 приведены результаты расчетов для спектров рисунков 2-4 и ряда спектров СЛ, взятых из различных источников. При расчетах из спектров вычитался уровень континуума *c*. Этот параметр в таблицах не приводится, так как эмиссия континуума не связана с эмиссией Na. Главный результат заключается в том, что свечение щелочных металлов начинается при плотностях порядка 10-20 Амг, прекращается при 200-400 Амг. Доля *d* узкой компоненты линии в спектре СЛ составляет 1-10 %. Этот параметр наиболее чувствителен к условиям эксперимента, таким как частота ультразвука, время облучения, небольшие добавки газовых примесей [20]. Кривизна хода плотности *z* имеет значения порядка 1-2. Этот результат еще раз указывает, что свечение широкой компоненты происходит на нарастающей части кривой плотности, то есть вдали от момента t_p на врезке рис. 1. Дополнительный множитель *s* к коэффициенту сдвига σ имеет значения порядка 1.5. Это может означать, что для высоких плотностей значения σ и γ могут отличаться от табличных значений.

На рисунке 3 представлены спектры СЛ 3 М водных растворов KCl, NaCl и LiCl, измеренные на частоте 20 кГц, вместе с расчетными спектрами с использованием модели. Для сравнения показаны спектры солей в пламени.

Таблица 2 – Результаты моделирования линий металлов в спектрах СЛ

Исследуемый спектр	n_1, Амг	n_2, Амг	*d*, %	*z*	*s*
22 кГц (рис. 2, спектр 1)	34.6	342	0.70	1.24	1.45
138 кГц (рис. 2, спектр 2) [15]	8.62	316	3.3	0.90	1.54
20 кГц (рис. 3, Na)	41.6	408	1.75	1.46	1.92
20 кГц (рис. 3, Li)	16.8	291	1.01	1.01	1.26
20 кГц (рис. 3, K)	7.16	153	1.35	0.85	1.44
20 кГц, (рис. 4, спектр 1)	33.9	299	1.96	1.20	1.95
20 кГц (рис. 4, спектр 2)	34.8	278	5.10	2.16	1.92
870 кГц (рис. 4, спектр 3)	1.95	273	8.20	1.09	2.42
870 кГц (рис. 4, спектр 4)	11.9	322	19.3	1.81	2.02
28 кГц, NaCl в воде [6]	15.4	402	8.4	1.27	2.00
150 кГц, NaCl в воде [6]	19.7	379	3.9	1.02	1.83
28 кГц, Na_2SO_4 в H_2SO_4 [6]	29.0	425	9.7	3.07	1.08
150 кГц, Na_2SO_4 в H_2SO_4 [6]	22.3	624	7.8	2.05	1.88
NaCl в воде [21]	6.97	380	0.06	1.39	2.39
460 кГц, NaCl в воде [22]	4.46	445	2.8	1.22	1.98
20 кГц, NaCl в воде [23]	5.39	364	4.7	0.96	2.67
28 кГц, KCl в воде [24]	16.5	265	1.67	0.85	1.43
48 кГц, KCl в воде [24]	7.65	247	3.35	1.06	1.44
115 кГц, KCl в воде [24]	6.26	303	3.51	1.15	1.38
510 кГц, KCl в воде [24]	3.56	386	3.54	1.49	1.32
1000 кГц, KCl в воде [24]	6.32	426	8.80	2.07	1.05

В спектре K явно выражена дублетная структура. Сдвиг максимумов относительно пиков в пламени составляет ~0.3 нм в красную область. FWHM каждой линии, учитывая кривизну и наклон спектра, составляет около 2.5 нм. Уширение и сдвиг линии аналогичны наблюдаемым для K в [24] для частот ультразвука 28 и 48 кГц.

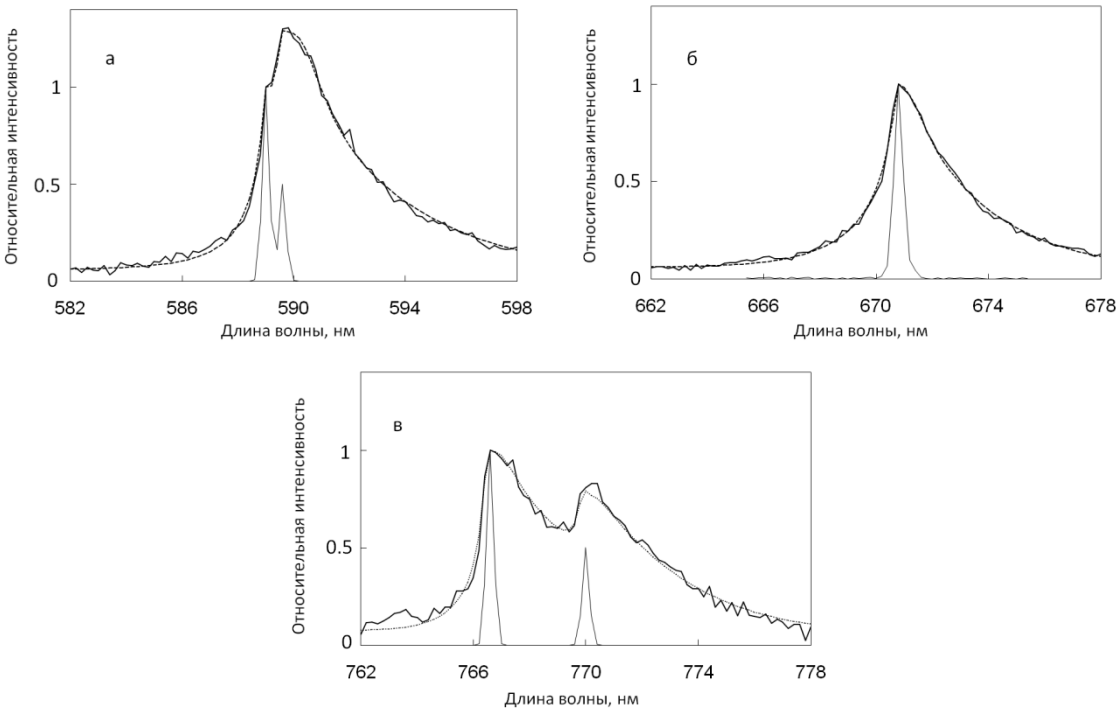


Рис. 3 – Линии металлов в экспериментальных спектрах СЛ водных растворов (а) NaCl, (б) LiCl, (в) KCl (сплошные линии) и их модели (пунктирные линии). *Параметры* моделей приведены в таблице 2. Для сравнения показаны схематические спектры солей в пламени. *Спектры* нормированы на длине волны первого компонента дублета

В спектре Na наблюдается один пик. Его смещение в красную область относительно первой линии дублета в пламени (589.0 нм) ~0.8 нм. Наблюдается слабый горб, соответствующий первому пику в пламени, но из-за его слабости сдвиг его точно указать нельзя. Учитывая, что естественное расстояние между линиями дублета равно 0.6 нм, можно заключить, что в данном случае вторая (вдвое слабая) компонента дублета (589.6 нм) накладывается на красный склон широкой полосы первой компоненты, давая пик интенсивности на 589.8 нм, смещенный на 0.2 нм. Вследствие этого относительная интенсивность максимума значительно выше единицы (1.3) тогда как для Li и K около 1.1. FWHM линии составляет ~3.6 нм. Если учесть расщепление дублета (0.6 нм), то получим 3 нм - FWHM одиночной линии при СЛ. При разных экспериментальных условиях СЛ натрия для узкой компоненты интенсивность второй линии дублета бывает как ниже, так и выше интенсивности первой линии.

В спектре лития наблюдается один пик, смещенный на 0.2 нм в красную сторону. FWHM линии составляет ~2.8 нм. Вследствие того, что компоненты дублета Li расщеплены незначительно (~0.01 нм), в спектрах пламени и СЛ, при нашем разрешении, наблюдается одна линия. Мы не нашли других опубликованных спектров СЛ высокого разрешения для Li.

Сравнивая спектры СЛ щелочных металлов, можно видеть сходство структуры широкой компоненты линий при СЛ - сдвиг максимума в красную область составляет 0.2-0.3 нм, FWHM равно 2.5-3 нм. В таблице 3 приведены оценки нижней и верней границы диапазона плотности, в пределах которого происходит высвечивание широкой компоненты линий, сделанные для спектров рисунка 3, вместе с энергией возбуждения соответствующего состояния атома металла.

Таблица 3 – Корреляция энергии возбуждения металла с плотностью среды при СЛ

Металл, переход	λ, нм (E, эВ)	n_1, Амг	n_2, Амг
Na $3s^2S$-$3p^2P$	590 (2.11)	41	415
Li $2s^2S$-$2p^2P$	671 (1.85)	16	279
K $4s^2S$-$4p^2P$	768 (1.62)	10	203

Примечательно, что с уменьшением энергии возбуждения металла диапазон его свечения двигается в сторону более низких значений плотности. Калий, имеющий наименьшую энергию возбуждения в представленном ряду, начинает светиться при более низкой плотности, т.е. на более ранних стадиях сжатия, чем литий и натрий. В процессе сжатия пузырька последовательно достигаются все более высокие температура и плотность. Возможно, что возбуждение и высвечивание щелочных металлов происходит в порядке возрастания их энергии возбуждения.

В таблице 2 приведены результаты моделирования линии K в спектре СЛ водного раствора KCl, измеренного для различных частот ультразвука, взятые из [24]. Моделирование показывает, что при повышении частоты ультразвука n_2 сдвигается в сторону более высоких значений, при этом в спектре существенно вырастает доля узкой компоненты. На частоте 1 МГц в экспериментальном и модельном спектрах K наблюдается ярко выраженный несмещенный дублет и слабо выраженная широкая компонента.

Выделение узкой компоненты линии в спектрах СЛ с увеличением частоты наблюдалась нами и для линии Na, причем эта тенденция усиливалась в растворах с поверхностно-активными свойствами (рис. 4) [5].

Мы исследовали водные растворы NaCl и додецилсульфата Na (SDS) при частотах 20 и 870 кГц. Параметры моделей для спектров приведены в таблице 2. Можно сделать вывод, что более мелкие пузырьки (на частоте 870 кГц) с более

стабильной поверхностью излучают более узкую линию. Одним из объяснений может быть ослабление широкой компоненты из-за отсутствия условий для попадания металлов в высокоплотную область внутри пузырька по механизму "microdrop injection" [1]. Возможны также иные механизмы возбуждения, например, электрический разряд [21].

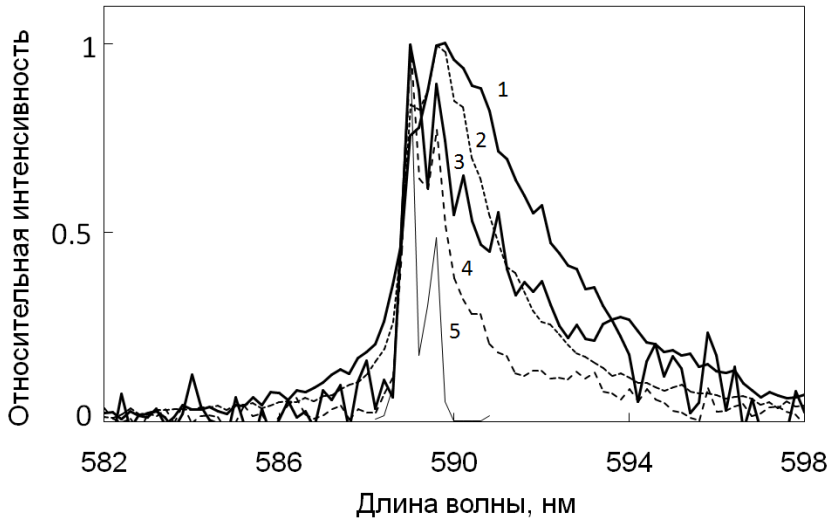


Рис.4 – Линии Na в спектрах СЛ водных растворов NaCl и SDS. (1) - NaCl, 20 кГц; (2) - SDS, 20 кГц; (3) - NaCl, 870 кГц; (4) - SDS, 870 кГц; (5) - спектр пламени с добавлением NaCl. Параметры моделей приведены в таблице 2. Спектры нормированы по максимуму интенсивности

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках госбюджетной НИР ТОИ ДВО РАН, регистрационный номер: АААА-А17-117030110031-6.

Funding

The paper presents the results of work carried out within the framework of the state budgetary research and development work of the TOI FEB RAS, registration number: AAAA-A17-117030110031-6.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Flannigan D. J. Emission from electronically excited metal atoms during single-bubble sonoluminescence / D. J. Flannigan, K. S. Suslick // Phys. Rev. Lett. – 2007. - V. 99. - P. 134301(4).

2. Didenko Y. T. Multibubble sonoluminescence spectra of water which resemble single bubble sonoluminescence / Y. T. Didenko, T. V. Gordeychuk // Phys. Rev. Lett. – 2000. - V. 84. - N. 24. - P. 5640-5643.

3. Nakajima R. Mechanism of two types of Na emission observed in sonoluminescence / R. Nakajima, Y. Hayashi, P. Choi // Japanese J. Appl. Phys. – 2015. - V. 54. – P. 07HE02

4. Казачек М. В. Одна простая модель формы D-линии Na в спектрах сонолюминесценции М. В. Казачек, Т. В. Гордейчук // Письма в ЖТФ. – 2011. - Т. 37. - № 6. - С. 39-48.

5. Гордейчук Т. В. Влияние частоты ультразвука на форму D-линии Na в спектрах сонолюминесценции водных растворов хлорида и додецилсульфата натрия / Т. В. Гордейчук, М. В. Казачек // Письма в ЖТФ. – 2014. - Т. 40. - № 23. - С. 31-40.

6. Hatanaka S. Sonoluminescence of alkali-metal atoms in sulfuric acid: comparison with that in water / S. Hatanaka, S. Hayashi, P. K. Choi // Jap. J. Appl. Phys. – 2010. - V. 49. – P. 07HE01.

7. Казачек М. В. Оценка пикового давления кавитации по структуре D-линии Na в спектрах сонолюминесценции / М. В. Казачек, Т. В. Гордейчук // Письма в ЖТФ. – 2009. - Т. 35. - № 4. - С. 87-94.

8. Brenner M. P. Single-bubble sonoluminescence / M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse // Rev. Mod. Phys. – 2002. - V. 74. - P. 425-484.

9. Chu H. C. Precursor luminescence near the collapse of laser-induced bubbles in alkali-salt solutions / H. C. Chu, S. Vo, G. A. Williams // Phys. Rev. Lett. – 2009. - V. 102. - P. 204301.

10. An Yu. Diagnosing temperature change inside sonoluminescing bubbles by calculating line spectra / Yu. An, Ch. Li // Phys. Rev. E. – 2009. - V. 80. - P. 046320

11. Gompf B. Resolving sonoluminescence pulse width with time-correlated single photon counting / B. Gompf, R. Gunther, G. Nick and others // Phys. Rev. Lett. – 1997. - V. 79. - P. 1405-1408.

12. Giri A. Measured pulse width of sonoluminescence flashes in the form of resonance radiation / A. Giri, V. H. Arakeri // Phys. Rev. E. – 1998. - V. 58. - N. 3. – P. R2713.

13. Matula T. J. Optical pulse width measurements of sonoluminescence in cavitation-bubble fields / T. J. Matula, R. A. Roy, P. D. Mourad // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. - V. 101. - N. 4. - P. 1994-2002.

14. Allard N. The effect of neutral nonresonant collisions on atomic spectral lines / N. Allard, J. Kielkopf // Rev. Mod. Phys. – 1982. - V. 54. - P. 1103-1182.

15. Choi P. K. Hayashi Y. Sonoluminescence of Na atom from NaCl solutions doped with ethanol / P. K. Choi, S. Abe, // J. Phys. Chem. B. – 2008. - V. 112. - P. 918-922.

16. Гордейчук Т. В. Экспериментальное наблюдение интенсивного роста сонолюминесценции металлов под влиянием давления и температуры / Т. В. Гордейчук, М. В. Казачек // Оптика и спектроскопия. – 2009 - Т. 106. № 2. – С. 274-277

17. Flint E. B. Sonoluminescence from alkali-metal salt solutions / E. B. Flint, K. S. Suslick // J. Phys. Chem. – 1991. - V. 95. - P. 1484-1488.

18. Storey B. D. Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry / B. D. Storey, A. J. Szeri // Proc. R. Soc. London. Ser. A. – 2000. - V. 456. - P. 1685-1709.

19. Didenko Y. T. Effect of noble gases on sonoluminescence temperatures during multibubble cavitation / Y. T. Didenko, III W. B. McNamara, K. S. Suslick // Phys. Rev. Lett. – 2000. - V. 84. - N. 4. - P. 777-780.

20. Hayashi Y. Two components of Na emission in sonoluminescence spectrum from surfactant aqueous solutions / Y. Hayashi, P. K. Choi // Ultrason. Sonochem. – 2015. - V. 23. - P. 333-338.

21. Маргулис М. А. Сонолюминесценция / М. А. Маргулис // УФН. – 2000. - Т. 170. - № 3. - С. 263-287.

22. Sehgal C. Sonoluminescence of argon saturated alkali metal salt solutions as a probe of acoustic cavitation . C. Sehgal, R. P. Steer, R. G. Sutherland, R. E. Verrall // J. Chem. Phys. – 1979 - V. 70 - P. 2242-2248.

23. Zhan C. An experiment on multibubble sonoluminescence spectra in sodium chloride solution / C. Zhan, X. JunFeng, H. Wei and others // Chin. Sci. Bull. - 2008. - V. 53. - N. 10. - P. 1468-1472.

24. Abe S., Choi P.-K. Effect of frequency on sonoluminescence spectrum from alkali-metal solutions // AIP Conf. Proc. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, ISNA18. - 2008. - P. 189-192.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Flannigan D. J. Emission from electronically excited metal atoms during single-bubble sonoluminescence / D. J. Flannigan, K. S. Suslick // Phys. Rev. Lett. – 2007. - V. 99. - P. 134301(4).

2. Didenko Y. T. Multibubble sonoluminescence spectra of water which resemble single bubble sonoluminescence / Y. T. Didenko, T. V. Gordeychuk // Phys. Rev. Lett. – 2000. - V. 84. - N. 24. - P. 5640-5643.

3. Nakajima R. Mechanism of two types of Na emission observed in sonoluminescence / R. Nakajima, Y. Hayashi, P. Choi // Japanese J. Appl. Phys. – 2015. - V. 54. – P. 07HE02

4. Kazachek M. V., Gordeychuk T. V. Simple model of Na D- line shape in sonoluminescence spectra // Tech. Phys. Let. - 2011. - V. 37. - Is. 3. - P. 262-266.

5. Gordeychuk T. V., Kazachek M. V. The influence of ultrasound frequency on the shape of the D-Line of Na in the sonoluminescence spectra of aqueous solutions of sodium chloride and sodium dodecylsulfate // Tech. Phys. Let. - 2014. - V. 40. - Is. 12. - P. 1052-1056.

6. Hatanaka S. Sonoluminescence of alkali-metal atoms in sulfuric acid: comparison with that in water / S. Hatanaka, S. Hayashi, P. K. Choi // Jap. J. Appl. Phys. – 2010. - V. 49. – P. 07HE01.

7. Gordeychuk T. V., Kazachek M. V. Estimation of the cavitation peak pressure using the Na D -line structure in the sonoluminescence spectra// Tech. Phys. Let. - 2011. - V. 37. - Is. 3. - P. 262-266.

8. Brenner M. P. Single-bubble sonoluminescence / M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse // Rev. Mod. Phys. – 2002. - V. 74. - P. 425-484.

9. Chu H. C. Precursor luminescence near the collapse of laser-induced bubbles in alkali-salt solutions / H. C. Chu, S. Vo, G. A. Williams // Phys. Rev. Lett. – 2009. - V. 102. - P. 204301.

10. An Yu. Diagnosing temperature change inside sonoluminescing bubbles by calculating line spectra / Yu. An, Ch. Li // Phys. Rev. E. – 2009. - V. 80. - P. 046320

11. Gompf B. Resolving sonoluminescence pulse width with time-correlated single photon counting / B. Gompf, R. Gunther, G. Nick and others // Phys. Rev. Lett. – 1997. - V. 79. - P. 1405-1408.

12. Giri A. Measured pulse width of sonoluminescence flashes in the form of resonance radiation / A. Giri, V. H. Arakeri // Phys. Rev. E. – 1998. - V. 58. - N. 3. – P. R2713.

13. Matula T. J. Optical pulse width measurements of sonoluminescence in cavitation-bubble fields / T. J. Matula, R. A. Roy, P. D. Mourad // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. - V. 101. - N. 4. - P. 1994-2002.

14. Allard N. The effect of neutral nonresonant collisions on atomic spectral lines / N. Allard, J. Kielkopf // Rev. Mod. Phys. – 1982. - V. 54. - P. 1103-1182.

15. Choi P. K. Hayashi Y. Sonoluminescence of Na atom from NaCl solutions doped with ethanol / P. K. Choi, S. Abe, // J. Phys. Chem. B. – 2008. - V. 112. - P. 918-922.

16. Gordeychuk T. V., Kazachek M. V. Experimental Observation of the Intense Enhancement of Metal Sonoluminescence under Pressure and Temperature // *Optics and Spectroscopy*. - 2009. - V. 106. - Is. 2. - P. 238-241.

17. Flint E. B. Sonoluminescence from alkali-metal salt solutions / E. B. Flint, K. S. Suslick // J. Phys. Chem. – 1991. - V. 95. - P. 1484-1488.

18. Storey B. D. Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry / B. D. Storey, A. J. Szeri // Proc. R. Soc. London. Ser. A. – 2000. - V. 456. - P. 1685-1709.

19. Didenko Y. T. Effect of noble gases on sonoluminescence temperatures during multibubble cavitation / Y. T. Didenko, III W. B. McNamara, K. S. Suslick // Phys. Rev. Lett. – 2000. - V. 84. - N. 4. - P. 777-780.

20. Hayashi Y. Two components of Na emission in sonoluminescence spectrum from surfactant aqueous solutions / Y. Hayashi, P. K. Choi // Ultrason. Sonochem. – 2015. - V. 23. - P. 333-338.

21. Маргулис М. А. Сонолюминесценция / М. А. Маргулис // УФН. – 2000. - Т. 170. - № 3. - С. 263-287.

22. Sehgal C. Sonoluminescence of argon saturated alkali metal salt solutions as a probe of acoustic cavitation . C. Sehgal, R. P. Steer, R. G. Sutherland, R. E. Verrall // J. Chem. Phys. – 1979 - V. 70 - P. 2242-2248.

23. Zhan C. An experiment on multibubble sonoluminescence spectra in sodium chloride solution / C. Zhan, X. JunFeng, H. Wei and others // Chin. Sci. Bull. - 2008. - V. 53. - N. 10. - P. 1468-1472.

24. Abe S., Choi P.-K. Effect of frequency on sonoluminescence spectrum from alkali-metal solutions // AIP Conf. Proc. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, ISNA18. - 2008. - P. 189-192.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.004

О МЕТРИЧЕСКОЙ СВЯЗНОСТИ ЛЕВИ-ЧИВИТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОСКОСТЕЙ

Научная статья

Омельян О.М.*
ORCID 0000-0003-4359-1376,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

* Корреспондирующий автор (olga_omelyan2002[at]mail.ru)

Аннотация

В n-мерном проективном пространстве исследуется распределение m-мерных плоскостей с заданным метрическим тензором. Рассматривается объект касательной связности и показывается, что аффинная распределенная связность может являться обобщенной связностью Леви-Чивита в случае голономного распределения и в случае полунормализованного 1-го рода распределения с соответствующей адаптацией репера. Доказывается, что подобъект касательной распределенной связности также может быть охвачен полем метрического тензора, но лишь в адаптированном репере.

Ключевые слова: распределение, репер, проективное пространство, метрический тензор, объект связности, обобщенная связность Леви-Чивита, охват.

ON LEVY-CHIVITA METRIC CONNECTIVITY ON DISTRIBUTION OF PLANES

Research article

Omelyan O.M.*
ORCID 0000-0003-4359-1376,
I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

* Corresponding author (olga_omelyan2002[at]mail.ru)

Abstract

In n-dimensional projective space, the distribution of m-dimensional planes with a given metric tensor is investigated in the paper. The object of tangent connection is considered, and it is shown that the affine distributed connection can be generalized with a Levi-Civita connection in the case of a holonomic distribution and in the case of a semi-normalized distribution of the 1st kind with the corresponding adaptation of the frame. It is proved that the subobject of the tangent distributed connection can also be covered by the field of the metric tensor, but only in the adapter frame.

Keywords: distribution, frame, projective space, metric tensor, connected object, generalized Levi-Civita connection, coverage.

В проективном пространстве P_n рассмотрим распределение NS_n^g m-мерных плоскостей P_m с заданным метрическим тензором g. На распределении плоскостей рассмотрим касательную распределенную связность с объектом $\{\Gamma^i_{jk}, \Gamma^i_{ja}\}$, компоненты которого удовлетворяют сравнениям [1, С.179] по модулю базисных форм $\{\omega^i, \omega^a\}$. Эта связность содержит аффинную связность с подобъектом Γ^i_{jk}, обобщающую классическую аффинную связность без кручения на поверхности.

Возникает вопрос: может ли касательная распределенная связность быть связностью Леви-Чивита, то есть существует ли охват компонент объекта касательной связности с помощью метрического тензора g и его пфаффовых производных? Следует отметить, что компоненты g_{ij} дважды ковариантного тензора g удовлетворяют условиям

$$\Delta g_{ij} = g_{ijK}\omega^K;\ g_{ij} = g_{ji},\ \ g_{ijK} = g_{jiK},\ \ \det(g_{ij}) \neq 0. \tag{1}$$

Продолжая уравнения (1), получим сравнения для пфаффовых производных компонент метрического тензора g по модулю базисных форм ω^I

$$\Delta g_{ijk} - g_{il}\omega^l_{jk} - g_{lj}\omega^l_{ik} \equiv 0, \quad \Delta g_{ija} - g_{ijk}\omega^k_a - g_{ik}\omega^k_{ja} - g_{kj}\omega^k_{ia} \equiv 0. \tag{2}$$

Пусть компоненты объекта аффинной связности симметричны, то есть кручение $S^i_{jk} = \Gamma^i_{[jk]} = 0.$ В этом случае из сравнений [1, С. 180] для компонент объекта аффинной связности естественно предположить, что трехиндексные формы ω^i_{jk} симметричны по нижним индексам, то есть $\Lambda^a_{[jk]} = 0,$ а значит распределение является голономным, либо $\omega^i_a \equiv 0.$ Проциклируем сравнения (2_1) для пфаффовых производных g_{ijk} по индексам i, j, k

$$\Delta g_{ijk} - g_{il}\omega^l_{jk} - g_{lj}\omega^l_{ik} \equiv 0,\ \Delta g_{jki} - g_{jl}\omega^l_{ki} - g_{lk}\omega^l_{ji} \equiv 0,\ \Delta g_{kij} - g_{kl}\omega^l_{ij} - g_{li}\omega^l_{kj} \equiv 0. \tag{3}$$

В систему (3) подставим выражения трехиндексных форм из [1] и, учитывая симметрию метрического тензора, вычтем последнее сравнение из суммы двух первых

$$\Delta[g_{ijk}+g_{jki}-g_{kij}+g_{il}(\Gamma^l_{jk}-\Gamma^l_{kj})+g_{jl}(\Gamma^l_{ik}+\Gamma^l_{ki})+g_{kl}(\Gamma^l_{ji}-\Gamma^l_{ij})]\equiv 0.$$

Следовательно, можно положить

$$g_{ijk}+g_{jki}-g_{kij}+g_{il}(\Gamma^l_{jk}-\Gamma^l_{kj})+g_{jl}(\Gamma^l_{ik}+\Gamma^l_{ki})+g_{kl}(\Gamma^l_{ji}-\Gamma^l_{ij})=0. \quad (4)$$

Будем рассматривать голономное распределение S^g_n. С учетом симметрии компонент аффинной распределенной связности по нижним индексам $\Gamma^i_{jk}=\Gamma^i_{kj}$ получаем, что (4) преобразуется к виду:

$g_{ijk}+g_{jki}-g_{kij}+2g_{jl}\Gamma^l_{ik}=0,$

Откуда $g_{jl}\Gamma^l_{ik}=\frac{1}{2}(g_{kij}-g_{ijk}-g_{jki}).$

Меняя индексы соответствующим образом и учитывая, что у метрического тензора g_{ij} существует обратный тензор g^{ij}, связанный с ним следующим соотношением, получаем

$$g_{ij}g^{jk}=\delta^k_i, \quad \overline{\Gamma}^i_{jk}=\frac{1}{2}g^{il}(g_{kjl}-g_{jlk}-g_{lkj}). \quad (5)$$

Замечание 1

При выводе формулы (5) *мы использовали условие симметрии форм* ω^i_{jk}, *а не условие голономности распределения* $\Lambda^a_{[jk]}=0,$ *из которого автоматически вытекает симметрия форм* ω^i_{jk}. *Следовательно, формула* (5) *справедлива лишь при условии, что формы* ω^i_{jk} *симметричны по нижним индексам.*

Формулу (5) также можно получить при адаптации репера нормализации 1-го рода неголономного распределения NS^g_n. Для этого запишем деривационную формулу репера для точек $A_a\in P_n$ в виде:

$$dA_a=\theta A_a+\omega_a A+\omega^i_a A_i+\omega^b_a A_b. \quad (6)$$

Произведем оснащение распределения NS^g_n: к каждой точке A присоединим плоскость дополнительной размерности P_{n-m} – нормаль 1-го рода. Получим полунормализованное 1-го рода распределение ${}^1NS^g_n$. Поместим точки A_a в плоскость P_{n-m}. Тогда из уравнений (6) видно, что если $\omega^i_a\equiv 0,$ то

$$dA_a\equiv\omega_a A+(\ldots)^b_a A_b,$$

то есть сравнения $\omega^i_a\equiv 0$ являются условиями относительной инвариантности плоскости $P_{n-m}=[A,A_a]$. Выражения для трехиндексных форм в репере, адаптированном нормализации 1-го рода, принимают вид:

$$\omega^i_{jk}=-\delta^i_j\omega_k-\delta^i_k\omega_j, \quad \omega^i_{ja}=-\delta^i_j\omega_a. \quad (7)$$

Тогда обращаясь к системе (3) и используя равенство $\omega^i_{jk}=\omega^i_{kj}$, вытекающее и выражений (7) для трехиндексных форм, можно получить очевидное сравнение

$$\Delta(g_{ijk}+g_{jki}-g_{kij})-2g_{jl}\omega^l_{ik}\equiv 0.$$

Подставляя в эти сравнения выражения для трехиндексных форм из [1], получаем равенство (4), откуда следует формула (5).

Теорема 1

Аффинная связность с подобъектом $\overline{\Gamma}^i_{jk}$, *компоненты которого определяются по формуле* (5), *является обобщенной связностью Леви-Чивита на голономном распределении* S^g_n *и на полунормализованном 1-го рода неголономном распределении* ${}^1NS^g_n$.

Замечание 2

Объект Γ^i_{jk} *охвачен с помощью метрического тензора* g *и его пфаффовых производных по формуле* (5), *совпадающей с формулой, определяющей связность Леви-Чивита на поверхности.*

Предположим, что компоненты объекта линейной подсвязности несимметричны, то есть кручение $S=\{S^i_{jk}\}\neq 0.$ Так как любую двухиндексную величину можно представить в виде суммы симметричной и антисимметричной частей, то

$$\Gamma^i_{jk}=\Gamma^i_{(jk)}+S^i_{jk}. \quad (8)$$

Подставляя равенства (8) в (4), получим

$$\Gamma^i_{(jk)}=\frac{1}{2}g^{il}(g_{kjl}-g_{jlk}-g_{lkj}-2g_{jm}S^m_{lk}-2g_{km}S^m_{lj}).$$

Используя формулу (8), имеем

$$\widehat{\Gamma}^i_{jk} = \frac{1}{2} g^{il}(g_{kjl} - g_{jlk} - g_{lkj} - 2g_{jm}S^m_{lk} - 2g_{km}S^m_{lj}) + S^i_{jk}. \quad (9)$$

Теорема 2

На неголономном распределении NS^g_n *аффинная связность с подобъектом* $\widehat{\Gamma}^i_{jk}$, *компоненты которого определяются формулой* (9)*, порождается полем метрического тензора* g *и объектом кручения* S.

Замечание 3

Из формулы (9) *следует формула* (5) *при условии, что S=0.*

Обратимся теперь к подобъекту Γ^i_{ja} касательной распределенной связности. В адаптированном нормализации 1-го рода репере, уравнения [1, С. 179] упрощаются

$$\Delta\Gamma^i_{ja} + \omega^i_{ja} \equiv 0. \quad (2.15.14)$$

Сравнения (3_2) для пфаффовых производных g_{ija} метрического тензора принимают вид:

$$\Delta g_{ija} - g_{ik}\omega^k_{ja} - g_{kj}\omega^k_{ia} \equiv 0. \quad (10)$$

Свернем сравнение (10) с тензором $\{-\frac{1}{2}g^{ij}\}$, в результате получим

$$-\frac{1}{2}\Delta(g_{ija}g^{ij}) + \omega^k_{ka} = 0.$$

Так как

$$\Delta\Gamma^k_{ka} \equiv -\omega^k_{ka},$$

то

$$\Delta(\Gamma^k_{ka} + \frac{1}{2}g_{ija}g^{ij}) \equiv 0.$$

Следовательно, можно положить $\Gamma^i_{ia} = -\frac{1}{2}g_{jka}g^{jk}$. Введем обозначение $\Gamma_a = \Gamma^i_{ia}$, тогда с учетом (7_2) $\Gamma^i_{ja} = \frac{1}{m}\delta^i_j\Gamma_a$, то есть.

$$\widetilde{\Gamma}^i_{ja} = -\frac{1}{2m}\delta^i_j g_{lka}g^{lk}. \quad (11)$$

Теорема 3

На полунормализованном 1-го рода распределении ${}^1NS^g_n$ *в адаптированном репере существует порожденная полем метрического тензора касательная распределенная подсвязность с подобъектом* $\widetilde{\Gamma}^i_{ja}$, *компоненты которого определяются по формуле* (11).

Установим принципиальное различие понятий обобщенной связности Леви-Чивита и индуцированной связности. При исследовании распределения плоскостей обнаружилось 2 способа определения касательной распределенной связности с объектом $\{\Gamma^i_{jk}, \Gamma^i_{ja}\}$:

1. индуцирование связности оснащающим квазитензором λ [2, С. 64];
2. порождение связности метрическим тензором g.

Возникает очевидный вопрос: существует ли связь между этими двумя способами определения связности? Запишем выражения объекта касательной распределенной связности Γ с помощью оснащающего квазитензора λ

$$\hat{\Gamma}^i_{jk} = \Lambda^a_{jk}\lambda^i_a - \delta^i_j\lambda_k - \delta^i_k\lambda_j, \ \hat{\Gamma}^i_{ja} = \Lambda^b_{ja}\lambda^i_b - \delta^i_j\lambda_a + \delta^i_j\lambda_k\lambda^k_a + \lambda^i_a\lambda_j, \quad (12)$$

причем сравнения для компонент оснащающего квазитензора λ имеют вид [2, С. 64]. Для того чтобы найти зависимость между g и λ, мы в соответствии с условиями пунктов 3–5, рассмотренных выше, приравняем правые части выражений охватов для объекта связности Γ. Во-первых, приравняем (12) и (5)

$$2\delta^i_{(j}\lambda_{k)} = \Lambda^a_{jk}\lambda^i_a - \frac{1}{2}g^{il}(g_{kjl} - g_{jlk} - g_{lkj}). \quad (13)$$

Свернем выражения (13) по индексам i и j

$$\lambda_k = \frac{1}{m+1}(\Lambda^a_{ik}\lambda^i_a - \frac{1}{2}g^{il}(g_{kil} - g_{ilk} - g_{lki})). \quad (14)$$

Теорема 4

Если индуцированная аффинная связность 1-го типа $\hat{\Gamma}^i_{jk}$ *совпадает с обобщенной связностью Леви-Чивита* $\overline{\Gamma}^i_{jk}$ *голономного распределения* S^g_n *и полунормализованного 1-го рода распределения* ${}^1NS^g_n$, *то оснащающий*

подквазитензор λ_k *является функцией* (14)*, то есть нормализация 1-го рода распределений* S_n^g *и* ${}^1NS_n^g$ *порождает нормализацию 2-го рода.*

Во-вторых, приравняем (12) и (9)

$$2\delta^i_{(j}\lambda_{k)} = \Lambda^a_{jk}\lambda^i_a - \frac{1}{2}g^{il}(g_{kjl} - g_{jlk} - g_{lkj} - 2g_{jm}S^m_{lk} - 2g_{km}S^m_{lj}) - S^i_{jk}. \quad (15)$$

Сворачивая выражения (15) по индексам i и j, получаем

$$\lambda_k = \frac{1}{m+1}[\Lambda^a_{ik}\lambda^i_a - \frac{1}{2}g^{il}(g_{kil} - g_{ilk} - g_{lki} - 2g_{im}S^m_{lk} - 2g_{km}S^m_{li}) - S^i_{ik}]. \quad (16)$$

Теорема 5

Если индуцированная аффинная связность 1-го типа $\hat{\Gamma}^i_{jk}$ *совпадает со связностью* $\widehat{\Gamma}^i_{jk}$*, порождаемой полем метрического тензора и объектом кручения неголономного распределения* NS_n^g*, то оснащающий подквазитензор* λ_k *является функцией* (16)*, то есть нормализация 1-го рода и объект кручения распределения* NS_n^g *порождают нормализацию 2-го рода.*

И наконец, приравняем (12) и (11), получим

$$\delta^i_j\lambda_a = \frac{1}{2m}\delta^i_j g_{lka}g^{lk}. \quad (17)$$

Свернем (17) по i и j

$$\lambda_a = \frac{1}{2m}g_{lka}g^{lk}. \quad (18)$$

Теорема 6

Если индуцированная касательная подсвязность 1-го типа $\hat{\Gamma}^i_{ja}$ *совпадает с обобщенной связностью Леви-Чивита* $\widetilde{\Gamma}^i_{ja}$ *полунормализованного распределения* ${}^1NS_n^g$*, то оснащающий подквазитензор* λ_a *является функцией* (18)*, то есть метрика распределения* ${}^1NS_n^g$ *порождает оснащение Картана, подчиненное нормализации 1-го рода.*

Вывод

Итак, в общем случае формулы (14, 16, 18) не имеют места, поэтому определение касательной распределенной связности с объектом $\{\Gamma^i_{jk}, \Gamma^i_{ja}\}$ на распределении NS_n с помощью оснащающего квазитензора λ, либо с помощью метрического тензора g есть два разных способа задания связности. В первом случае говорят об индуцированной связности 1-го типа, а во втором случае будем говорить об обобщенной связности Леви-Чивита.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы/ References

1. Омельян О. М. Об объекте кривизны групповой связности на распределении плоскостей / О. М. Омельян // Тр. мат. центра им. Н.И. Лобачевского. –Казань, 2002. –Т. 18. – С. 69.

2. Омельян О. М. Понятие связности Леви-Чивиты, обобщенное на распределение плоскостей / О. М. Омельян // Тр. мат центра им. Н.И. Лобачевского. – Казань, 2003. –Т. 21. – С. 179 - 180.

3. Омельян О. М. Четыре индуцированных связности на распределении плоскостей / О. М. Омельян // Тр. межд. конф. по геометрии и анализу. – Пенза, 2003. – С. 63 - 69.

4. Омельян О. М. Обобщение связности Леви-Чивита на распределение плоскостей / О. М. Омельян // Диф. геом. многообр. фигур. –Калининград, 2004. –№ 35. –С. 105 – 113.

5. Омельян О. М. Теоретико-категорный подход, естественно расширяющий фундаментальное понятие связности, и его приложение к геометрии дифференциальных систем / О. М. Омельян, Л. Е. Евтушик // Фундаментальная и прикладная математика. – Москва, 2010. – Т. 16.– Вып.1. – С. 55 – 63.

6. Омельян О. М. О совпадении групповых связностей, индуцированных внутренним композиционным оснащением распределения / О. М. Омельян // Матем. заметки. – Москва, 2017. Т. 102:6. – С. 896–907.

7. Евтушик Л. Е. Дифференциально-геометрические структуры на многообразиях / Л. Е. Евтушик, Ю. Г. Лумисте, Н. М. Остиану и др. // Пробл. геом. / ВИНИТИ. — М., 1979. — Т. 9. — С. 5 – 247.

8. Лаптев Г. Ф. Распределения касательных элементов / Г. Ф. Лаптев // Пробл. геом. / ВИНИТИ. – М., 1971. – Т. 3. – С. 29 – 48.

9. Лаптев Г. Ф. Распределения m-мерных линейных элементов в пространстве проективной связности. I / Г. Ф. Лаптев, Н. М. Остиану // Тр. геом. семин./ ВИНИТИ. —М., 1971. — Т. 3. — С. 49 – 94.

10. Остиану Н. М. Распределения m-мерных линейных элементов в пространстве проективной связности. II / Н. М Остиану // Тр. геом. семин. / ВИНИТИ. – М., 1971. –Т. 3. – С. 95 – 114.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Omelyan O. M. Ob ob"ekte krivizny gruppovoj svyaznosti na raspredelenii ploskostej [About the object of curvature of group connection on the distribution of planes] / O. M. Omelyan / / Proc. of Mat center. of Lobachevsky. - Kazan, 2002. - Vol. 18. – P.69. [in Russian]

2. Omelyan O. M. Ponyatie svyaznosti Levi-CHivity, obobshchennoe na raspredelenie ploskostej [The concept of Levi-Civita connection of generalized to the distribution of planes] / O. M. Omelyan // Proc. of Mat center. of Lobachevsky. - Kazan, 2003. - Vol. 21. – P. 179 - 180. [in Russian]

3. Omelyan O.M. CHetyre inducirovannyh svyaznosti na raspredelenii ploskostej [Four induced connections on the distribution of planes] / O. M. Omelyan // Proc. intl. conf. geometry and analysis. - Penza, 2003. – P. 63 - 69. [in Russian]

4. Omelyan O. M. Obobshchenie svyaznosti Levi-CHivita na raspredelenie ploskostej [Generalization of Levi-Civita connection to the distribution of planes] / O. M. Omelyan // Dif. geom. Manifolds of figures – Kaliningrad, 2004. – № 35. –P. 105 – 113. [in Russian]

5. Omelyan O. M. eoretiko-kategornyj podhod, estestvenno rasshiryayushchij fundamental'noe ponyatie svyaznosti, i ego prilozhenie k geometrii differencial'nyh system [Theoretical and categorical approach, naturally extending the fundamental concept of connection, and its application to the geometry of differential systems] / O. M. Omelyan, L. E. Evtushik // Fundamental and applied mathematics. - Moscow, 2010. - Vol. 16.– No.1. – P. 55 – 63. [in Russian]

6. Omelyan O. M. O sovpadenii gruppovyh svyaznostej, inducirovannyh vnutrennim kompozicionnym osnashcheniem raspredeleniya [On the Coincidence of Group Connections Induced by an Intrinsic Composite Equipment of a Distribution] / O. M. Omelyan // Journal of Mathematical Sciences. New York. Vol. 102. No. 6. P. 896 – 907. [in English]

7. Evtushik L. E. Differencial'no-geometricheskie struktury na mnogoobraziyah [Differential-geometric structures on manifolds] / L. E. Evtushik, U. G. Lumiste, N. M. Ostianu, A. P. Shirokov // Problems. geom. / VINITI. — M., 1979. — V. 9. — Page 5 – 247. [in Russian]

8. Laptev G. F. Raspredeleniya kasatel'nyh ehlementov [The distribution of tangent elements] / G. Laptev / // Problems. geom. / VINITI. - M., 1971. - Vol. 3. – P. 29 – 48. [in Russian]

9. Laptev G. F. Raspredeleniya m-mernyh linejnyh ehlementov v prostranstve proektivnoj svyaznosti [Distribution of m-dimensional linear elements in the space of projective connection II] / G. F. Laptev, N. M. Ostianu / / Tr. geom. seminar./ VINITI. – M., 1971. – Vol.3. – P. 49 – 94. [in Russian]

10. Ostianu N. M. Raspredeleniya m-mernyh linejnyh ehlementov v prostranstve proektivnoj svyaznosti. II [Distribution of m-dimensional linear elements in the space of projective connection. II] / N.M Ostiano // Proc. geom. seminar. / VINITI. - M., 1971. - Vol. 3. – S. 95 – 114. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.005

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СВЕРХЗВУКОВОЙ АТМОСФЕРНО-ВАКУУМНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Научная статья

Прокопенко Е.А.[1, *], Савищенко Н.П.[2], Шевченко А.В.[3], Поняев С.А.[4], Твердохлебов К.В.[5], Яшков С.А.[6]

[1] ORCID: 0000-0002-3574-3846,

[1, 2, 3, 6] Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, Россия;

[4, 5] Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

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

Аннотация

В настоящее время экспериментальные исследования сверхзвуковых течений проводятся на сложных экспериментальных установках, таких как аэродинамические и ударные трубы. Для исследования сверхзвуковых течений с числами Маха меньше 4 возможно использование вакуумных аэродинамических труб. В статье приводятся результаты исследования процессов, происходящих в вакуумной аэродинамической трубе при пуске. Анализ полученных результатов показал, что реализуемый в трубе стационарный режим сверхзвукового течения имеет продолжительность около 3 секунд, что подтверждается представленными в работе теневыми картинами течения. Это обстоятельство позволяет использовать имеющуюся атмосферно-вакуумную трубу для исследования аэродинамических характеристик летательных аппаратов при числах Маха от 1,5 до 4.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, экспериментальные исследования, сверхзвуковой поток.

FEATURES OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON SUPERSONIC ATMOSPHERIC VACUUM DRIVEN TUNNEL

Research article

Prokopenko E.A.[1, *], Savischenko N.P.[2], Shevchenko A.V.[3], Ponyaev S.A.[4], Tverdokhlebov K.V.[5], Yashkov S.A.[6]

[1] ORCID: 0000-0002-3574-3846,

[1, 2, 3, 6] Mozhaysky's Military-Space Academy, St. Petersburg, Russia;

[4, 5] The Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

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

Abstract

At present, experimental studies of supersonic currents are carried out on complex experimental installations, such as vacuum driven tunnels and shock tubes. It is possible to use vacuum driven tunnels to study supersonic currents with Mach numbers that are less than 4. The article presents the results of research of processes occurring in a vacuum driven tunnel at startup. The analysis of the results showed that the stationary mode of supersonic currents realized in the tunnel has a duration of about 3 seconds, which is confirmed by the shadow current patterns presented in the work. This circumstance allows using available atmospheric and vacuum driven tunnel to study the aerodynamic characteristics of aircraft in Mach numbers from 1.5 to 4.

Keywords: vacuum driven tunnel, experimental studies, supersonic current.

Введение

Несмотря на активное развитие вычислительного эксперимента и численных методов для расчета сверхзвуковых течений, верификация моделей экспериментальным путем представляет собой неотъемлемую часть в моделировании аэродинамических процессов [1], [2], [3]. В настоящее время для проведения таких исследований используются сложные экспериментальные установки, такие как аэродинамические трубы с ресиверами [4] и ударные трубы [5], [6]. Использование этих установок позволяет моделировать весь диапазон аэродинамических исследований (от трансзвуковых до гиперзвуковых течений). В то же время, использование таких установок достаточно дорого и трудозатратно. Для проведения подобных исследований в диапазоне чисел Маха от 1,5 до 4 может быть использован другой класс установок – вакуумные аэродинамические трубы.

Принцип действия такой установки – в емкости большого объема создается вакуум (абсолютное давление поддерживается на уровне 100 Па). На входе в рабочую камеру установлено сопло, закрытое специальным клапаном. После открытия клапана на выходе из сопла за счет перепада давления формируется сверхзвуковая струя набегающего на модель потока. Определение возможности использования такой установки для проведения экспериментальных исследований, зависит от временных параметров ее работы (выход на режим и время работы), а также изменение параметров и структуры сверхзвуковой струи в процессе работы.

Описание экспериментальной установки

В ВКА имени А.Ф. Можайского создана атмосферно-вакуумная аэродинамическая труба, оснащенная набором сменных сопел для создания сверхзвукового потока с различными числами Маха от 1,5 до 4 [7]. Основные параметры сопел представлены в таблице 1 (во всех соплах длина рабочей части составляет 58 мм, диаметр выходного сечения 40 мм).

Сверхзвуковые сопла, параметры которых представлены в таблице 1, выбирались исходя из условия обеспечения ими скорости потока со значениями чисел Маха в диапазоне от 1,5 до 4 с шагом 0,5. А затем с использованием газодинамических функций рассчитывалась геометрия сопел с учётом ограничения на значение диаметра выходного сечения сопла (40 мм). Такое ограничение на значение диаметра выходного сечения сопла связано с конструктивными особенностями рабочей части используемой атмосферно-вакуумной аэродинамической трубы.

Таблица 1 – Параметры сверхзвуковых сопел, используемых в атмосферно-вакуумной аэродинамической трубе

Число Маха (*M*)	Относительная площадь критического сечения сопла	Диаметр критического сечения, мм
1,5	1,17	36,9
2	1,69	30,8
2,5	2,63	24,6
3	4,23	19,4
3,5	6,78	15,4
4	10,71	12,2

Для исследования динамики процессов в сверхзвуковой струе была изготовлена гребенка с датчиками для измерения давления торможения (рис. 1).

Для измерения и непрерывного преобразования давления в нормированный выходной сигнал постоянного тока используются тензометрические датчики давления Trafag ECT 8472. Основные характеристики датчиков Trafag ECT 8472 подробно представлены в соответствующем техническом описании [8].

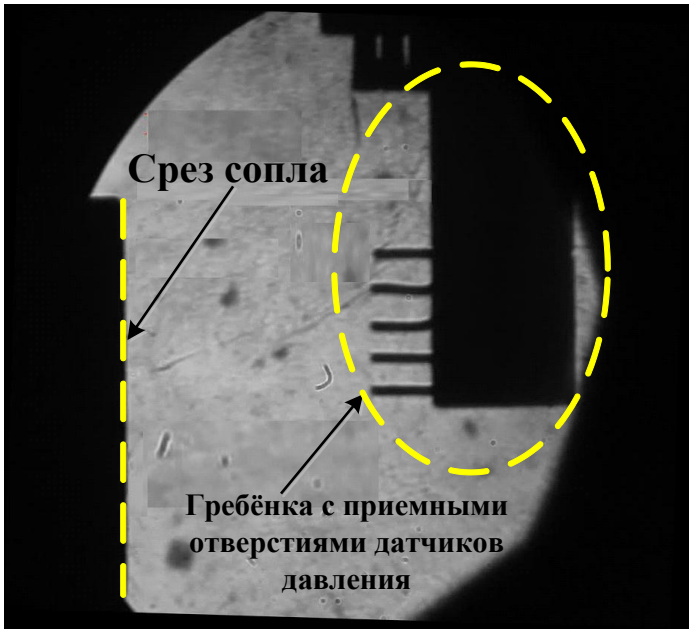


Рис.1 – Внешний вид гребенки для определения давления торможения в сверхзвуковом потоке

Принцип действия этих датчиков основан на использовании зависимости между измеряемым давлением и упругой деформацией тензочувствительного элемента. В качестве чувствительного элемента в преобразователях применяется керамическая мембрана, на которую наклеены тензорезисторы, соединенные по мостовой схеме. Измеряемое давление подается на мембрану, вызывает ее деформацию, что приводит к изменению сопротивлений тензорезисторов и разбалансу моста. Электрический сигнал разбаланса моста, пропорциональный измеряемому давлению, поступает в электронный блок преобразования для усиления, обеспечения температурной компенсации и преобразования в нормированный электрический выходной сигнал. Преобразователь сигнала находится в одном корпусе с блоком питания и аналогово-цифровым преобразователем (рис. 2).

Сигнал постоянного тока преобразуется в цифровой сигнал, который поступает на персональный компьютер и после программной обработки записывается в базу данных. Тарировка датчиков выполняется при их производстве и дополнительно не требуется перед проведением измерений.

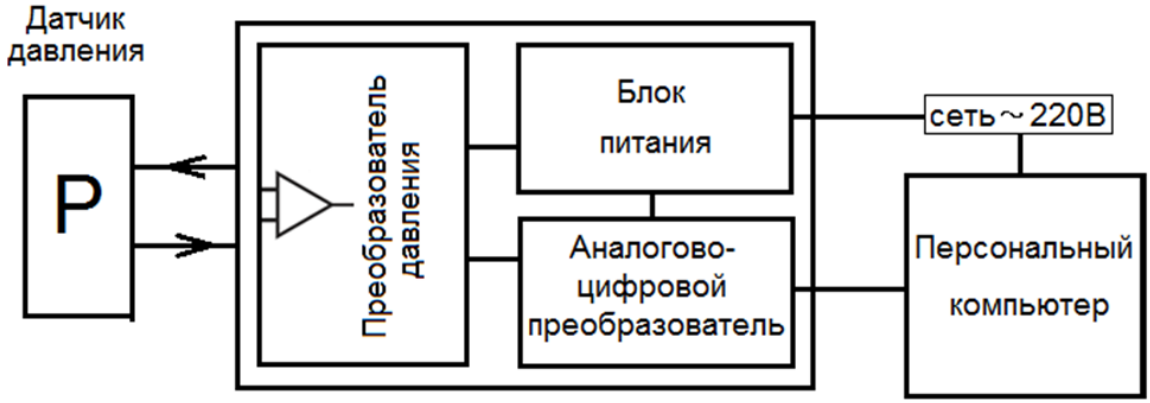


Рис. 2 – Схема измерения давления

Для каждого типа сопел (таблица 1) снималась теневая картина структуры течения, а также определялись параметры распределения давления в сверхзвуковой струе.

Результаты исследований

При проведении экспериментальных исследований с использованием вакуумной аэродинамической трубы при различных числах Маха ($1{,}5 \le M \le 4$) получены теневые картины динамики эволюции струи во времени (при M=2) (рис. 3) и значения параметров давления торможения (рис. 4).

С использованием сопла с дренажными отверстиями было получено распределение давления (рис. 5) по длине сверхзвуковой части сопла, соответствующего числу Маха равного 2 (таблица 1). На рис. 5 линии 1 соответствует дренажное отверстие 1, где изменялось статическое давление на выходе из сопла, а точке 4 – отверстие 4, где изменялось статическое давление в критическом сечении сопла. Линии 2 и 3 (рис. 5) относятся к дренажным отверстиям, расположенным между отверстиями 1 и 4 (линии 1 и 4) на расстоянии 15 мм и 45 мм от критического сечения сопла соответственно. Линии Рвн (рис. 5) соответствует статическое давление в рабочей части атмосферно-вакуумной аэродинамической трубы.

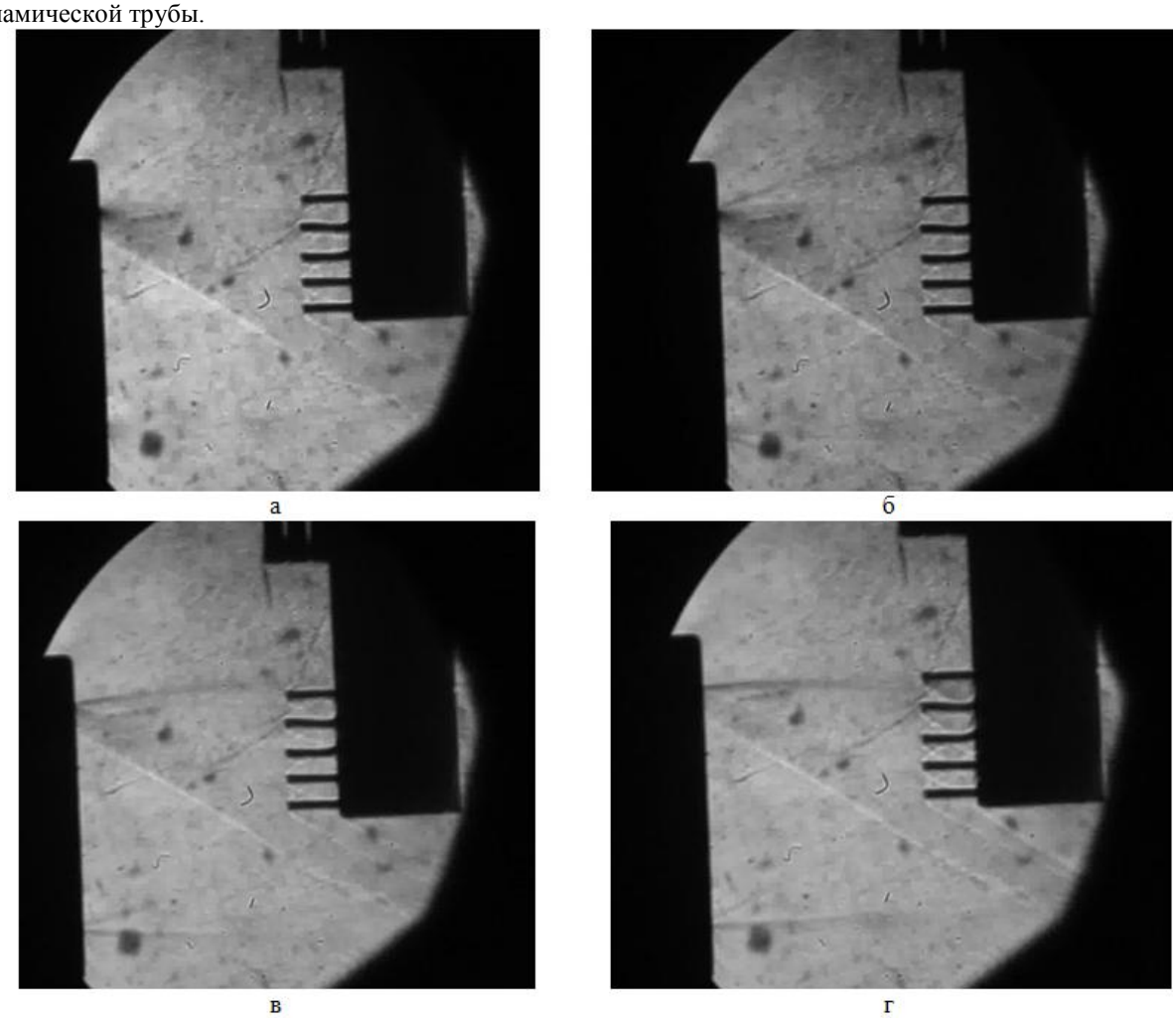


Рис. 3 – Картина течения в сверхзвуковой струе при M=2 в моменты времени:
а) 0,2 сек; *б)* 1 сек; *в)* 2 сек; *г)* 3 сек

Известно, что режимы истечения струи из сопла могут быть как расчётными так и не расчетными (недорасширением и перерасширением). Расчетный режим реализуется при равенстве статических давлений на срезе сопла (p_a) и давлению невозмущенного потока ($p_{вн}$), при этом струя имеет цилиндрическую форму с диаметром равным диаметру сечения на срезе сопла. Соответственно для режима с недорасширением струи выполняется условие $p_a > p_{вн}$, а для режима с перерасширением – $p_a < p_{вн}$. В идеальном случае измерения значений газодинамических параметров при экспериментальных исследованиях должно происходить на расчётном режиме истечения струи из сопла.

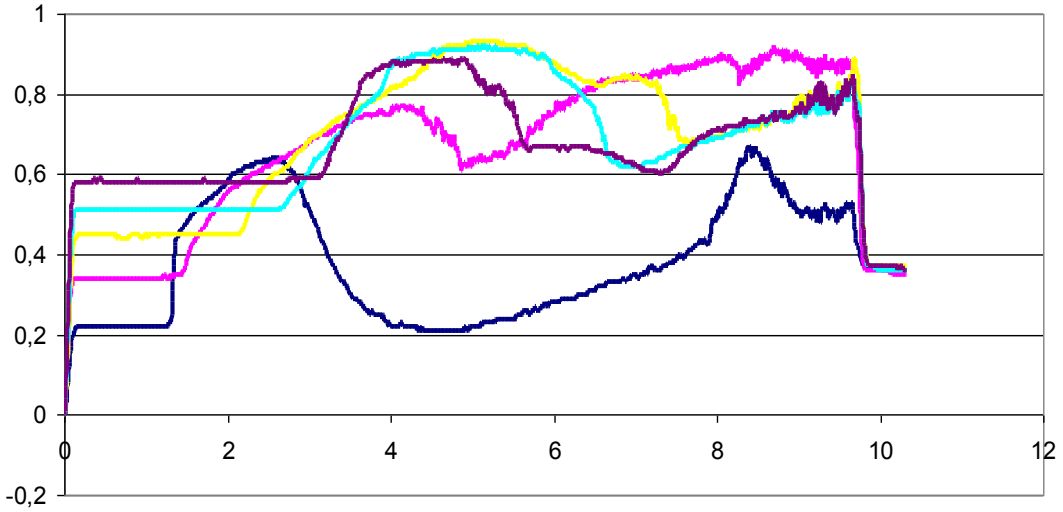


Рис. 4 – Графики изменения давления торможения,за прямым скачком уплотнения, измеренного с использованием гребенки, расположенной в сверхзвуковом потоке при *M*=2: линия 1– давление в рабочей камере; линии 2–5 – давление торможения на приёмниках гребенки

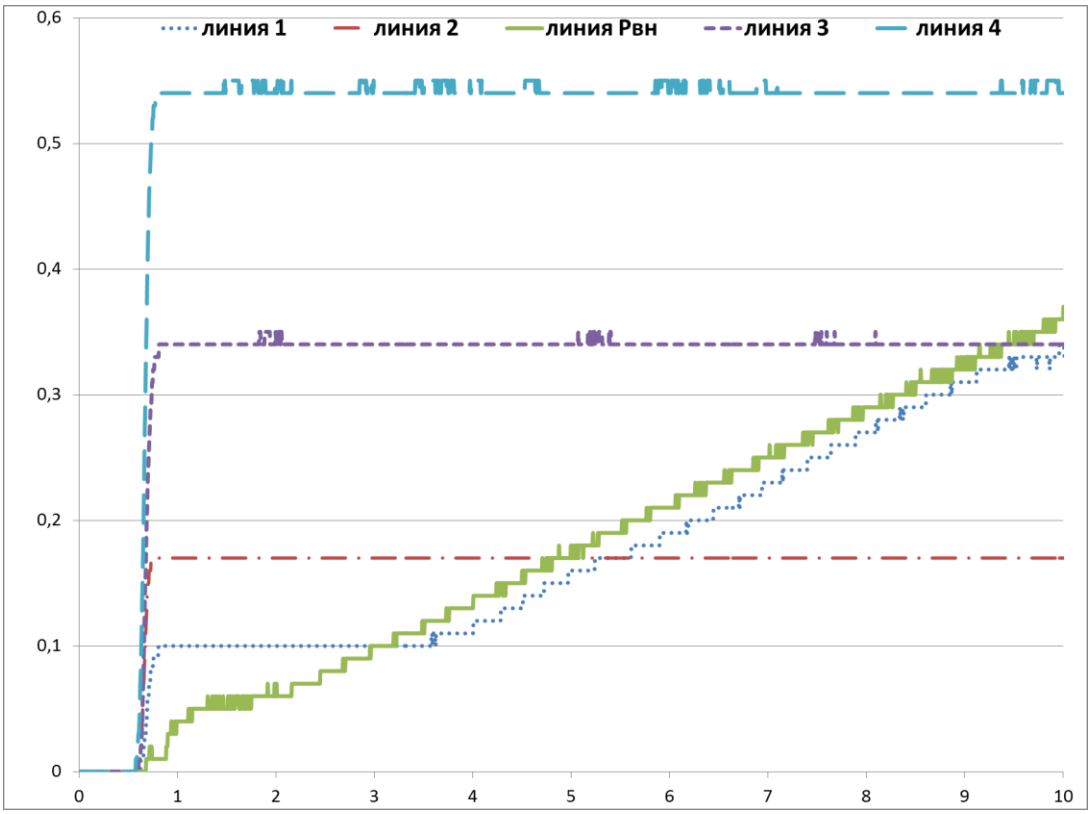


Рис. 5. – Распределение отношения статического давления к давлению торможения потока по длине сверхзвуковой части сопла при *M*=2

С учётом особенностей функционирования сверхзвуковых аэродинамических труб различного типа, создание стационарного расчетного режима в допустимом временном интервале практически невозможно. Поэтому прибегают к определенного рода допущениям, которые приводят к созданию квазистационарного режима, при котором измерения параметров в атмосферно-вакуумных трубах проводят на режимах, сочетающих в себе последовательный переход от режима с недорасширением к расчётному. Это связано с тем, что на расчётном режиме и с недорасширением и скорость струи внутри ядра потока была равна числам Маха, соответствующим значения *M* на срезе выходного сечения сопла. При этом, ограничением является значение диаметра миделева сечения исследуемой модели, так модель должна полностью находиться в ядре потока, в котором градиенты скорости и давления вдоль сечения перпендикулярного оси симметрии сопла равны нулю. Результаты исследований с помощью гребёнки давления показали, что ядро потока представляет собой цилиндрическую струю диаметром равным диаметру выходного сечения сопла с длиной образующей не более 4 см.

Из рис. 4 (линии 1 и 2) и рис. 5 (линии 1 и Рвн) видно, что пересечение этих линий, происходит на где-то третьей секунде после начала процесса истечения струи из сопла. Это свидетельствует о том, что определенный период времени (порядка 3 секунд) в рабочей области аэродинамической трубы реализуется квазистационарный режим

сверхзвукового течения (на расстоянии не более 40 мм от среза сопла. Таким образом, в период работы трубы в квазистационарном режиме возможно определение давления торможения на исследуемой модели, что дополнительно подтверждается структурой теневой картины (рис. 3). Дальнейшее изменение значений давления (рис. 4 и 5) приводит к возникновению режима с недорасширением струи, пока давление торможения не станет равным атмосферному, а скорость потока станет равной нулю.

В связи с тем, что датчики давления не установлены непосредственно в приемном канале гребёнки давления, то при определении значения статического давления торможения необходимо учитывать потери на преодоление сопротивления пневмотрассы. Указанный выше учёт обобщается в виде соответствующей погрешности измерений. О методиках расчёта погрешности измерений с учётом потерь в пневмотрассах подробно написано в работе [10].

Визуализация картины течения в сверхзвуковом потоке в аэродинамической трубе осуществляется с помощью скоростной видеокамеры и малогабаритного шлирен-теневого прибора, в качестве источника света используется мощный светодиод.

Определения числа Маха потока проводились несколькими способами:

1. посредством замера угла наклона присоединенного скачка уплотнения на остром конусе при нулевом угле атаки;

2. посредством измерения распределения давления торможения за прямым скачком уплотнения в контрольных точках по нескольким сечениям потока на различном расстоянии от среза сопла;

3. посредством измерения отношения статического давления и давления торможения за прямым скачком уплотнения в заданной точке струи.

Определение числа Маха несколькими способами связано, прежде всего, с необходимостью снижения вероятности возникновения ошибки его измерения. В конечном счете, результаты определения числа Маха по всем способам измерения после усреднения приводили к значению M в невозмущённом сверхзвуковом потоке.

Таким образом, результаты исследований показали, что для проведения экспериментальных исследований для моделей с диаметром миделева сечения не более 4 см (при $1{,}5 \leq M \leq 4$), возможно использование атмосферно-вакуумных труб, вместо более сложных и дорогих сверхзвуковых аэродинамических и ударных труб.

Заключение

В данной статье рассмотрены особенность и возможность использования атмосферно-вакуумной аэродинамической трубы ВКА имени А.Ф. Можайского для проведения экспериментальных исследований аэродинамических характеристик для моделей летательных аппаратов (при M от 1,5 до 4). Определены параметры сверхзвуковой струи и ее изменение в процессе работы, что подтвердило возможность ее использования вместо более сложных и дорогих сверхзвуковых аэродинамических и ударных труб.

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при государственной финансовой поддержке (частично) программы исследований по гранту Президента Российской Федерации МК-2902.2017.8.

Funding

The article is prepared based on the results of the work performed with state financial support (partly) of the research program under the grant of the President of the Russian Federation МК-2902.2017.8.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Суржиков С. Т. Радиационная газовая динамика спускаемых космических аппаратов. Многотемпературные модели / С. Т. Суржиков. – М.: ИПМех им. А.Ю.Ишлинского РАН, 2013. – 706 с.

2. Oberkampf William L. Verification and Validation in Scientific Computing / W. L. Oberkampf, C. J. Roy. – New York: Cambridge University Press, 2010. – 767 p.

3. Прокопенко Е. А. Алгоритм расчета газодинамических параметров в гиперзвуковой вязкой области ближнего следа за осесимметричными телами / Е. А. Прокопенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017.– Вып. 12. – Ч. 2.– С. 315–330.

4. Wind Tunnels: Models, Aerodynamics and Applications / by Justin D. Pereira (editor). – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. – 227 p.

5. Bobashev S., Shock-tube facility for MGD supersonic flow control / S. Bobashev, E. D'yakonova, A. Erofeev, T. and others // 21st AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference , Fluid Dynamics and Co-located Conferences 19-22 June 2000, Denver, CO. doi:10.2514/6.2000-2647.

6. Котов М. А. Проведение экспериментов по обтеканию моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе [Электронный ресурс] / М. А. Котов, Л. Б. Рулева, С. И. Солодовников и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2013. – Т. 14. – Вып. 4. URL: http:// chemphys.edu.ru/pdf/2013-12-20-008.pdf. (дата обращения: 03.09.2018).

7. Савищенко Н. П. Новая сверхзвуковая атмосферно-вакуумная труба СТ-4 / Савищенко Н. П., Поняев С. А., Данещик С. В. И др. // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники : сборник статей III Всероссийской науч.-практ. конф. 14–15 декабря 2016, Санкт-Петербург. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2016. – Т. 2. – С. 224–229.

8. Спецификация преобразователя давления Trafag ECT 8472.– URL: https://poltraf.ru/UserFiles/trafag/8472_%20ECT_RUS.pdf (дата обращения: 15.10.2018).

9. Петунин А. Н. Методы и техника измерений газового потока (приёмники давления и скоростного напора) / А. Н. Петунин. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.

10. Звегинцев В. И. Разработка, создание и использование газодинамических установок кратковременного действия для научных исследований : дис. … докт. техн. наук : 01.02.05 : защищена 29.06.07 : утв. 08.02.08 / Звегинцев Валерий Иванович. – Новосибирск, 2007. – 571 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Surzhikov S. T. Radiatsionnaya gazovaya dinamika spuskayemykh kosmicheskikh apparatov. Mnogotemperaturnyye modeli [Radiation gas dynamics of lowered spacecraft. Multi-temperature models] / S. T. Surzhikov. – M.: IPMekh im. A.Yu.Ishlinskogo RAN, 2013. – 706 p. [in Russian]

2. Oberkampf William L. Verification and Validation in Scientific Computing / W. L. Oberkampf, C. J. Roy. – New York: Cambridge University Press, 2010. – 767 p.

3. Prokopenko E. A. Algoritm rascheta gazodinamicheskikh parametrov v giperzvukovoy vyazkoy oblasti blizhnego sleda za osesimmetrichnymi telami [Algorithm for calculating gas-dynamic parameters in a hypersonic viscous near-wake region behind axisymmetric bodies] / E. A. Prokopenko // Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki [News of Tula State University. Technical science]. – Tula: Izd-vo TulGU. 2017. – N. 12. – Part. 2. – P. 315–330. [in Russian]

4. Wind Tunnels: Models, Aerodynamics and Applications / by Justin D. Pereira (editor). – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. – 227 p.

5. Bobashev S., Shock-tube facility for MGD supersonic flow control / S. Bobashev, E. D'yakonova, A. Erofeev and others // 21st AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference , Fluid Dynamics and Co-located Conferences 19-22 June 2000, Denver, CO. doi:10.2514/6.2000-2647.

6. Kotov M. A. Provedeniye eksperimentov po obtekaniyu modeley v giperzvukovoy udarnoy aerodinamicheskoy trube [Conducting experiments on the flow around models in a hypersonic wind tunnel] [Electronic resource] / M. A. Kotov, L. B. Ruleva, S. I. Solodovnikov and others // Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike, 2013. – V 14. – N 4. URL: http://chemphys.edu.ru/pdf/2013-12-20-008.pdf. (accessed: 03.09.2018). [in Russian]

7. Savishchenko N. P. Novaya sverkhzvukovaya atmosferno-vakuumnaya truba ST-4 [New supersonic atmospheric vacuum tube ST-4] / N. P.Savishchenko, S. A. Ponyayev, S. V. Daneshchik and others // Sovremennyye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voyennoy i spetsial'noy tekhniki : sbornik statey III Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. 14-15 dekabrya 2016 g. [Modern problems of creating and operating weapons, military and special equipment : Collection of articles of the III Russian scientific and practical conference 14–15 december 2016], Saint-Petersburg. – SPb.: VKA im. A.F.Mozhayskogo. 2016. – V. 2. – P. 224–229. [in Russian]

8. Spetsifikatsiya preobrazovatelya davleniya Trafag ECT 8472 [Pressure Transmitter Specification Trafag ECT 8472]. – URL: https://poltraf.ru/UserFiles/trafag/8472_%20ECT_RUS.pdf (accessed: 15.10.2018).

9. Petunin A. N. Metody i tekhnika izmereniy gazovogo potoka (priyemniki davleniya i skorostnogo napora) [Methods and techniques for measuring the gas flow (pressure receivers and velocity head)] / A. N. Petunin. – M.: Mashinostroyeniye. 1972. – 332 p. [in Russian]

10. Zvegintsev V. I. Razrabotka, sozdaniye i ispolzovaniye gazodinamicheskikh ustanovok kratkovremennogo deystviya dlya nauchnykh issledovaniy [Development, creation and use of short-acting gas-dynamic installations for scientific research] : dis. … of PhD in Engineering : 01.02.05 : defense of the thesis 29.06.07 : approved 08.02.08 / Zvegintsev Valeriy Ivanovich. – Novosibirsk, 2007. – 571 p. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.006

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ГОРНЫХ УЩЕЛЬЯХ ОТ СУТОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Научная статья

Радионов А.А.[1,] *, Панаэтова О.С.[2]
[1] ORCID: 0000-0002-6934-6873;
[2] ORCID: 0000-0003-2718-5108,
[1, 2] Южный математический институт ВНЦ РАН, Владикавказ, Россия

* Корреспондирующий автор (aar200772[at]mail.ru)

Аннотация

При помощи математической модели в двумерной постановке исследуются течения воздуха и распространение загрязняющих веществ в горных ущельях при учете вызываемых солнечной радиацией суточных изменений температуры поверхности. Рассмотрены ущелье идеализированной формы и ущелье, расположенное в Северной Осетии в районе хвостохранилища вблизи селения Унал в долине реки Ардон. Проведено сравнение динамики течений и распространения загрязняющих веществ. Показано, что учет суточных изменений температуры сказывается на закономерностях распространения загрязняющих веществ в этих ущельях. Также отличия наблюдаются между дневными и ночными режимами проветривания горных ущелий.

Ключевые слова: Аэродинамика гор, скорость ветра в ущелье, вихри в горном ущелье, ветроэнергетика в горных ущельях.

MODELING OF DISTRIBUTION DEPENDENCE OF POLLUTANT SUBSTANCES IN THE MOUNTAIN GORGES FROM DAILY CHANGES OF TEMPERATURE

Research article

Radionov A.A.[1,] *, Panaetova O.S.[2]
[1] ORCID: 0000-0002-6934-6873;
[2] ORCID: 0000-0003-2718-5108;
[1, 2] Southern Mathematical Institute, VSC RAS, Vladikavkaz, Russia

* Corresponding author (aar200772[at]mail.ru)

Abstract

The flow of air and the spread of pollutants in mountain gorges are studied with the help of the mathematical model in a two-dimensional formulation with regard to daily changes in surface temperature caused by solar radiation. The gorge of idealized form and the gorge located in North Ossetia in the area of the tailing dump near the village of Unal in the valley of the Ardon River are considered. The comparison of the dynamics of currents and the spread of pollutants is made. It is shown that taking into account daily temperature changes affects the patterns of pollutants distribution in these gorges. Also, differences are observed between day and night modes of ventilation of mountain gorges.

Keywords: mountain aerodynamics, wind speed in the gorge, whirlwinds in the mountain gorge, wind power in the mountain gorges.

В горных ущельях ведется добыча рудных полезных ископаемых. В результате деятельности горно-обогатительных комбинатов появляются отходы обогащения руды, называемые «хвосты». Эти отходы хранятся открытым способом в «хвостохранилище», из которого в атмосферу горных ущелий выбрасываются загрязняющие вещества (ЗВ). Из хвостохранилища выделяются ЗВ как в виде пыли, так и в виде газообразной составляющей. В данной работе рассматривается распространение ЗВ в виде пассивной не осаждающейся примеси.

Закономерности процессов рассеяния ЗВ в горах существенно отличаются от закономерностей, известных для равнинных территорий. [1], [1]. Исследовательские работы по моделированию атмосферы горных районов ведутся во многих научных центрах. В обзорных публикациях [3], [4], [5], [10] представлены современные математические модели, методы их решения и найденные закономерности течения воздуха в горных ущельях и долинах. В виду сложности возникающих течений в горных ущельях [5] основное внимание исследователей уделяется исследованию горных ущелий идеализированной формы [3], [4], [6] и рассмотрению упрощенных синоптических условий.

В настоящей работе методами математического моделирования изучаются закономерности распространения ЗВ в атмосфере ущелья идеализированной формы и ущелья, по которому протекает река Ардон, расположенного в Северной Осетии, Россия. Для этих двух ущелий показана динамика распространения ЗВ от расположенного на дне источника, возникающая вследствие суточных изменений потока солнечной радиации.

Атмосферные процессы описываются в двумерной плоскости, рассекающей ущелье перпендикулярно его оси. В каждой точке этой плоскости для правильного учета влияния силы Кориолиса вычисляются все три компоненты скорости ветра. Используемые уравнения описаны в работе [8]. Численные решения, полученные с учетом суточных изменений солнечного излучения, выбираются для третьих суток расчета физического времени системы уравнений. При таком подходе уменьшается влияние начальных условий на результаты вычислений.

Проведены расчеты для случая безоблачной погоды летнего дня, когда положение Солнца соответствует 20 июня, для обоих ущелий. Поперечное сечение идеализированного ущелья представлено на рис. 1, а ущелья реки Ардон – на рис. 2. Оба ущелья ориентированы с юго-запада на северо-восток. Амплитуда суточных изменений температуры

составляет около 10°С. Рис 1 – Поперечное сечение идеализированного ущелья. Высоты точек безразмерные, масштаб высоты равняется 5000 м

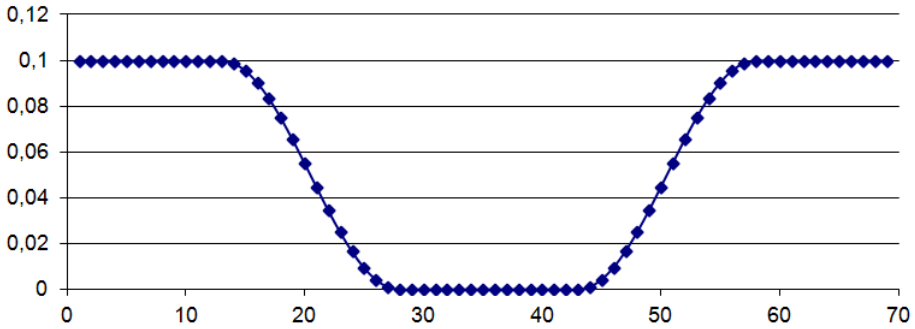


Рис 1 – Поперечное сечение идеализированного ущелья. Высоты точек безразмерные, масштаб высоты равняется 5000 м

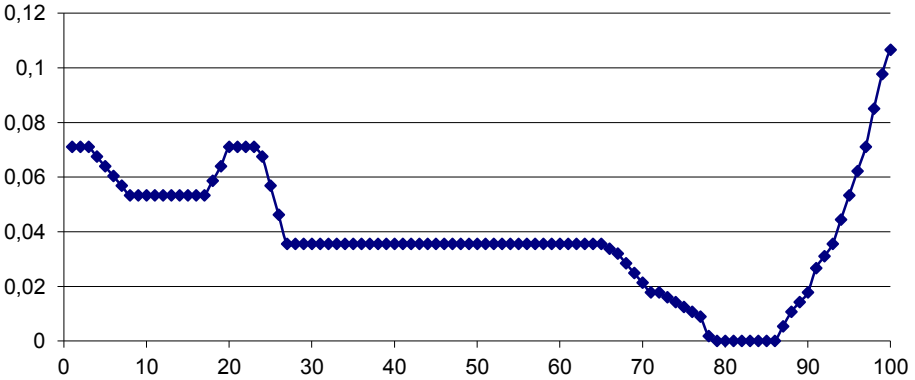


Рис 2 – Профиль ущелья реки Ардон. Высоты безразмерные, масштаб высоты равняется 5000 м

При расчетах в поперечном сечении ущелья возникает вихревое течение. Если температуры противоположных склонов ущелья отличаются из-за неравномерности прогрева солнечной радиацией, то над каждым из этих склонов может образовываться свое локальное вихревое течение. В пространстве вихревые течения могут образовывать сложные структуры, которые сменяют друг друга в зависимости от положения Солнца на небосклоне. В настоящей работе приводятся результаты моделирования 24-х часовых изменений течений воздуха и особенности распространения ЗВ.

Идеализированное ущелье

В ущелье идеализированной формы в первую половину ночи наблюдается двух-вихревая картина течения (рис. 3). Вихрь расположен перед ущельем и частично на подветренном склоне. Внутри ущелья поток воздуха опускается практически вертикально вниз и, вентилируя ЗВ, покидает ущелье. Над наветренным склоном располагается вихрь несколько большего размера. Функция тока описанного течения изображена на рис. 3.

Похожие режимы течения приводятся в работах [3], [4] для ущелий идеализированной формы, а также более подробный анализ.

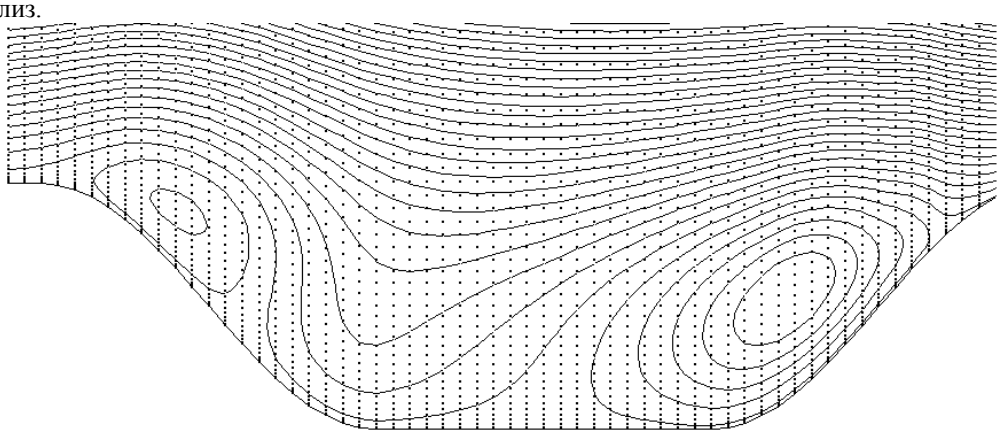


Рис 3 – Влияние контраста температур склонов на течение в ущелье

Такое поведение решения связано с различиями температур склонов и горизонтальных поверхностей. С уменьшением интенсивности турбулентного обмена увеличивается размер вихрей, и в середине ночи они приподнимаются над ущельем. Ночью между вихрями над склонами формируется третий вихрь, а расположенный над наветренным склоном вихрь перемещается вверх по течению. Линии тока ночного течения изображены на рис. 4.

Режим течения с двумя, а позднее с тремя вихрями наблюдается 7–8 часов. При этом внутри каждого вихря скорость ветра, направленная вдоль ущелья, отличается от своего геострофического значения. Изменение этой

компоненты скорости течения отмечается и при нейтральной стратификации [10]. При этом в относительно узких горных ущельях ветер вдоль ущелья может даже обращаться.

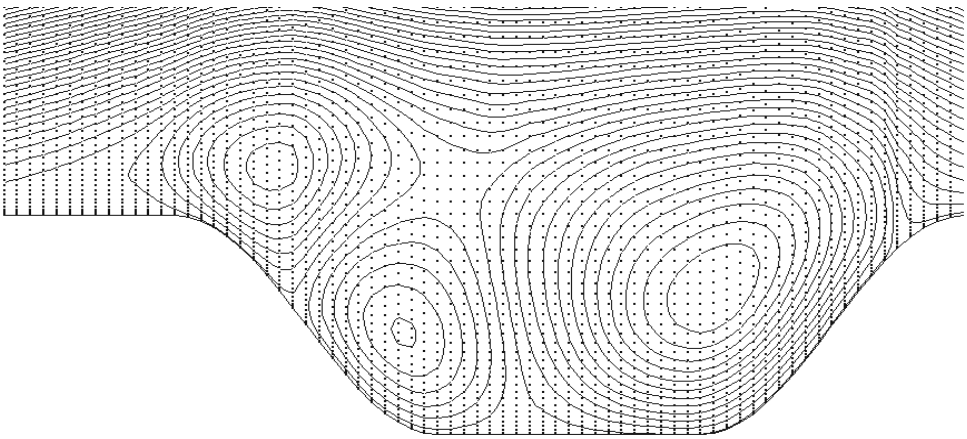


Рис 4 – Линии тока интенсивного ночного течения

Для источника, расположенного в центре ущелья, ЗВ переносятся вертикально вверх и незначительно в поперечном сечении ущелья. Для источника, расположенного на склоне ущелья, ЗВ могут аккумулироваться в одном из вихрей.

Ночью внутри ущелья образуется инверсия, в которой температура увеличивается с высотой и подавляется мелкомасштабное турбулентное перемешивание. Над горизонтальными участками перед ущельем и ниже по потоку также возникает приподнятый инверсионный слой с положительным градиентом температуры по вертикали и практически нулевой вязкостью. Он расположен на высотах приблизительно 500–600 м. Инверсионный слой препятствует вертикальному распространению ЗВ за счет турбулентного переноса.

Перед ущельем, вверх по потоку, в связи с существованием над ущельем вихревых структур, равнинная инверсия поднимается выше, а под ней, внутри ущелья, также возникает инверсия приблизительно на высоте 600–700 метров от дна. Эти области с почти нулевой вязкостью и большим градиентом температуры по вертикали не связаны между собой. С появлением приподнятой инверсии разрушается трех-вихревой режим течения, изображенный на рис. 4. Поток воздуха обтекает снизу и сверху приподнятый вихрь, формирующийся вблизи инверсии температуры над ущельем. Размер этого вихря с течением времени увеличивается и может превышать размеры инверсии над ущельем. Такое течение наблюдается в конце ночи.

Утром, с началом роста температуры поверхности, картина течения продолжает трансформироваться: приподнятый вихрь, расположенный вокруг инверсии, увеличивается и поднимается выше. Вентилирующее оба склона струйное течение увеличивается и занимает слой высотой 150–300 м.

Незадолго до полудня реализуется наиболее сложное течение. Ночная инверсия перемещается вверх и разрушается. Это сопровождается образованием множества вихрей вблизи приподнятой инверсии. За счет образования крупных вихрей температурные инверсии над ущельем исчезают раньше, чем на равнине.

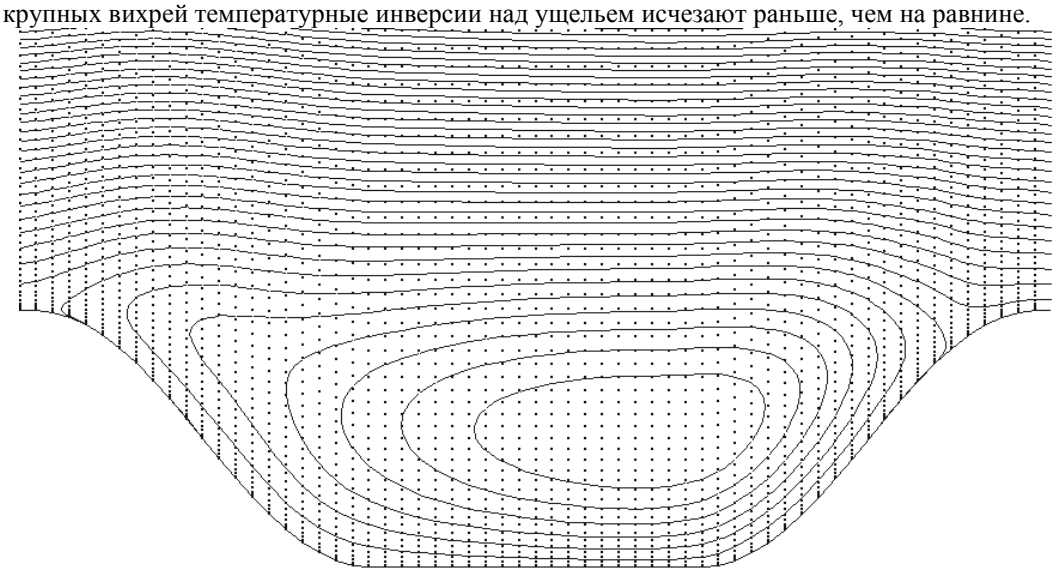


Рис 5 – Линии тока днем, в момент наибольшего нагрева

Днем формируется течение с одним вихрем, как и при нейтральной стратификации, которое приведено на рис. 5. В это время различие температур поверхностей минимально. Через 3–4 часа вновь устанавливается трех-вихревое течение.

Пренебрежение изменениями температуры склонов, которое возможно при сплошной облачности, не показывает достоверной картины течения. Солнечная радиация прогревает склоны ущелья, и смена характера вихревых течений с изменением времени суток сказывается на закономерностях рассеяния ЗВ, выброшенных внутри ущелья.

Рассмотрим суточные изменения приземной концентрации ЗВ, выбрасываемых линейным придонным источником, расположенным приблизительно в центре ущелья (рис. 6). Концентрация ЗВ представлена в двух точках склонов, расположенных от источника на равном расстоянии. По оси абсцисс отложено время в часах.

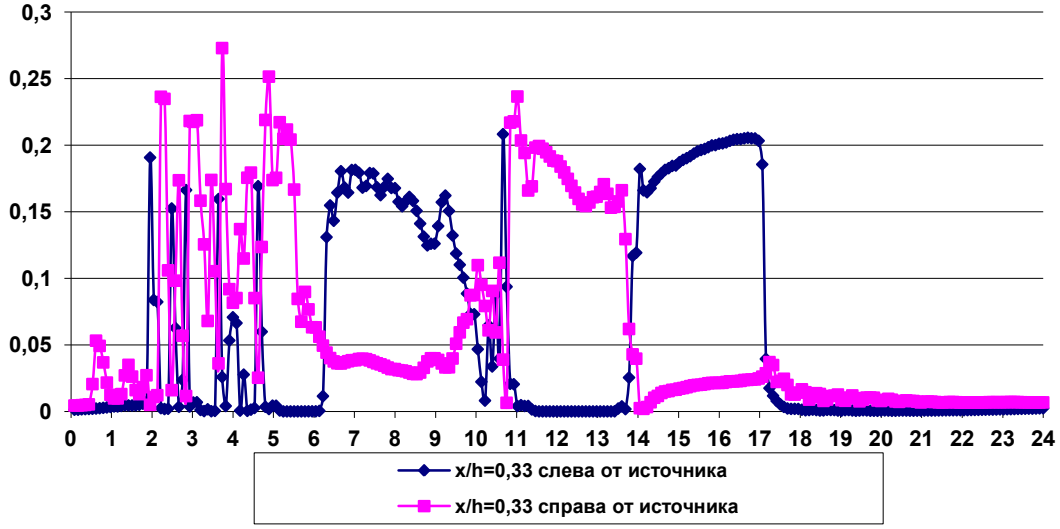


Рис 6 – Концентрация ЗВ в точках склонов, расположенных от источника на расстоянии x / h = 0.33, где *h* – высота ущелья. Время в часах

На графиках рис. 6 представлены суточные приземные концентрации ЗВ в ущелье, на которых отражается трансформация течений воздуха. Первые два часа суток и с 17 по 24 ч. низкие значения концентрации свидетельствуют о выносе ЗВ из ущелья. В это время реализуется двух- и трех-вихревое течение. Быстрые изменения с 2 до 5 часов соответствуют нестационарному течению. Далее, с 6 до 14 часов прослеживается ночное течение, при котором образуется вихрь вблизи приподнятой инверсии. Различия на графике между участками с 6 до 10 часов и с 11 до 14 часов обусловливаются имеющимся небольшим вихрем под вентилирующей ущелье струей. С 14 по 17 ч. устанавливается одно-вихревое течение, аккумулирующее в себе ЗВ.

Можно сделать вывод, что суточные изменения при расчетах распространения ЗВ в горных ущельях осложняются трансформацией вихревых течений и не сводятся к учету суточных изменений турбулентного перемешивания.

Используя осреднение концентрации ЗВ за шестьдесят минут, можно увидеть, что значения меняются в несколько раз в различное время суток. Из рис. 6 видно, что концентрация ЗВ ночью изменяется медленнее, чем днем.

Сложные закономерности суточных трансформаций вихревого течения внутри горного ущелья могут сказываться при анализе данных измерений содержания ЗВ, выполненных в атмосфере ущелья. Здесь важен не только интервал, за который усредняются измеряемые данные, но также и конкретное время суток, в которое эти измерения проводятся. Днем необходимо проводить измерения ежечасно, а ночью их можно делать реже.

Ущелье реки Ардон

В численном исследовании моделировались различные направления внешнего ветра для ущелья реки Ардон, расположенного на Северном Кавказе в районе унальского хвостохранилища. Источник ЗВ располагался в середине участка поверхности, которая имеет наименьшую высоту. Поперечное сечение в этом месте ущелья изображено на рис. 2.

Проведено два вычислительных эксперимента, которые отличаются направлением составляющей ветра на верхней границе, направленной по оси Ox. Направленная вдоль ущелья составляющая внешнего ветра оставалась неизменной. Модуль скорости ветра не менялся и составлял около 10 м/с. В первом расчетном варианте наветренный склон ущелья более высокий, во втором – более низкий.

Некоторые аэродинамические особенности течения в унальском ущелье напоминают ущелье идеализированной формы. Ночью над ущельем формируется инверсия температуры, которая в утренние часы поднимается вверх с образованием приподнятого вихря, под которым скорости течения воздуха малы. Днем отличия от идеализированного ущелья больше. Заполняющий ущелье вихрь в обоих расчетных вариантах пульсирует. Пульсация состоит из появления малого вихря, который постепенно увеличивается в размерах, через какое-то время превышает высотой размеры ущелья, после чего срывается и сносится вниз по потоку, в нижней точке ущелья зарождается новый вихрь.

На рис. 7 изображена концентрация ЗВ в зависимости от времени суток в двух точках склонов, удаленных от источника на треть высоты ущелья. Вихревое течение медленно меняется ночью и изменения содержания ЗВ плавные. Дневные изменения концентрации ЗВ происходят быстрее ночных.

Аналогичные графики для второго эксперимента приведены на рис. 8.

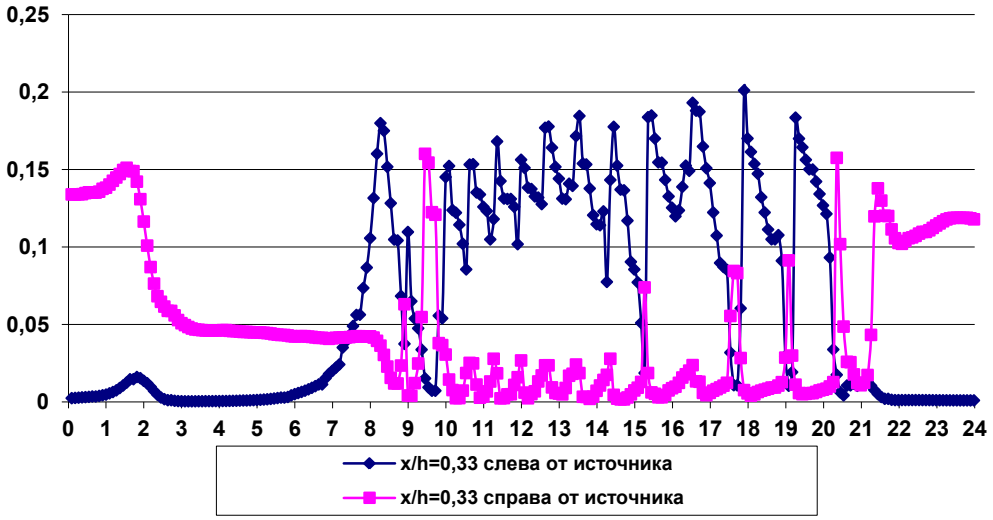


Рис. 7 – Изменения концентрации ЗВ за сутки в первом варианте расчета унальского ущелья для точек на расстояниях x / h=0.33, h – высота ущелья. Время в часах

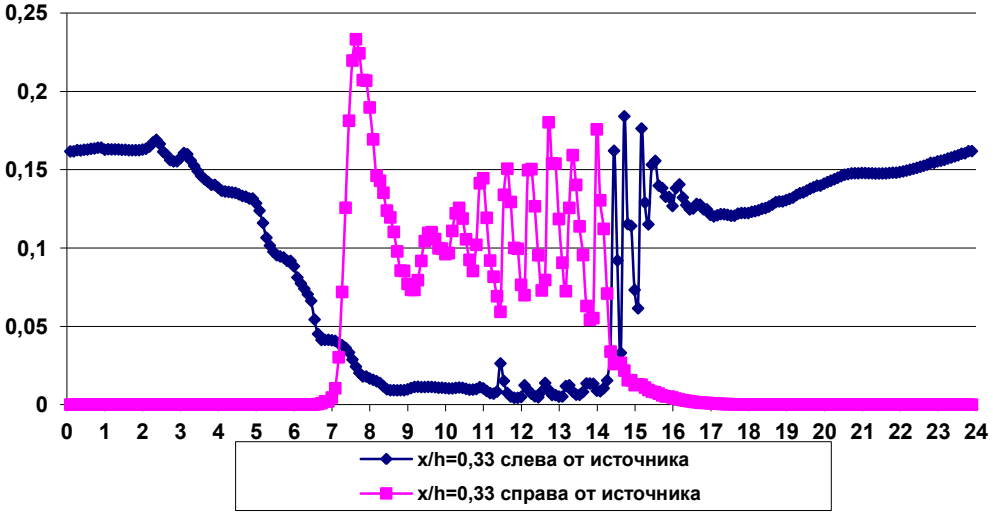


Рис. 8 – Изменения концентрации ЗВ за сутки во втором варианте расчета унальского ущелья для точек на расстояниях x / h=0.33, h – высота ущелья. Время в часах

Из сравнения рис. 7 и 8 видно, что при натекании воздуха на более высокий наветренный склон, пульсации вихрей интенсивнее и в два раза длительнее. Во втором расчете вечером вихревые пульсации прекращаются около 15-ти часов, тогда как в первом варианте продолжаются до 22-х часов.

Периодичность пульсаций в обоих вариантах расчета сопоставима и составляет около 40 минут. В первом варианте ночью период пульсаций увеличивается и превышает 60 минут. Эти периоды времени при проведении измерений ЗВ в горах показывают интервалы времени, которые необходимы для гладкого осреднения измерений, что следует учитывать.

В настоящей работе не предпринималось попытки вычислить скорости ветра в местах предполагаемого расположения ветроэнергетических установок. На ветер в месте установки влияет множество не учтенных в приведенной модели факторов, среди которых, например, горно-долинная циркуляция. При возникновении вихрей на горно-долинную циркуляцию накладывается локальный поток вихревого течения, порожденный вихрем. Наложение этих потоков может привести к усилению ветра вдоль оси ущелья или к его уменьшению. Аналогично может влиять возникновение пульсирующих режимов течения. Представляется важным учет влияния этих явлений при анализе эффективности расположения ветроэнергетических установок.

Распространение ЗВ в горных ущельях обусловливается множеством факторов, в том числе факторами, приведенными в настоящем исследовании.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Барри Р. Г. Погода и климат в горах / Р. Г. Барри. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 311 с.
2. Шелковников М. С. Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов / М. С. Шелковников. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 208 с.

3. Teixeira M. A. The atmosphere over mountainous regions. Frontiers in Earch Science / M. A. C. Teixeira, D. J. Kirshbaum, H. Olafsson and others. – Frontiers Media SA, Lausanne, Switzerland, pp 162. 2016. ISBN 9782889450169.

4. Fotini Katopodes Chow Mountain Weather Research and Forecasting, Recent Progress and Current Challenges / Fotini Katopodes Chow, Stephan F.J. De Wekker, Bradley J. Snyder.. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp 750, ISBN 978-94-007-4097-6.

5. Pathirana A. Simulating orographic rainfall with a limited-area, non-hydrostatic atmospheric model under idealized forcing / A. Pathirana, S. Herath, and T. Yamada. // Atmos. Chem. Phys., 5, 215–226, 2005, www.atmos-chem-phys.org/acp/5/215/

6. Manuela L. Inversion Build-Up and Cold-Air Outflow in a Small Alpine Sinkhole / L. Manuela, C. David Whiteman, Manfred Dorninger // Boundary-Layer Meteorol (2017) 163:497–522, DOI 10.1007/s10546-017-0232-7

7. Leukauf D. Towards generalizing the impact of surface heating, stratification and terrain geometry on the daytime heat export from an idealized valley / D. Leukauf, A. Gohm, M. Rotach.. // J. Appl. Meteor. Climatol, 2017. doi:10.1175/JAMC-D-16-0378.1

8. Johannes S. Impact of Horizontal Model Grid Resolution on the Boundary Layer Structure over an Idealized Valley / S. J. Wagner, A. Gohm, M. W. Rotach. // Monthly Weather Review, 2014, v 142, pp 3446-3465.

9. Каменецкий Е. С. Распространение загрязняющих веществ в горных ущельях / Е. С. Каменецкий, А. А. Радионов // Владикавказский математический журнал, 2003, т. 5, вып. 2. С. 24-33.

10. Радионов А. А. Моделирование распространения загрязняющих веществ в горных ущельях. Результаты математического моделирования / А. А. Радионов – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, 2011 г. 138 с. ISBN: 978-3-8433-0783-3.

11. Kamenetsky E. S. Aerodynamics of mountain valleys with varying cross sections . E. S. Kamenetsky, A. A. Radionoff // Boundary-Layer Meteorology, 1999, v.91 N.2, 191-197.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Barry R. G. Pogoda i klimat v gorah. [Mountain weather and climate.] / R. G. Barry – L.: Gidrometeoizdat, 1984. 311 p. [in Russian]

2. Shelkovnikov M. S. Mezometeorologicheskie processy v gornyh rajonah i ih vliyanie na polety vozdushnyh sudov. [Mesometeorological processes in mountainous areas and their impact on aircraft operations.] M. S. Shelkovnikov – L.: Gidrometeoizdat, 1985. 208 p. [in Russian]

3. Teixeira M. A. The atmosphere over mountainous regions. Frontiers in Earch Science / M. A. C. Teixeira, D. J. Kirshbaum, H. Olafsson and others. – Frontiers Media SA, Lausanne, Switzerland, pp 162. 2016. ISBN 9782889450169.

4. Fotini Katopodes Chow Mountain Weather Research and Forecasting, Recent Progress and Current Challenges / Fotini Katopodes Chow, Stephan F.J. De Wekker, Bradley J. Snyder.. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp 750, ISBN 978-94-007-4097-6.

5. Pathirana A. Simulating orographic rainfall with a limited-area, non-hydrostatic atmospheric model under idealized forcing / A. Pathirana, S. Herath, and T. Yamada. // Atmos. Chem. Phys., 5, 215–226, 2005, www.atmos-chem-phys.org/acp/5/215/

6. Manuela L. Inversion Build-Up and Cold-Air Outflow in a Small Alpine Sinkhole / L. Manuela, C. David Whiteman, Manfred Dorninger // Boundary-Layer Meteorol (2017) 163:497–522, DOI 10.1007/s10546-017-0232-7

7. Leukauf D. Towards generalizing the impact of surface heating, stratification and terrain geometry on the daytime heat export from an idealized valley / D. Leukauf, A. Gohm, M. Rotach.. // J. Appl. Meteor. Climatol, 2017. doi:10.1175/JAMC-D-16-0378.1

8. Johannes S. Impact of Horizontal Model Grid Resolution on the Boundary Layer Structure over an Idealized Valley / S. J. Wagner, A. Gohm, M. W. Rotach. // Monthly Weather Review, 2014, v 142, pp 3446-3465.

9. Kamenetsky E. S., Radionoff A. A. Rasprostranenie zagryaznyayushchih veshchestv v gornyh ushchel'yah [Propagation of pollutants in mountain valleys.] // Vladikavkazskij matematicheskij zhurnal, 2003, t. 5, vyp. 2. 24-33 p. [in Russian]

10. Radionoff A. A. Modelirovanie rasprostraneniya zagryaznyayushchih veshchestv v gornyh ushchel'yah. Rezul'taty matematicheskogo modelirovaniya. [Modeling the propagation of pollutants in mountain valleys. The results of mathematical modeling.] / A. A. Radionoff – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, 2011 г. 138 p. ISBN: 978-3-8433-0783-3. [in Russian]

12. Kamenetsky E. S. Aerodynamics of mountain valleys with varying cross sections . E. S. Kamenetsky, A. A. Radionoff // Boundary-Layer Meteorology, 1999, v.91 N.2, 191-197.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.007

ФОКУСИРОВКА МАГНОНОВ В КРИСТАЛЛАХ СО СТРУКТУРОЙ АЛЬФА-ЖЕЛЕЗА

Научная статья

Савченко С.П. *
ORCID: 0000-0001-7760-8362,
Институт физики металлов имени М.Н.Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

Аннотация

Изучены особенности распространения спиновых волн (магнонов) в кристаллах со структурой альфа-железа в рамках модели, учитывающей взаимодействие атома с атомами первой и второй координационной сферы в слое кубической объёмно-центрированной кристаллической решетки. Показано, что в длинноволновом приближении фокусировка магнонов отсутствует, а для коротких волн в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля наблюдается эффект фокусировки. Рассмотрены особенности фокусировки при отрицательном параметре взаимодействия с соседями.

Ключевые слова: ОЦК-решетка, альфа-железо, фокусировка, магноны, гейзенберговское взаимодействие.

MAGNON FOCUSING IN CRYSTALS WITH ALPHA-IRON STRUCTURE

Research article

Savchenko S.P. *
ORCID: 0000-0001-7760-8362
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, UB of RAS, Ekaterinburg, Russia;

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

Abstract

The features of the propagation of spin waves (magnons) in crystals with the alpha-iron structure are studied within the framework of a model that takes into account the interaction of an atom with the atoms of the first and second coordination spheres in a layer of a cubic body-centered crystal lattice. It is shown that there is no magnon focusing in long-wave approximation, as for short waves in case of no external constant magnetic field, a focusing effect is observed. The features of focusing are considered with a negative interaction parameter with neighbors.

Keywords: bcc-lattice, alpha-iron, focusing, magnons, heisenberg interaction.

Современная электроника имеет тенденцию к миниатюризации и активно осваивает терагерцовый диапазон. При этих условиях всё более важным вопросом становится задача теплоотвода, и, соответственно, уменьшение потерь на джоулево тепло. В связи с этим привлекательной областью исследования становится спинтроника и приобретает новую актуальность задача о распространении спиновых волн в соответствующих материалах, перспективных для спинтроники. Одним из таких материалов является альфа-железо. В нём обменное взаимодействие между атомами решётки хорошо описывается моделью Гейзенберга. Спиновые волны в рамках этой модели имеют достаточно сложный закон дисперсии. В частности, их фазовая и групповая скорости не коллинеарны и характеристики потока спиновых волн зависят от направления. В результате этого возникает анизотропия распространения спиновых волн, исследованию которой и посвящена настоящая работа.

Перспективными объектами спинтроники считаются тонкие пленки и гетероструктуры, в которых спиновые волны распространяются вдоль поверхности. В связи с этим мы ограничиваемся рассмотрением двумерной задачи. Внешнее магнитное поле полагаем равным нулю, поскольку интересуемся собственной анизотропией распространения магнонов, то есть той, что обусловлена только структурой кристаллической решетки.

Магнитные свойства альфа-железа, имеющего ОЦК структуру кристаллической решетки, хорошо описываются в рамках модели Гейзенберга, учитывающей взаимодействие спина атома с первыми и вторыми соседями.

Гамильтониан гейзенберговского взаимодействия с первыми и вторыми соседями записывается следующим образом:

$$\mathrm{H} = -J_1 * \sum S_0 S_{nn} - J_2 * \sum S_0 S_{nnn} \tag{1}$$

Закон дисперсии имеет вид:

$$\omega(q) = 8\omega_e \left[1 - cos\left(\frac{aq_x}{2}\right) cos\left(\frac{aq_y}{2}\right) + \frac{\xi}{4}\left(2 - cos(aq_x) - cos(aq_y)\right)\right] \tag{2}$$

где $\omega_e = 2n\nu_e, \nu_e = \frac{2SJ_1}{h} \approx 40$ ТГц – постоянная обменной энергии, $\xi = {J_2}/{J_1}$ – параметр, являющийся отношением величин обменного взаимодействия с первой и второй координационной сферой, S = 2.2 – среднее число магнетонов Бора на атом железа, взятое из [1]; J_1 и J_2 – постоянные обменного взаимодействия центрального атома с атомами первой и второй координационной сферы, для атомов железа в слое [2] J_1 = 0.78 mRy и J_2 = 0.18 mRy, следовательно $\xi \approx 0.235$; $\boldsymbol{q}(\varphi) = (q\cos(\varphi), q\sin(\varphi))$ – волновой вектор; a = 2.866 Å – период решётки. Здесь стоит также отметить, что в приближении длинных волн (при малых **q**) анизотропия спектра становится несущественной, что доказывается разложением (2) по малому параметру:

$$\omega(q) = \omega_e[1 + \xi](aq)^2 \tag{3}$$

В дальнейшем будет показано, что с увеличением модуля волнового вектора увеличивается и анизотропия распространения спиновых волн.

Определить направления фокусировки и дефокусировки магнонов можно по форме изоэнергетических поверхностей, поскольку групповая скорость перпендикулярна изоэнергетической поверхности в заданной точке и определяет поток магнонов. Для построения поверхностей постоянной энергии вычисляются значения модуля волнового вектора $q(\varphi)$ из уравнения $\omega(\mathbf{q})$ = const и строятся соответствующие кривые. Для количественного описания эффекта фокусировки магнонов применим метод, развитый Марисом в работе [3] для оценки фокусировки фононов. Автор в своей работе воспользовался моделью изотропного потока для сравнения с анизотропным и ввёл понятие коэффициента усиления потока фононов $A(\theta,\varphi)$ — отношения интенсивности анизотропного потока квазичастиц в заданном направлении к интенсивности потока в предположении изотропной среды. Величина коэффициента усиления в двумерном случае может быть вычислена по формуле $A(\varphi) = q/|K|$, где K-гауссова кривизна поверхности постоянной энергии.

Применение указанных методов позволило установить, что анизотропия потока магнонов возрастает по мере приближения частоты к границе первой зоны Брюллиэна. Показано, что магноны фокусируются в направлении [10], где A изменяется от 1 до 2.7, и дефокусируются в направлении [11] - A изменяется от 1 до 0.36. Указанные предельные значения A наблюдаются у спиновых волн с частотой 360 ТГц (у границы первой зоны Бриллюэна). Зависимости коэффициента $A(\varphi)$, а также кривые постоянной энергии $q(\varphi)$ приведены на рисунке 1.

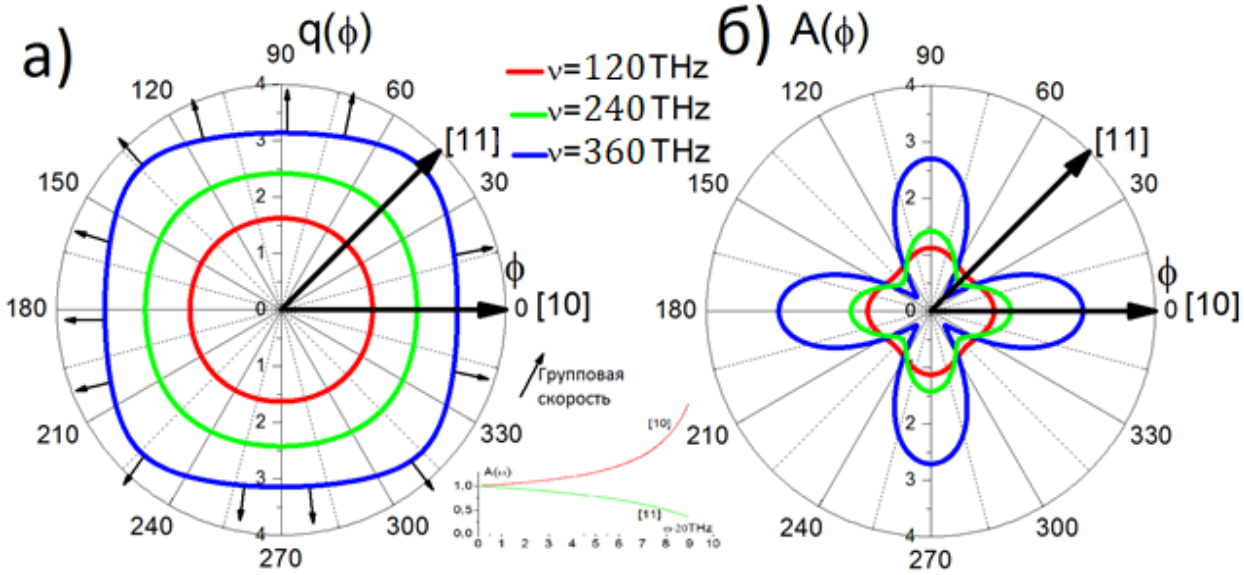


Рис. 1 – Картина фокусировки спиновых волн в слое альфа-железа

На рисунке (а) приведена поверхность постоянной энергии. Стрелками перпендикулярно изоповерхности показаны направления групповых скоростей. На рисунке (б) все три кривые коэффициента усиления потоков разных энергий пересекаются в окрестности одних и тех же точек, что означает сохранение диапазонов фокусировки и дефокусировки независимо от энергии спиновых волн. На врезке посередине изображено возрастание и убывание коэффициента усиления $A(\omega)$ в характерных направлениях [10] и [11]. По виду этой врезки можно заключить, что коэффициент усиления не имеет экстремумов при увеличении модуля волнового вектора от 0 до границы первой зоны Бриллюэна.

Применение методов к системе с отрицательным параметром ξ (что равносильно отрицательному J_1 или J_2) показало, что в этом случае на некоторых направлениях эффект фокусировки возрастает на порядки, иначе говоря на этих направлениях формируется каустика магнонов. Так, при ξ = -0,235 в направлении [11] происходит наиболее сильная дефокусировка с коэффициентом A≈0,01, в [10] присутствует небольшая фокусировка с A=5,8. Каустика наблюдается при углах ±8º от [11]. Картина фокусировки для случая ξ=-0,235 приведена на рисунке 2.

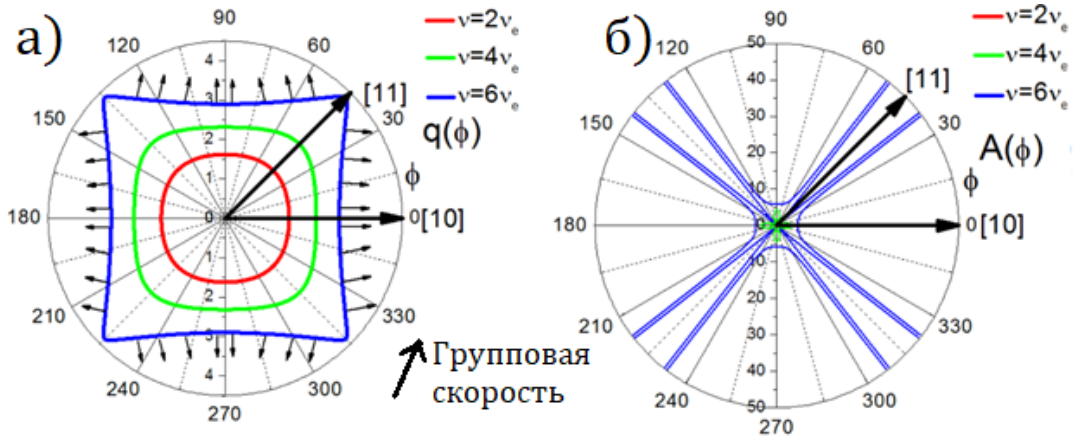


Рис. 2 – Картина фокусировки магнонов при взаимодействии с ближайшими атомами, равном ξ=-0,235

На изоповерхности (рисунок (а)) видны вогнутые участки, связанные с появлением каустик. По зависимостям коэффициента усиления (рисунок (б)) видно, что у спиновых волн высокой частоты есть направления, где $A(\theta)$ имеет расходимость. В этих направлениях кривизна изоповерхности резко уменьшается и, соответственно, величина коэффициента усиления резко возрастает, то есть появляется каустика магнонов. Поведение коэффициента усиления в направлении [10] обусловлено, как и на рисунке 1, совместным влиянием как первых, так и вторых соседей.

Отдельное внимание стоит уделить поведению каустик в зависимости от параметра взаимодействия ξ. Здесь влияние атомов первой и второй координационной сферы сдвигает направление каустики к кристаллографическому направлению [11]. В самом направлении [11] возрастает величина дефокусировки от A=0.07 при ξ=-0.1 до A=0.02 при ξ=-0.8. В [10] фокусировка изменяется от A=17 до A=1.7, что можно объяснить совместным влиянием атомов первой и второй координационной сферы. При ξ=-0.8 направления каустик повёрнуты от [11] на угол 8°, при ξ =-0.1 на 20°. Направления каустик для двух случаев изображены на рисунке 3.

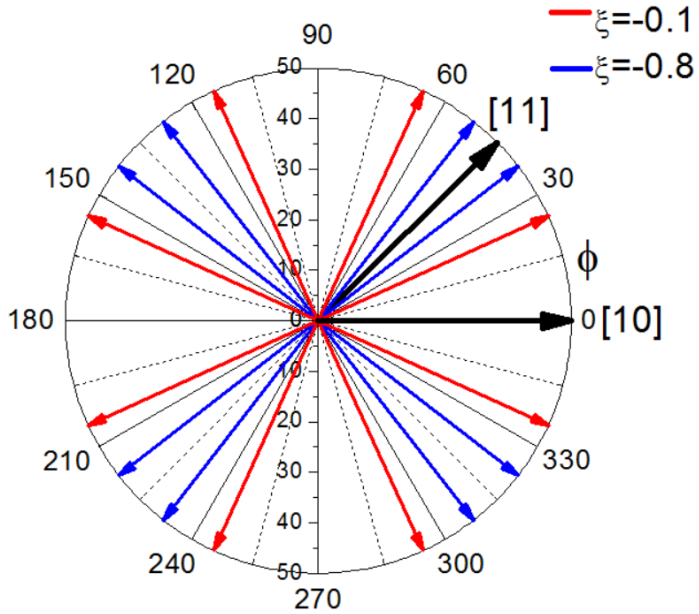


Рис. 3 – Направления каустик для разных значений параметра ξ

Таким образом, показано, что в альфа-железе в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля должна наблюдаться фокусировка коротковолновых магнонов, т. е. магнонов с волновыми векторами вблизи границы первой зоны Бриллюэна. Для отрицательного параметра взаимодействия с соседями показано формирование каустик, также исследовано их поведение в зависимости от величины этого параметра.

Финансирование

Работа выполнена в рамках госпрограммы «Спин» № АААА-А18-118020290104-2 при поддержке проекта УрО РАН № 18-10-2-37.

Funding

This work is the part of “Spin” state program No. AAAA-A18-118020290104-2 with the support of the project of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No. 18-10-2-37.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Kittel C. Quantum Theory of Solids/ C. Kittel - New York: Wiley, 1963. – 435 p.
2. Мамонова М. В. Расчет коэффициента магнитосопротивления для мультислойной магнитной структуры Fe/Cr / М. В.Мамонова, В. В. Прудников, П. В. Прудников и др. // Вестник омского университета. - 2016 -№ 3. - С. 16–19
3. Maris H. J. Enhancement of Heat Pulses in Crystals due to Elastic Anisotropy / H. J.Maris // J. Acoust. Soc. Am. – 1971. – Vol.50. – p. 812-818 doi.org/10.1121/1.1912705
4. Jasiukiewicz Cz. Phonon focusing patterns: Calculation of response of finite area detectors to pulsed ballistic beams of dispersive and dispersionless phonons / Cz. Jasiukiewicz, T. Paszkiewicz, and D. Lehmann // Zeitschrift Zur Physik B Condensed Matter. – 1994. – Vol. 96. – P. 213-222. doi: 10.1007/BF01313286
5. Jacob Philip Phonon magnification in cubic crystals / Jacob Philip, K.S.Viswanathan // Physical Review B.-1978.-Vol.17.- P.4969-4978. doi: 10.1103/PhysRevB.17.4969
6. M. Lax and V. Narayanamurti Phonon magnification and the Gaussian curvature of the slowness surface in anisotropic media: Detector shape effects with application to gas / M. Lax and V. Narayanamurti // Physical Review B.-1980.-Vol.22.-P.4876-4897. doi: 10.1103/PhysRevB.22.4876
7. Northrop G. A. Ballistic phonon imaging in germanium / G. A. Northrop, J. P.Wolfe // Physical Review B.-1980.-Vol.22.-P.6196-6212. doi: 10.1103/PhysRevB.22.6196
8. Wolfe J. P. Imaging Phonons Acoustic Wave Propagation in Solids / J. P. Wolfe.- Cambridge: Cambridge University Press, 1998.-411 p.

9. Kohler H. Spin waves and Heisenberg exchange constants for α-iron / H. Kohler, J. Sticht and J. Kubler / Physica B.-1991.-Vol.172.-P.79-84. doi: 10.1016/0921-4526(91)90419-f

10. Hai Wang Exchange interaction function for spin-lattice coupling in bcc iron / Hai Wang, Pui-Wai Ma, and C. H. Woo / Physical Review B.-2010.-Vol.82.-144304.-P.1-8.

doi: 10.1103 /PhysRevB.82.144304

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kittel C. Quantum Theory of Solids/ C. Kittel - New York: Wiley, 1963. – 435 p.

2. Mamonova M. V. Raschet koefficienta magnetosoprotivleniya dlya multisloynoy magneetnoy structury Fe/Cr [Calculation of magnetoresistance coefficient for Fe/Cr multilayer magnetic structure] / M. V.Mamonova, V. V. Prudnikov, P. V. Prudnikov and others// Herald of Omsk University. – 2016. - №3 - p.16-19 [in Russian]

3. Maris H. J. Enhancement of Heat Pulses in Crystals due to Elastic Anisotropy / H. J. Maris // J. Acoust. Soc. Am. – 1971. – Vol.50. – p. 812-818 doi.org/10.1121/1.1912705

4. Cz. Jasiukiewicz Phonon focusing patterns: Calculation of response of finite area detectors to pulsed ballistic beams of dispersive and dispersionless phonons / Cz. Jasiukiewicz, T. Paszkiewicz, D. Lehmann // Zeitschrift Zur Physik B Condensed Matter. – 1994. – Vol. 96. – P. 213-222. doi: 10.1007/BF01313286

5. Jacob Philip Phonon magnification in cubic crystals / Jacob Philip, K.S.Viswanathan // Physical Review B.-1978.-Vol.17.- P.4969-4978. doi: 10.1103/PhysRevB.17.4969

6. Lax M. Phonon magnification and the Gaussian curvature of the slowness surface in anisotropic media: Detector shape effects with application to gas / M. Lax, V. Narayanamurti // Physical Review B.-1980.-Vol.22.-P.4876-4897. doi: 10.1103/PhysRevB.22.4876

7. Northrop G. A. Wolfe Ballistic phonon imaging in germanium / G. A. Northrop and J. P.Wolfe // Physical Review B.-1980.-Vol.22.-P.6196-6212. doi: 10.1103/PhysRevB.22.6196

8. Wolfe J. P. Imaging Phonons Acoustic Wave Propagation in Solids / J. P. Wolfe.- Cambridge: Cambridge University Press, 1998.-411 p.

9. Kohler H., J. Sticht and J. Kubler Spin waves and Heisenberg exchange constants for α-iron / H. Kohler, J. Sticht and J. Kubler / Physica B.-1991.-Vol.172.-P.79-84. doi: 10.1016/0921-4526(91)90419-f

10. Hai Wang Exchange interaction function for spin-lattice coupling in bcc iron / Hai Wang, Pui-Wai Ma, and C. H. Woo / Physical Review B.-2010.-Vol.82.-144304.-P.1-8.

doi: 10.1103 /PhysRevB.82.144304

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.008

АППРОКСИМАЦИЯ И ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ В БАЗИСЕ ОКАЙМЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ИНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Научная статья

Седов А.В. *
ORCID: 0000-0001-7515-3886,
Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов на Дону, Россия;
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

* Корреспондирующий автор (sedov07[at]list.ru)

Аннотация

Предложена формула тригонометрической аппроксимации и интерполяции сигналов на основе базиса окаймляющих функций, упрощающая процесс моделирования и восстановления волновых изменений сигналов по измеренным отсчетам. Предложены модификации формулы для одновременной параллельной фильтрации сигналов на основе применения семейств новых окаймляюще-фильтрующих функций. Показаны преимущества применения предложенного подхода и формул перед известными. Показана взаимосвязь формулы с известной теоремой отсчетов.

Ключевые слова: тригонометрическая аппроксимация, окаймляющие функции, параллельная фильтрация, теорема отсчетов, волновые сигналы.

APPROXIMATION AND INTERPOLATION OF WAVE SIGNALS IN THE BASIS OF BORDERING FUNCTIONS IN THE STUDY OF MECHANICAL AND OTHER PHYSICAL FIELDS

Research article

Sedov A.V. *
ORCID: 0000-0001-7515-3886,
Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia;
M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

* Corresponding author (sedov07[at]list.ru)

Abstract

A formula for trigonometric approximation and interpolation of signals based on the bordering functions is proposed, which simplifies the process of modeling and reconstructing changes of wave signals from measured samples. Proposed modifications of the formula for simultaneous parallel filtering of signals based on the use of families of new bordering and filtering functions. The advantages of using the proposed approach and formulas over the known ones are shown. The interrelation of the formula with the known sampling theorem of is shown.

Keywords: trigonometric approximation, bordering functions, parallel filtering, sampling theorem, wave signals.

На разных этапах регистрации и моделирования сигналов волновых и резонансных изменений механических и физических полей используют преобразования сигналов к частотам дискретизации, отличным от используемых при измерении. Решение последней задачи осуществляют на основе *интерполяции (аппроксимации)* сигналов с преобразованием исходного сигнала, измеренного с частотой дискретизации ω_1 в идентичный ему сигнал с более высокой частотой дискретизации ω_2. При этом задаются требуемым отношением частот $L = \omega_2/\omega_1$ или коэффициентом интерполяции.

К существующим подходам решения указанной задачи относят интерполяцию сигналов с использованием:

- цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и полифазных структур на основе этих фильтров;
- интерполирующих полиномов Лагранжа, Чебышева, Лежандра, тригонометрических полиномов различного вида, а также иных систем ортогональных базисных функций;
- статистических подходов и моделей;
- базисных функций Котельникова-Шеннона, ядер Дирихле и предлагаемых в [1, С.54] [2, С. 47] окаймляющих функций.

Кратко охарактеризуем перечисленные подходы. Нерекурсивные, симметричные цифровые фильтры с КИХ, описываются передаточной функцией вида

$$W(z) = \frac{x_и(z)}{x(z)} = \sum_{\ell=-N}^{N} b_\ell z^{-\ell} ,$$

где $x(z), x_и(z)$ – z-изображения преобразованного входного $x[kT/L]$, $k = 0,1,2,...$ и выходного $x_и[kT/L]$, $k = 0,1,2,...$ сигналов фильтра; b_ℓ – коэффициенты фильтра низкой частоты, обеспечивающие частоту среза π/T рад/с; $2N+1$ – порядок фильтра. Перед использованием фильтра исходный входной сигнал $x[kT]$, $k = 0,1,2,...$ «растягивают» *экспандером частоты* до сигнала $x[kT/L]$, $k = 0,1,2,...$ добавляя между его отсчетами по $L-1$ нулевому отсчету. Это обстоятельство делает невозможным использование фильтров с КИХ в случае дробного

значения *L*. Кроме того, цифровой фильтр не обеспечивают точного восстановления непрерывного сигнала по дискретным отсчетам или точной интерполяции сигнала, даже в случае выполнения условий теоремы дискретизации Котельникова, из-за не идеальности амплитудно- и фазо-частотных характеристик получаемого фильтра. Использование полифазных структур на основе переключающихся фильтров с КИХ также не решает перечисленных проблем.

Полиномы Лагранжа, Чебышева, Лежандра и другие, а также иные системы ортогональных базисных функций иногда применяются при интерполяции дискретных сигналов, особенно в случае нерегулярной дискретизации и восстановления сигналов. Однако если выбор частоты дискретизации сигналов осуществляют на основе теоремы дискретизации, что связано с гармоническим (частотным) представлением сигналов, использование полиномов для восстановления таких сигналов не вполне логично и в общем случае не обеспечивает точного его восстановления даже при выполнении указанной теоремы. Правомерно и адекватно применение в этом случае тригонометрических полиномов различного вида, в частности, представления в форме ряда Фурье.

Возможны статистические подходы и модели при интерполяции дискретных сигналов, в частности, модели случайных импульсных потоков, однако они применимы только при достаточном статистическом материале о сигнале, позволяющем использовать теорию вероятностей, теорию случайных функций, математическую статистику.

При детерминированной постановке задачи интерполяции наиболее соответствующими условиям теоремы дискретизации являются формулы, построенные на основе базисных функций Котельникова-Шеннона, ядер Дирихле и описываемых окаймляющих функций.

Исследования показали, что лучший результат при интерполяции конечного во времени сигнала $x(t)$ с ограниченным спектром по измеренным равномерным отсчетам $x[kT], k=\overline{0,N-1}$ дает использование окаймляющих функций $S_N^{t/T-k}$, предложенных в [1, С.54] [2, С. 47]. Формула интерполяции в этом случае имеет вид

$$x_{\text{int}}(t)=\sum_{k=0}^{N-1}x[kT]\left[\frac{1}{N}+\frac{2}{N}\sum_{n=1}^{<N/2>}\cos\left(2\pi n\left(\frac{t}{T}-k\right)/N\right)\right]=\sum_{k=0}^{N-1}x[kT]\ S_N^{t/T-k}. \tag{1}$$

Основными преимуществами формулы (1) является:

- получение гладкого неразрывного интерполируемого сигнала $x_{\text{int}}(t)$ без точек неопределенностей значений (разрывов);
- тригонометрическое представление окаймляющих функций $S_N^{t/T-k}$, определяет согласованность с условиями теоремы дискретизации;
- возможность быстрой вычислительной реализации интерполяции сигналов без предварительного вычисления спектра или коэффициентов разложения сигнала; подобно интерполирующему полиному Лагранжа, позволяющему осуществлять интерполяцию без предварительного вычисления коэффициентов, непосредственно «по узлам», но только в тригонометрическом базисе.

Выражение (1) условно можно рассматривать, как описывающее цифровой восстанавливающий фильтр не рекурсивного типа. Импульсная характеристика этого фильтра при этом совпадает с окаймляющей функцией $S_N^{t/T-k}$, а амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такого фильтра соответствует АЧХ идеального восстанавливающего фильтра низкой частоты. Это подтверждает, что (1) осуществляет абсолютно точное восстановление (интерполяцию) конечного сигнала по дискретным отсчетам, если они были выбраны в соответствии с условиями теоремы отсчетов Котельникова-Шеннона. В случае не полного выполнения этого условия (наличие не нулевых высокочастотных составляющих выше частоты дискретизации пополам $\omega_S/2$) формула реализует аппроксимацию сигнала.

Предлагается модификация выражения (1) вида

$$\begin{aligned}x_{\text{int}}(t)&=\sum_{k=0}^{N-1}x[kT]\left[\frac{1}{N}+\frac{2}{N}\sum_{n=<f_1\cdot N>}^{<f_2\cdot N>}\cos\left(2\pi n\left(\frac{t}{T}-k\right)/N\right)\right]=\\&=\sum_{k=0}^{N-1}x[kT]S_N^{t/T-k}\left(f_1,f_2\right),\end{aligned} \tag{2}$$

позволяющая помимо точной интерполяции (аппроксимации) осуществлять одновременно фильтрацию сигнала $x[kT], k=\overline{0,N-1}$, т.е. исключение из сигнала шумовых частотных составляющих. При этом в формуле f_1 и f_2 – относительные частоты среза фильтра задающие полосу пропускания фильтра (2) из полного частотного диапазона [0,0.5] или $\left[0,\omega_S/2\right]$; $S_N^{t/T-k}\left(f_1,f_2\right)$ – окаймляюще-фильтрующая функция первого рода.

Фильтрацию сигнала, осуществляемую с помощью выражения (2), назовем *одновременной параллельной фильтрацией,* т.к. при фильтрации используются одновременно все отсчеты сигнала отрезка наблюдения $[0,T_c]$. Выражение (2) определяет полосовой фильтр с полосой пропускания [f_1, f_2], однако небольшая ее модификация позволяет реализовать многополосные фильтры по формуле вида

$$\begin{aligned}x_{\text{int}}(t)&=\sum_{k=0}^{N-1}x[kT]\left[\frac{1}{N}i_0+\frac{2}{N}\sum_{n=\{i_1,i_2,...,i_S\}}\cos\left(2\pi n\left(\frac{t}{T}-k\right)/N\right)\right]=\\&=\sum_{k=0}^{N-1}x[kT]S_N^{t/T-k}\left(i_0,i_1,i_2,...,i_S\right),\end{aligned} \tag{3}$$

где $S_N^{t/T-k}\left(i_0,i_1,i_2,...,i_S\right)$ – окаймляюще-фильтрующая функция второго рода.

Индексы i_1, i_2,…, i_S определяют номера гармоник, которые должны оставаться в фильтрованном и интерполированном сигнале. Эти индексы выбираются из диапазона номеров гармоник присутствующих в сигнале 1÷<N/2>. Индекс i_0={0 или 1} определяет необходимо ли уничтожить или оставить в сигнале постоянную составляющую. Каждый из индексов $i_1,i_2,\ldots,i_S$ определяет присутствие в спектре функции $S_N^{t/T-k}\left(i_0,i_1,i_2,...,i_S\right)$, той или иной частотной составляющей с амплитудой равной единице.

Использование окаймляющих функций позволяет по новому сформулировать теорему отсчетов Котельникова-Шеннона для конечного сигнала $x(t)$ с ограниченным спектром, заданным равноотстоящими отсчетами $x[kT], k=\overline{0,N-1}$. В отличие от известной теоремы отсчетов [3, С. 405] [4, С. 160] [5, С. 232] [6, С. 320] [7, С. 260], сформулированной только для бесконечного во времени сигнала $x(t)$ и использующей формулу интерполяции на основе ядра Котельникова-Шеннона (sinc-функции), предложенная формула (1) использующая окаймляющие функции $S_N^{t/T-k}$ расширена и на случай интерполяции конечного во времени сигнала.

Более того, не сложно показать, что sinc-функция (ядро Котельникова-Шеннона) является частным предельным случаем предложенной окаймляющей функции $S_N^{t/T-k}$ при $N\to\infty$ [8, С. 323].

Теорема отсчетов (для конечного во времени сигнала и равно отстоящих отсчетов). Конечный во времени непрерывный сигнал $x(t)$, рассматриваемый на интервале наблюдения $t\in[0,T_C)$, как период бесконечного сигнала $x(t)$ со спектром ограниченным полосой частот $[0, f_в]$ может быть точно восстановлен по формуле (1) на основе равноотстоящих дискретных значений $x[kT]$, k=0,…,N-1 интервала наблюдения $T_C = NT$, выбранных с интервалом дискретизации $T<1/(2f_в)$ и с использованием окаймляющих базисных функций $S_N^{t/T-k}$.

Из предельной взаимосвязи sinc-функций и окаймляющих функций можно сделать вывод, что и общеизвестная теорема Котельникова-Шеннона [9, С. 402] [10, С. 130] [11, С. 253] может рассматриваться как *частный случай при* $N\to\infty$ сформулированной выше теоремы отсчетов для конечного во времени сигнала.

Финансирование

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания Южного научного центра РАН, проект 0256-2018-0003, № госрегистрации 01201354242 и гранта РФФИ 18-08-01012.

Funding

The work was performed within the framework of the State assignment implementation of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, project 0256-2018-0003, state registration number 01201354242 and RFBR grant 18-08-01012.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Седов А. В. Уточнение теоремы дискретизации и формулы восстановления сигнала по дискретным отсчетам / А. В. Седов // Известия вузов. Электромеханика. – 2001. – № 2. – С.52-59.

2. Седов А. В. Интерполяция и фильтрация сигналов в многоскоростных микропроцессорных системах моделирования, контроля и управления. / А. В. Седов // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 4. – С. 45-50.

3. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication / C .E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – July, October. – Vol. 27. – P. 379–423, 623–656.

4. Горелов Г. В. Нерегулярная дискретизация сигналов / Г. В. Горелов – М.: Радио и связь, 1982. – 255 с.

5. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов / А. М. Трахтман – М.: Советское Радио, 1972. – 352 с.

6. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / S. W. Smith – California Technical Publishing, 1997 – 630 p.

7. Носач В. В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров / В. В. Носач – М.: МИКАП, 1994. – 382 с.

8. Седов А. В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами: декомпозиционный подход / А. В. Седов – М.: Наука, 2010. – 438 с.

9. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. / C. E. Shannon // Bell System Tech. J. – 1948. – № 27. – P. 379-423.

10. Котельников В. А. О пропускной особенности «эфира» и проволоки в электросвязи / В. А. Котельников // Матер. к I Всесоюзн. съезду по вопросу реконструкции дела связи. – Изд. ред. упр. связи РККА, 1933.– С. 128-133.

11. Whittaker J. M. Interpolatory Function Theory / J. M. Whittaker –Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1935. – 320 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sedov A. V. Utochnenie teoremy diskretizacii i formuly vosstanovleniya signala po diskretnym otschetam [A refinement of the samples theorem and the formula for reconstructing a signal from discrete samples] / A. V. Sedov // Izvestiya vuzov. EHlektromekhanika [Proceedings of high schools. Electromechanics] – 2001. – № 2. – P. 52-59. [in Russian]

2. Sedov A. V. Interpolyaciya i fil'traciya signalov v mnogoskorostnyh mikroprocessornyh sistemah modelirovaniya, kontrolya i upravleniya [Interpolation and filtering of signals in multi-speed microprocessor systems for modeling, control and management] / A. V. Sedov // Izvestiya vuzov. EHlektromekhanika [Proceedings of high schools. Electromechanics] – 2003. – № 4. – P. 45-50. [in Russian]

3. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – July, October. – Vol. 27. – P. 379–423, 623–656.

4. Gorelov G. V. Neregulyarnaya diskretizaciya signalov [Irregular sampling of signals] / G. V. Gorelov – M.: Radio i svyaz', 1982. – 255 p. [in Russian]

5. Trahtman A. M. Vvedenie v obobshchennuyu spektral'nuyu teoriyu signalov [Introduction to the generalized spectral theory of signals] / A. M. Trahtman – M.: Sovetskoe Radio, 1972. – 352 p. [in Russian]

6. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / S. W. Smith – California Technical Publishing, 1997 – 630 p.

7. Nosach V. V. Reshenie zadach approksimacii s pomoshch'yu personal'nyh komp'yuterov [Solution of approximation problems with the help of personal computers] / V.V. Nosach – M.: MIKAP, 1994. – 382 p. [in Russian]

8. Sedov A. V . Modelirovanie ob"ektov s diskretno-raspredelennymi parametrami: dekompozicionnyj podhod [Modeling objects with discrete-distributed parameters: decomposition approach] / A. V. Sedov – M.: Nauka, 2010. – 438 p. [in Russian]

9. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. / C. E. Shannon // Bell System Tech. J. – 1948. – № 27. – P. 379-423.

10. Kotel'nikov V. A. O propusknoj osobennosti «ehfira» i provoloki v ehlektrosvyazi [On the bandwidth characteristic of "ether" and wire in telecommunications] / V. A. Kotel'nikov // Mater. k I Vsesoyuzn. s"ezdu po voprosu rekonstrukcii dela svyazi [Materials for the First All-Union Congress on the reconstruction of the communications business.] – Edition red. upr. svyazi RKKA, 1933.– P. 128-133. [in Russian]

11. Whittaker J. M. Interpolatory Function Theory / J. M. Whittaker –Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1935. – 320 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.009

СТАТИСТИКА МОДОВОГО СОСТАВА ВИХРЕВЫХ МАТРИЧНЫХ ПУЧКОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В АТМОСФЕРЕ

Научная статья

Аксенов В.П.[1], Дудоров В.В.[2], Колосов В.В.[3], Филимонов Г.А.[4, *]
[2] ORCID: 0000-0002-9660-5199;
[4] ORCID: 0000-0003-4358-423X;
[1, 2, 3, 4] Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

* Корреспондирующий автор (fga[at]iao.ru)

Аннотация

В работе анализируется модовый состав излучения вихревых матричных лазерных пучков, синтезированных матрицей когерентных оптоволоконных излучателей. На основе численного моделирования анализируется перекачка энергии между вихревыми азимутальными модами излучения при распространении в свободном пространстве и турбулентной атмосфере. Показано, что в дальней зоне большая часть энергии излучения перекачивается в основную моду, определяемую топологическим зарядом синтезированного пучка. При наличии турбулентности статистические характеристики модового состава синтезированного вихревого матричного пучка аналогичны характеристикам Лагерр-Гауссова пучка.

Ключевые слова: вихревые лазерные пучки, массив когерентных излучателей, турбулентная атмосфера.

STATISTICS OF MODE CONTENT OF VORTEX MATRIX BEAMS DURING DISTRIBUTION IN ATMOSPHERE

Research article

Aksenov V.P.[1], Dudorov V.V.[2], Kolosov V.V.[3], Filimonov G.A.[4, *]
[2] ORCID: 0000-0002-9660-5199;
[4] ORCID: 0000-0003-4358-423X;
[1, 2, 3, 4] V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

* Corresponding author (fga[at]iao.ru)

Abstract

This paper analyzes the mode composition of the radiation from vortex matrix laser beams synthesized by a coherent fiber-optic emitter matrix. The energy transfer between the vortex azimuthal radiation modes during propagation in free space and turbulent atmosphere is analyzed on the basis of numerical simulation. It is shown that most of the radiation energy is pumped into the main mode in the far-field zone, which is determined by the topological charge of the synthesized beam. Statistical characteristics of the mode composition of the synthesized vortex matrix beam are similar to those of the Laguerre-Gaussian beam in case of turbulence.

Keywords: vortex laser beams, array of coherent emitters, turbulent atmosphere.

Последнее время внимание исследователей привлекает технология сложения излучения массива когерентных излучателей [1-6]. По своим характеристикам массив таких излучателей может превосходить системы на основе традиционных телескопов [7]. В задачах оптической связи важной является возможность генерации вихревых лазерных пучков [8], которые сохраняют орбитальный угловой момент (ОУМ) [9-13] при распространении излучения от передатчика к приемнику [14]. Синтез вихревых пучков на основе сложения излучения массива когерентных излучателей [15] характеризуется особенностью при определении их ОУМ [16]. При этом общий ОУМ пучка в силу закона сохранения момента равен нулю, а ОУМ, определяемый в пределах ограниченной апертуры в дальней зоне, совпадает с топологическим зарядом синтезированного матричного вихревого пучка. Очевидно, что из-за интерференции излучения субапертур по мере распространения таких пучков в свободном пространстве их модовый состав будет меняться. Кроме того, наличие турбулентных неоднородностей на трассе распространения будет вызывать искажения и перераспределять энергию излучения между модами. В связи с этим в настоящей работе выполнено исследование динамики и флуктуаций азимутального модового состава вихревых синтезированных матричных пучков при их распространении в турбулентной атмосфере.

Начальное поле синтезированного матричного вихревого пучка представим в виде суммы полей на N_a субапертурах матрицы волоконных лазеров в следующем виде:

$$E(x,y,z=0)=\sum_{sub=1}^{N_a} E_{sub}(x,y,z=0) \tag{1}$$

$$E_{sub}(x,y,z=0)=A_{sub}(x-x_c^{sub},y-y_c^{sub})\exp[il\theta_c^{sub}] \tag{2}$$

$$A_{sub}(x,y)=\begin{cases}\exp\left(-\dfrac{x^2+y^2}{a_{sub}^2}\right), & x^2+y^2\le a_{sub}^2\\ 0, & x^2+y^2>a_{sub}^2\end{cases} \tag{3}$$

$$\theta_c^{sub} = arc\tan\left(\frac{y_c^{sub}}{x_c^{sub}}\right) \tag{4}$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ и $\theta = \arctan(y/x)$ полярные координаты, l – значение топологического заряда, x_c^{sub} и y_c^{sub} - координаты центра, a_{sub} – радиус субапертуры. При этом в случае гексагональной упаковки субпучков отсутствует центральный субпучок с координатами x=0, y=0. Кроме этого при формировании синтезированного пучка из нескольких колец субпучков (N_a = 18, 36, 60 и т.д.) также могут отсутствовать внутренние кольца. Анализ особенностей генерации и распространения таких пучков в турбулентной атмосфере выполнен на основе сравнения с полем Лагерр-Гауссова пучка [17] радиуса a:

$$E(r,\theta,z=0) = \left(\sqrt{2}\frac{r}{a}\right)^l L_m^l\left(\frac{2r^2}{a^2}\right)\exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right)\exp[il\theta] \tag{5}$$

Начальные распределения амплитуды и фазы поля Лагерр-Гауссового пучка для топологического заряда $l = 1$ представлены на рис.1 (слева). Справа представлены несколько аналогичных распределений для синтезированных матричных пучков с различным количеством субапертур.

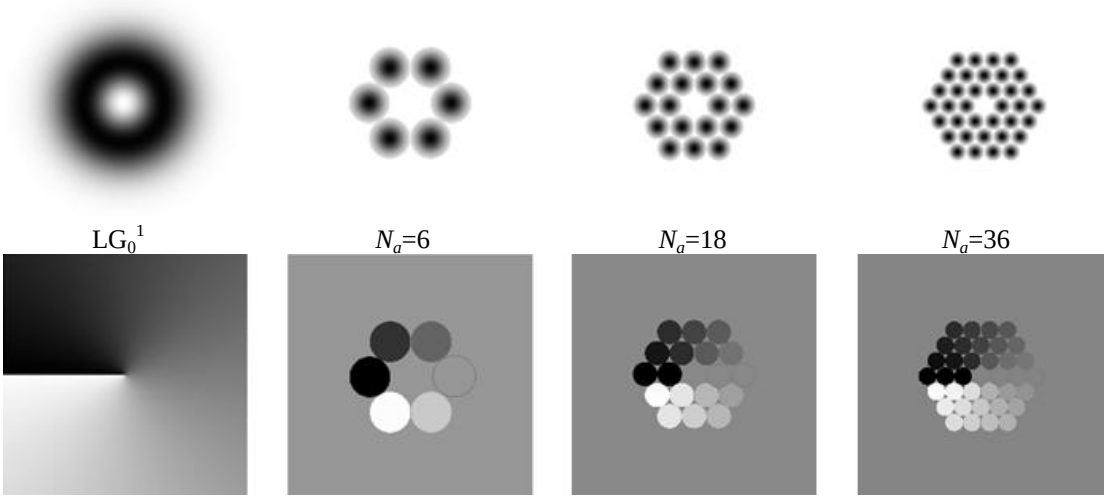


Рис. 1 – Амплитуда (верхний ряд) и фаза (нижний) Лагерр-Гауссова и синтезированного вихревого пучка при разном количестве субапертур N_a. l = 1

Примечание: здесь и далее шкала яркости для амплитуды поля от 0 то максимального значения, для фазы поля от 0 до 2π.

Видно, что чем больше количество субапертур, составляющих синтезированный вихревой пучок фиксированного радиуса, тем меньше радиус отдельной субапертуры.

Распространение пучков в атмосфере будем рассчитывать, используя параболическое уравнение

$$2ik\frac{\partial E(x,y,z,t)}{\partial z} = \nabla_\perp^2 E(x,y,z,t) + 2k^2 n_1(x,y,z)E(x,y,z,t) \tag{6}$$

где, $\nabla_\perp^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ – оператор Лапласа, $n_1(x,y,z)$ – возмущение показателя преломления воздуха относительно своего равновесного значения n_0, и $k = 2\pi n_0/\lambda$ - волновое число. Возмущение показателя преломления $n_1(x,y,z)$ будем считать однородным, изотропным и Колмогоровским [18], [19].

Алгоритм численного решения (6) на основе метода расщепления по физическим факторам [20] впервые был описан в работе [21], где было введено понятие тонкого фазового экрана, представляющего собой модель турбулентного слоя атмосферы. Долгое время в численных экспериментах использовались ограниченные (конечные) фазовые экраны. В [22] предложена численная модель бесконечного турбулентного фазового экрана для моделирования продолжительных экспериментов. Параллельная реализация численных алгоритмов решения (6) описана в [23]. В [24] показана возможность использования в моделировании экспериментальных данных измерений параметров атмосферы. В [25], [26] предлагаются подходы, учитывающие регулярную рефракцию, связанную с нелинейной зависимостью показателя преломления от высоты, а также случайные рефракционные эффекты на крупномасштабных турбулентных неоднородностях, которые могут приводить к значительным вертикальным и горизонтальным отклонениям траектории распростренения лазерных пучков от прямой линии.

Рассмотрим распространение синтезированного матричного вихревого пучка в вакууме Расчитанные распределения амплитуды и фазы поля на различной дистанции от начальной плоскости представлены на рис. 2. Очевидно, что неоднородная интерференционная структура поля на начальном участке трассы распространения будет вносить искажения в значение ОУМ.

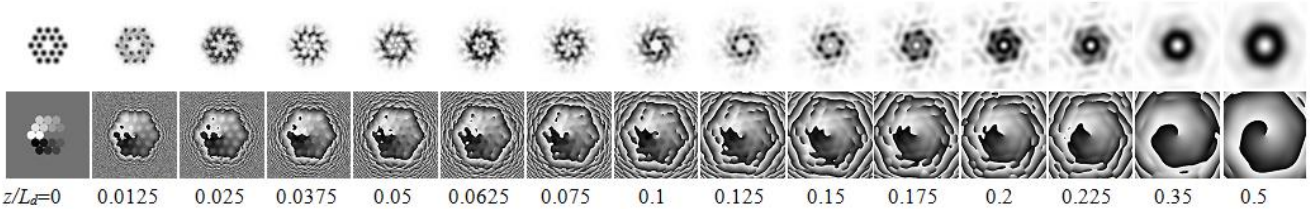


Рис. 2 – Динамика амплитуды и фазы поля синтезированного вихревого пучка (l = 1) при распространении в вакууме

Оценку влияния неоднородной структуры поля синтезированного пучка на его характеристики можно выполнить на основе разложении поля по азимутальным модам вихревого пучка следующего вида:

$$E(r,\varphi,z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sum_{n=-\infty}^{\infty}a_l(r,z)\,e^{in\varphi} \tag{7}$$

$$a_n(r,z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{2\pi}d\varphi E(r,\varphi,z)\,\mathrm{e}^{-in\varphi} \tag{8}$$

Далее для идентификации топологического заряда синтезированного вихревого пучка необходимо вычислить долю энергии, соответствующую модам разного порядка n.

$$P_n(z)=\frac{c_n(z)}{\sum_{i=-\infty}^{\infty}c_i(z)} \tag{9}$$

$$c_n(z)=\int_0^{\infty}rdr\;\left|a_n(r,z)\right|^2 \tag{10}$$

На рис. 3 представлена динамика энергии мод P_n синтезированного вихревого пучка с топологическим зарядом l = 1, сфокусированного на дистанцию $z = 0.1ka^2$ (а), 0.2 (б), 0.5 (в) в вакууме.

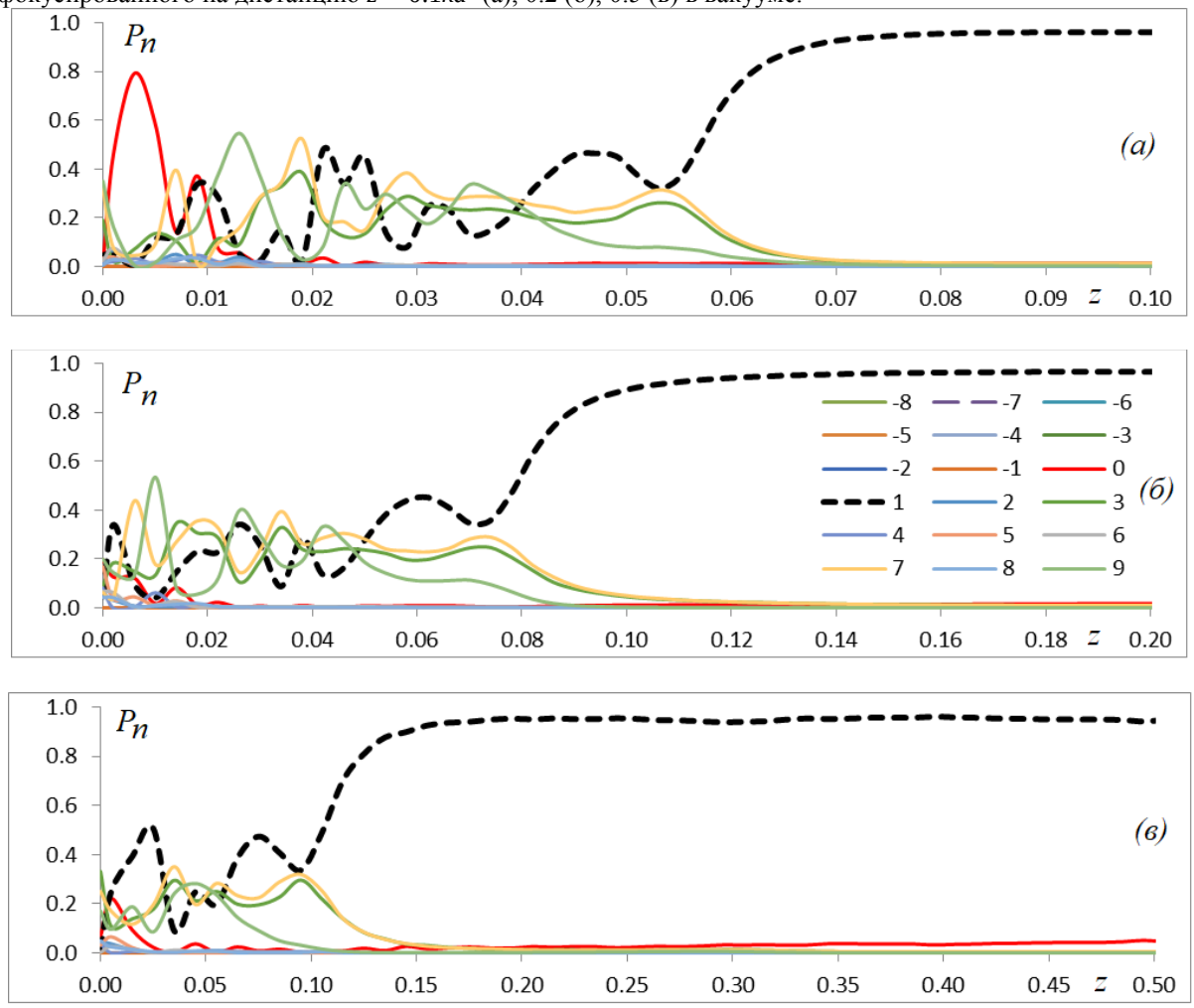


Рис. 3 – Динамика энергии мод P_n синтезированного вихревого пучка с топологическим зарядом l = 1, сфокусированного на дистанцию $z = 0.1ka^2$ (а), 0.2 (б), 0.5 (в) в вакууме

Примечание: Синтезированный вихревой пучок аналогичен представленному на рис.2.

Видно, что в отличие от непрерывного вихревого пучка при распространении синтезированного пучка на начальном участке трассы распространения происходит перекачка энергии между модами, соответствующими разным значениям n. При этом по мере распространения энергия моды $n = 1$, порядок которой равен заданному топологическому заряду $l = 1$, возрастает и испытывает насыщение на уровне 95%. Выход на уровень насыщения соответствует дистанциям распространения более 0.1 длины дифракции для коллимированных пучков и существенно сокращается при фокусировке пучков.

Наличие турбулентности на трассе распространения изменяет модовый состав пучка. На рисунке 4 представлены зависимости среднего значения и стандартного отклонения энергии моды от дистанции распространения.

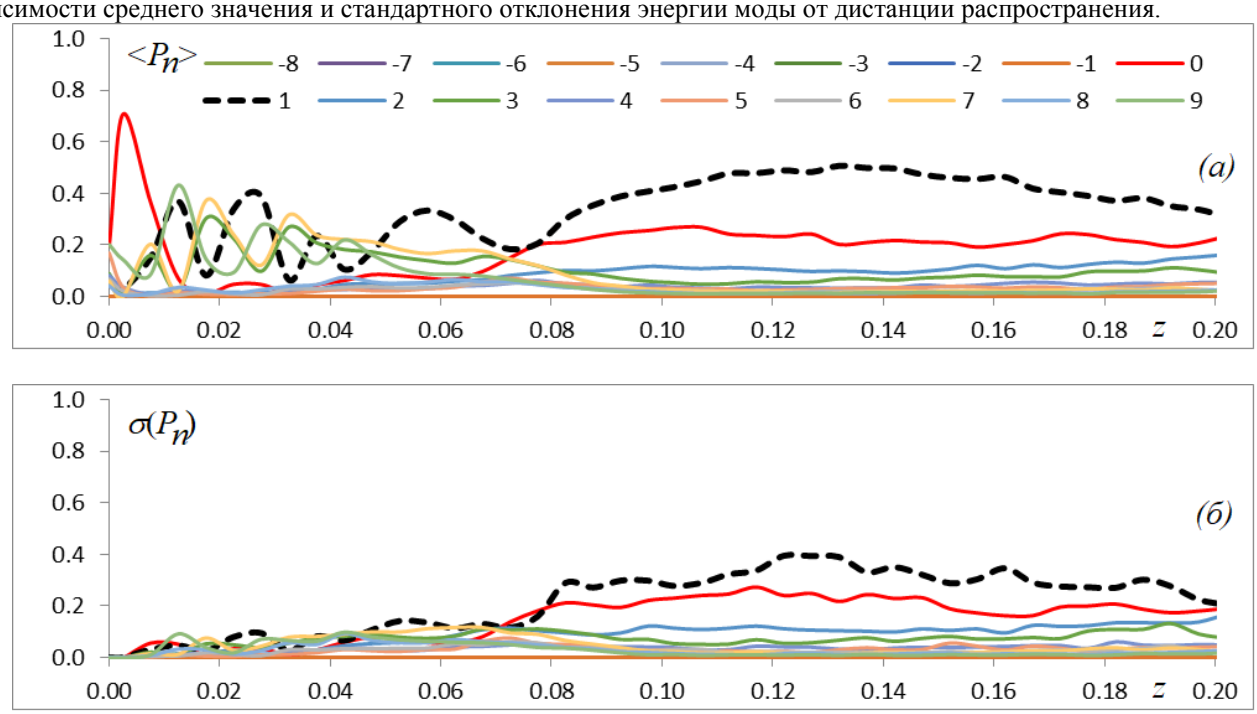


Рис. 4 – Зависимость среднего значения (а) и стандартного отклонения (б) энергии моды P_n при распространении синтезированного матричного пучка в турбулентной атмосфере на дистанцию $z = 0.2ka^2$. $l = 1$, $D/r_0 = 4$

Видно, что характер данных кривых для дистанций, соответствующих выходу на насыщение энергии синтезируемой моды (см. рис.3), аналогичен зависимостям, полученным для непрерывного Лагерр-Гауссова пучка. Уровень насыщения энергии синтезируемой моды в турбулентности становится ниже, чем уровень насыщения для вакуума за счет случайной перекачки энергии из основной моды в соседние. Чем больше соотношение D/r_0, характеризующее силу турбулентности, тем меньше становится различие между уровнями энергии различных мод, независимо от того, какая из них является главной (синтезированной).

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №18-19-00437).

Funding

The article was prepared based on the results of the work carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 18-19-00437).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Filimonov G. A. Performance analysis of a coherent tiled fiber-array beam director with near-field phase locking and programmable control of tip/tilt and piston phases / Filimonov G. A., Vorontsov M. A., Lachinova S. L. // Proc. SPIE 8971, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI. – 2014. – 897109.

2. Banakh V. A. Numerical simulation of propagation of laser beams formed by multielement apertures in a turbulent atmosphere under thermal blooming / Banakh V. A., Falits A. V. // Atmospheric and oceanic optics. – 2013. – V. 26. – № 6. – P. 455–465.

3. Weyrauch T. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path / Weyrauch T., Vorontsov M. A., Carhart G. W and others // Opt. Lett. – 2011. – V. 36. – № 22. – P. 4455–4457.

4. Воронов В. И. Поле в дальней зоне многоволоконного излучателя при угловой разъюстировке первичного источника / Воронов, В. И., Нурамов, Ф. Н., Аль, Т. И. // Нелинейный мир. – 2017. – Т. 15. – № 1. – С. 54–57.

5. Hyde, M. W. Behavior of tiled-aperture arrays fed by vector partially coherent sources / Hyde, M. W., & Spencer, M. F. // Applied optics. – 2018. – V. 57. – № 22. – P. 6403–6409.

6. Антипов О. Л. Адаптивная коррекция искажений, возникающих в многоканальной оптической системе / Антипов О. Л., Канев Ф. Ю., Цыро Е.И и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 9. – С. 801–809.

7. Vorontsov M. A. Comparative efficiency analysis of fiber-array and conventional beam director systems in volume turbulence / Vorontsov M. A., Filimonov G. A., Ovchinnikov V. and others // Appl. Opt. – 2016. – V. 55. – P. 4170–4185.

8. Aksenov V. P. Orbital angular momentum of laser beam in the turbulent medium: asymptotic estimates and numerical simulation / Aksenov V.P., Kolosov V.V., Filimonov G.A. and Pogutsa Ch.E. // Proc. of SPIE. – 2015. – V. 9680. P. 96800P-1-6.

9. Jackson J. D. Classical Electrodynamics / J. D. Jackson. – New York: Wiley, 1999.

10. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre–Gaussian laser modes / Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C. and others // Phys. Rev. A. – 1992. – V. 45. – P. 8185

11. Bekshaev A. Paraxial Light Beams with Angular Momentum / Bekshaev A, Soskin M. and Vasnetsov M.. — New York: Nova Science, 2008.

12. Yao A. M. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications / Yao A. M. and Padgett M. J. // Adv. Opt. Photon. – 2011. – V. 3. – P. 161–204

13. Soskin, M. Singular optics and topological photonics / Soskin, M., Boriskina, S.V., Chong, Y., Dennis, M.R., & Desyatnikov, A. // Journal of Optics. – 2016. – V. 19. – № 1. – P. 010401.

14. Aksenov V. P. Orbital angular momentum of a laser beam in a turbulent medium: preservation of the average value and variance of fluctuations / Aksenov V. P., Kolosov V. V., Filimonov G. A. and others // Journal of Optics. – 2016. – V. 18. – № 5. – P. 054013.

15. Аксенов В. П. Особенности вихревых пучков, сформированных матрицей волоконных лазеров, и их распространение в турбулентной атмосфере / Аксенов В. П., Дудоров, В. В., Колосов В. В. // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – № 8. – С. 726–732.

16. Aksenov V. P. Vortex beams with zero orbital angular momentum and non-zero topological charge / Aksenov V. P., Dudorov V. V., Filimonov G. A. and others // J. Opt. Laser Technol. – 2018. – V. 104. – P. 159–163.

17. Фалиц А. В. Блуждание и флуктуации интенсивности фокусированного Лагерр–Гауссова пучка в турбулентной атмосфере / Фалиц А. В. // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – № 9. – С. 763-771.

18. Tatarskii V. I. Wave Propagation in a Turbulent Medium. — New York: McGraw-Hill, 1961.

19. Kolmogorov A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers / Kolmogorov A. N. // Dokl. Akad. Nauk SSSR. – 1941. – T. 30. – C. 299–303.

20. Марчук Г. И. Методы расщепления / Г. И. Марчук. — М.: Наука, 1980.

21. Fleck J. A. Time Dependent Propagation of High Energy Laser Beams through the Atmosphere / Fleck J. A., Morris J.R., Feit M.D. // Appl. Phys. A. – 1976. – V. 10. – P. 129–160.

22. Дудоров В. В. Алгоритм формирования бесконечных турбулентных экранов для моделирования долговременных лазерных экспериментов в атмосфере / Дудоров В.В., Колосов В.В., Филимонов Г.А. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2006. – Т. 309. – № 8. – С. 85–89.

23. Коняев П. А. Численное моделирование распространения оптических волн с использованием технологий параллельного программирования / Коняев П. А., Тартаковский Е. А., Филимонов Г. А. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 5. – С. 359–365.

24. Kulikov V. A. Simulation of laser beam propagation based on mesoscale modeling of optical turbulence and refractivity / Kulikov V.A., Basu S., Vorontsov M.A. // OSA Conference: Propagation Through and Characterization of Atmospheric and Oceanic Phenomena, PTh3D-3, 26–29 June 2017, San-Francisco, USA, 2017

25. Kolosov V. V. Accounting for the effect of large-scale atmospheric inhomogeneities in problems of laser radiation propagation along long high-altitude paths / Kolosov, V.V., Dudorov, V.V., Filimonov, G.A., Panina, A.S., Vorontsov, M.A. // Atmos Ocean Opt. – 2014. – V. 27. – № 2. – P. 123–129.

26. Kulikov V. A. Analysis of the joint impact of atmospheric turbulence and refractivity on laser beam propagation / Kulikov, V. A., Vorontsov, M. A. // Opt. Express. – 2017. – V. 25. – P. 28524–28535.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Filimonov G. A. Performance analysis of a coherent tiled fiber-array beam director with near-field phase locking and programmable control of tip/tilt and piston phases / Filimonov G.A., Vorontsov M.A., Lachinova S.L. // Proc. SPIE 8971, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI. – 2014. – 897109.

2. Banakh V.A. Numerical simulation of propagation of laser beams formed by multielement apertures in a turbulent atmosphere under thermal blooming / Banakh V.A., Falits A.V. // Atmospheric and oceanic optics. – 2013. – V. 26. – № 6. – P. 455–465.

3. Weyrauch T. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path / Weyrauch T., Vorontsov M.A., Carhart G.W., Beresnev L.A., Rostov A.P., Polnau E.E., Liu J.J. // Opt. Lett. – 2011. – V. 36. – № 22. – P. 4455–4457.

4. Voronov V. I. Pole v dal'nej zone mnogovolokonnogo izluchatelja pri uglovoj razjustirovke pervichnogo istochnika [Field in the far zone of the multi-fiber emitter at angular separation of the primary source] / Voronov, V. I., Nuramov, F. N.,Al', T. I. // Nelinejnyj mir. – 2017. – T. 15. – № 1. – P. 54–57. [in Russian]

5. Hyde, M. W. Behavior of tiled-aperture arrays fed by vector partially coherent sources / Hyde, M. W., & Spencer, M. F. // Applied optics. – 2018. – V. 57. – № 22. – P. 6403–6409.

6. Antipov O.L. Adaptivnaja korrekcija iskazhenij, voznikajushhih v mnogokanal'noj opticheskoj sisteme [Adaptive correction of distortions arising in a multichannel optical system] / Antipov O.L., Kanev F.Ju., Cyro E.I. and others // Optika atmosfery i okeana. – 2012. – T. 25. – № 9. – P. 801–809. [in Russian]

7. Vorontsov M.A. Comparative efficiency analysis of fiber-array and conventional beam director systems in volume turbulence / Vorontsov M.A., Filimonov G.A., Ovchinnikov V., Polnau E., Lachinova S.L., Weyrauch T., Mangano J. // Appl. Opt. – 2016. – V. 55. – P. 4170–4185.

8. Aksenov V.P. Orbital angular momentum of laser beam in the turbulent medium: asymptotic estimates and numerical simulation / Aksenov V.P., Kolosov V.V., Filimonov G.A. and Pogutsa Ch.E. // Proc. of SPIE. – 2015. – V. 9680. P. 96800P-1-6.

9. Jackson J.D. Classical Electrodynamics. – New York: Wiley, 1999.

10. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre–Gaussian laser modes / Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C. and Woerdman J.P. // Phys. Rev. A. – 1992. – V. 45. – P. 8185

11. Bekshaev A, Soskin M. and Vasnetsov M. Paraxial Light Beams with Angular Momentum. — New York: Nova Science, 2008.

12. Yao A.M. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications / Yao A.M. and Padgett M.J. // Adv. Opt. Photon. – 2011. – V. 3. – P. 161–204

13. Soskin, M. Singular optics and topological photonics / Soskin, M., Boriskina, S.V., Chong, Y., Dennis, M.R., & Desyatnikov A. // Journal of Optics. – 2016. – V. 19. – № 1. – P. 010401.

14. Aksenov V.P. Orbital angular momentum of a laser beam in a turbulent medium: preservation of the average value and variance of fluctuations / Aksenov V.P., Kolosov V.V., Filimonov G.A., Pogutsa C.E. // Journal of Optics. – 2016. – V. 18. – № 5. – P. 054013.

15. Aksenov V. P. Osobennosti vihrevyh puchkov, sformirovannyh matricej volokonnyh lazerov, i ih rasprostranenie v turbulentnoj atmosphere [Features of vortex beams formed by the fiber laser matrix and their propagation in a turbulent atmosphere] / Aksenov V.P., Dudorov, V.V., Kolosov V.V. // Kvantovaja jelektronika. – 2016. – T. 46. – № 8. – P. 726–732. [in Russian]

16. Aksenov V. P. Vortex beams with zero orbital angular momentum and non-zero topological charge / Aksenov V.P., Dudorov V.V., Filimonov G.A., Kolosov V.V., and Venediktov V.Y. // J. Opt. Laser Technol. – 2018. – V. 104. – P. 159–163.

17. Falic A.V. Bluzhdanie i fluktuacii intensivnosti fokusirovannogo Lagerr–gaussova puchka v turbulentnoj atmosphere [Wandering and fluctuations of the intensity of a focused Laguerre-Gaussian beam in a turbulent atmosphere] / Falic A.V. // Optika atmosfery i okeana. – 2015. – T. 28. – № 9. – P. 763-771. [in Russian]

18. Tatarskii V. I. Wave Propagation in a Turbulent Medium. — New York: McGraw-Hill, 1961.

19. Kolmogorov A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers / Kolmogorov A. N. // Dokl. Akad. Nauk SSSR. – 1941. – T. 30. – C. 299–303.

20. Marchuk G. I. Metody rasshheplenija [Splitting method] / G. I. Marchuk — M.: Nauka, 1980. [in Russian]

21. Fleck J. A. Time Dependent Propagation of High Energy Laser Beams through the Atmosphere / Fleck J.A., Morris J.R., Feit M.D. // Appl. Phys. A. – 1976. – V. 10. – P. 129–160.

22. Dudorov V. V. Algoritm formirovanija beskonechnyh turbulentnyh jekranov dlja modelirovanija dolgovremennyh lazernyh jeksperimentov v atmosphere [An algorithm for the formation of infinite turbulent screens for modeling long-term laser experiments in the atmosphere] / Dudorov V.V., Kolosov V.V., Filimonov G.A. // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2006. – T. 309. – № 8. – P. 85–89. [in Russian]

23. Konjaev P.A. Chislennoe modelirovanie rasprostranenija opticheskih voln s ispol'zovaniem tehnologij parallel'nogo programmirovanija [Numerical simulation of optical wave propagation using parallel programming technologies] / Konjaev P.A., Tartakovskij E.A., Filimonov G.A. // Optika atmosfery i okeana. – 2011. – T. 24. – № 5. – P. 359–365. [in Russian]

24. Kulikov, V.A. Simulation of laser beam propagation based on mesoscale modeling of optical turbulence and refractivity / Kulikov V.A., Basu S., Vorontsov M.A. // OSA Conference: Propagation Through and Characterization of Atmospheric and Oceanic Phenomena, PTh3D-3, 26–29 June 2017, San-Francisco, USA, 2017

25. Kolosov, V.V. Accounting for the effect of large-scale atmospheric inhomogeneities in problems of laser radiation propagation along long high-altitude paths / Kolosov, V.V., Dudorov, V.V., Filimonov, G.A., Panina, A.S., Vorontsov, M.A. // Atmos Ocean Opt. – 2014. – V. 27. – № 2. – P. 123–129.

26. Kulikov, V. A. Analysis of the joint impact of atmospheric turbulence and refractivity on laser beam propagation / Kulikov, V. A., Vorontsov, M. A. // Opt. Express. – 2017. – V. 25. – P. 28524–28535.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.010

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Научная статья

Юртаева Т.П.[1, *], Рудин А.В.[2], Сабурова Д.А.[3], Серсков В.Ю.[4], Денисова О.М.[5], Журина А.Е.[6]

[1] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[2] ORCID: 0000-0002-1825-0023;
[3] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[4] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[5] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[6] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[1, 2, 3, 4, 5, 6] Пензенский государственный университет; Пенза, Россия

* Корреспондирующий автор (yurtaeva.2019[at]inbox.ru)

Аннотация

Приведено описание лабораторной установки для исследования температурной зависимости фототока полупроводниковых фоторезисторов и результаты экспериментальных измерений времени жизни неосновных носителей фототока проводимости, в зависимости от температуры и частоты световых волн облучения. Установлено, что температурная зависимость времени жизни неосновных носителей фототока в исследованных полупроводниковых фоторезисторах при освещении светом зеленого спектра носит линейный характер. С увеличением температуры величина времени жизни, с точностью до статистического распределения измеряемой величины, монотонно убывает. Зависимость времени жизни неосновных носителей тока от частоты световых волн носит почти линейный характер. С увеличением длины волны облучаемого света время жизни неосновных носителей фототока монотонно увеличивается.

Ключевые слова: фототок, фоторезистор, время жизни, неосновные носители тока, длина волны, частота, температура, рекомбинация.

STUDY OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF SEMICONDUCTOR PHOTORESISTORS

Research article

Yurtaeva T.P.[1, *], Rudin A.V.[2], Saburova D.A.[3], Serskov V.Yu.[4], Denisova O.M.[5], Zhurina A.E.[6]

[1] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[2] ORCID: 0000-0002-1825-0023;
[3] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[4] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[5] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[6] ORCID: 0000-0002-1825-0097;
[1, 2, 3, 4, 5, 6] Penza State University; Penza, Russia

* Corresponding author (yurtaeva.2019[at]inbox.ru)

Abstract

A description is given of a laboratory setup for studying the temperature dependence of the photocurrent of semiconductor photoresistors and the results of experimental measurements of the lifetime of minority carriers of a photocurrent of conductivity depending on the temperature and frequency of light irradiation waves. It is established that the temperature dependence of the lifetime of minority photocurrent carriers in the studied semiconductor photoresistors is linear when illuminated with the green spectrum light. The magnitude of the lifetime monotonously decreases with an increase in temperature up to a statistical distribution of the measured quantity. The dependence of the lifetime of minority carriers on the frequency of light waves is almost linear. The lifetime of the minority carriers of the photocurrent monotonously increases with an increase in the wavelength of the irradiated light.

Keywords: photocurrent, photoresistor, lifetime, minority current carriers, wavelength, frequency, temperature, recombination.

Полупроводниковые фоторезисторы в настоящее время широко используются в автоматике и оптоэлектронике. В цепях автоматических электронных устройств фоторезисторы выполняют функцию преобразователей физических параметров и используются в качестве датчиков счета импульсов, датчиков габаритов различных деталей и конструкций, датчика скорости перемещения объекта, датчика дистанционного управления включением электромеханических систем и т.п. [1, С. 34].Технические характеристики фотоэлектронных полупроводниковых приемников излучения, приведенные в ГОСТ 21934-83 [2, С. 144-145] не дают точных значений о зависимости фототока используемого фоторезистора от длины волны при заданной температуре. Исследование температурно-частотной зависимости фототока позволит осуществить селекцию оптических сигналов по длине волн светового излучения, что позволит использовать полупроводниковый фоторезистор в качестве датчика фазового состава исследуемой среды. Действительно, при просвечивании многокомпонентной оптически прозрачной среды спектральный состав луча изменяется, что обусловлено различной степенью поглощения спектральных линий отдельными компонентами среды. Исследуя частотную зависимость фототока при заданной температуре, можно осуществлять не только качественный, но и количественный состав исследуемой среды.

Работа фоторезисторов основана на изменении внутреннего сопротивления при изменении освещенности активной поверхности фоторезистора. Зависимость внутреннего сопротивления фоторезисторов носит нелинейный характер и описывается экспоненциальной кривой, что значительно усложняет расчет временных параметров фоторезисторов. Фоторезисторы изготавливают из светочувствительных материалов, таких как сульфид кадмия (CdS) или селенид кадмия (CdSe). Внутреннее сопротивление фоторезисторов изменяется от нескольких сотен МОм до нескольких сотен Ом. Фоторезисторы в основном используются при малых интенсивностях света. При малом потреблении мощности они могут работать в широком диапазоне рабочих напряжений от 300 мВ до 300 В [3, С. 239].

Недостатком фоторезисторов является медленный отклик на изменение освещенности, то есть большая величина времени релаксации, которая определяется временем жизни неосновных носителей фототока. Для равновесных носителей тока концентрации соответствуют тепловому равновесию. Избыточные, относительно равновесного распределения, носители тока образуются при возбуждении полупроводника (светом, ионизирующим излучением и т. д.). Они получили название неравновесных носителей тока. Также существует обратный процесс, наряду с процессами генерации неравновесных носителей при освещении полупроводника – их рекомбинация. Следовательно, через некоторое время, устанавливается стационарное значение неравновесных концентраций, а также, и стационарное значение фототока. По этой же причине в режиме затемнения полупроводника фотопроводимость не исчезает мгновенно. Этими процессами объясняется инерционность фоторезисторов. Кривыми релаксации называют кривые изменения со временем неравновесной проводимости. Исследование релаксационных кривых позволяет выявить ряд важных характеристик фоторезисторов [4, С. 102-114].

На рисунке 1 приведена типичная для большинства современных фоторезисторов кривая релаксации фототока при облучении импульсной вспыш-

кой [4, С. 110]. Исследование релаксационных кривых позволяет определить один из важнейших параметров, характеризующий фотопроводимость – время жизни неравновесных носителей фототока, которое является функцией скорости рекомбинации последних.

Закон релаксации фототока в режиме затемнения фоторезистора определяется известным выражением:

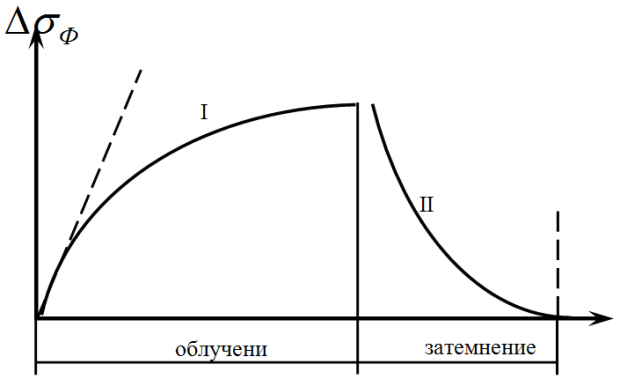


Рис. 1 – Кривая релаксации фототока

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1)$$

Параметр времени жизни τ неосновных носителей фототока можно рассчитать по величине *t*, при котором величина фототока уменьшится, например, в два раза. Пусть начальное значение фототока будет I_0 , а изменение величины фототока в два раза за интервал времени *t*, обозначим через I . Тогда, используя формулу (1), получим выражение, описывающее закон релаксации фототока в виде выражения:

$$\frac{1}{2} I_0 = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2)$$

Полученное выражение (2) позволяет рассчитать время жизни τ неосновных носителей фототока в исследуемом фоторезисторе в режиме затемнения:

$$\tau = t / \ln 2. \quad (3)$$

На основе анализа экспериментальных методов измерения фотоэлектрических параметров полупроводниковых фоторезисторов [5, С. 311-319], [6, С. 289], была разработана и создана лабораторная электронная установка, которая в сочетании с термостатирующей фотокамерой, позволяет с высокой точностью проводить исследования зависимости фототока, как гостированных, так и специально разрабатываемых экспериментальных образцов фоторезисторов в широком интервале температур $T = (273 \div 370)\ K$, при фиксированных длинах волн света $\lambda_1 \approx 0{,}6$ *мкм;* $\lambda_2 \approx 0{,}5$ *мкм;* $\lambda_3 \approx 0{,}4$ *мкм*. Конструктивные особенности лабораторной экспериментальной установки подробно описаны в работах [7, С. 16], [8, С. 127–130].

Конструкция термостатирующей фотокамеры приведена на рисунке 2 [8, С. 129].

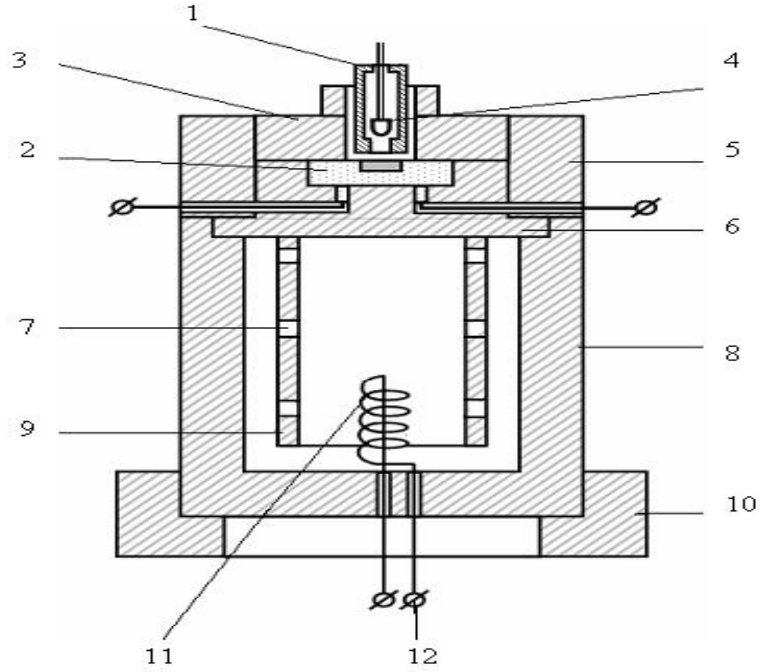


Рис.2 – Конструкция термостатирующей фотокамеры

Основными элементами фотокамеры являются: опорное кольцо10, к которому крепятся клеммы нагревателя 12 и устанавливается термоизолированный корпус 8, содержащий в себе: спираль нагревателя 11, теплопровод 9 с отверстиями 7 для циркуляции термостатирующей жидкости (например, воды), крышку 6, выполненную монолитно с теплопроводом 9, в которой крепится фоторезистор 2, защитную муфту 5, защитное кольцо 3, корпус осветителя 1, светодиод 4.

Относительная погрешность измерения времени жизни неравновесных носителей фототока полупроводниковых фоторезисторов, с помощью предлагаемой лабораторной установки не превышает 8% [8, С. 127–130].

По полученным экспериментальным данным были построены температурные зависимости времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока в исследуемых полупроводниковых фоторезисторах ФСК-1 и ФСК-2 при освещении светом различной длины волны.

На рисунке 3 показана графическая зависимость времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей тока в фоторезисторе ФСК-1 при освещении светом зеленого спектра $<\lambda> = 0{,}53\cdot10^{-6}$ м.

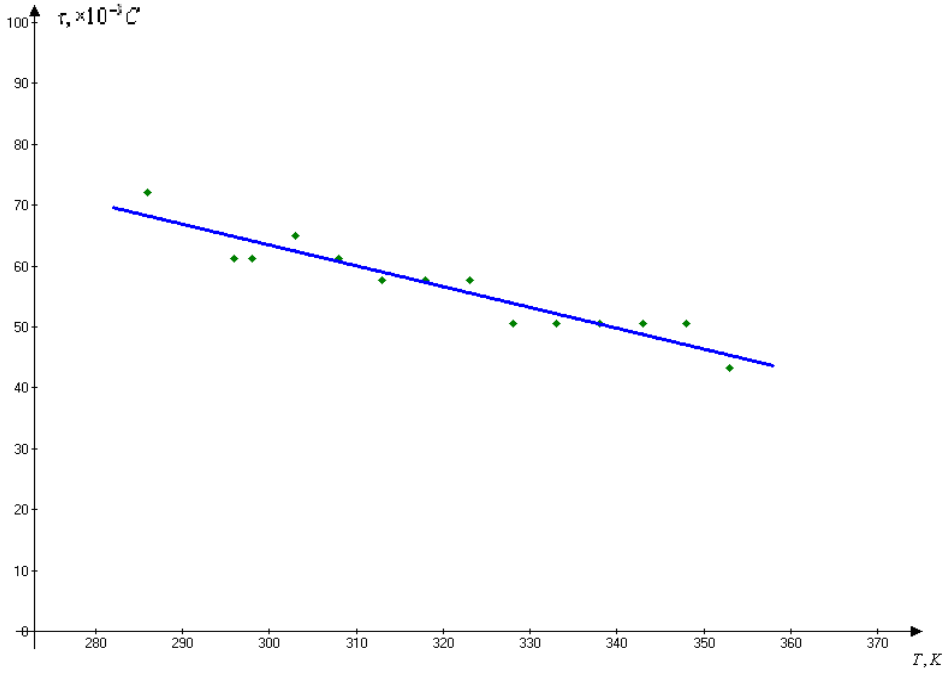


Рис. 3 – Температурная зависимость $\tau_ж$ неосновных носителей тока в ФСК-1 при освещении светом зеленого спектра

Как видно из приведенного рисунка 3 температурная зависимость времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока в ФСК-1 при освещении светом зеленого спектра носит линейный характер. С увеличением температуры

исследуемого фоторезистора величина времени жизни $\tau_ж$, с точностью до статистического распределения измеряемой величины, монотонно убывает. В работе [4, С. 112] показано, что время жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока в фоторезисторе обратно пропорционально концентрации дырок и средней относительной скорости движения электрона:

$$\tau_n = \frac{1}{q_n \upsilon_n p}.$$

Полагая, что средняя относительная скорость движения электрона

$$\upsilon \sim \sqrt{T},$$

Получим:

$$\tau_ж \sim \frac{1}{T}. \qquad (4)$$

Что и подтверждается полученными экспериментальными результатами.

Температурная зависимость времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока в ФСК-1 при освещении светом синего и красного спектра, как и при освещении светом зеленого спектра, носит также линейный характер.

На рисунке 4 приведена графическая зависимость времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока от длины волны облучаемого света в фоторезисторе ФСК-1 для двух фиксированных температур: $T_1 = 293$ К и $T_2 = 343$ К. Как видно из приведенного рисунка 4 зависимость времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей тока в ФСК-1 носит почти линейный характер. С увеличением длины волны облучаемого света время жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока монотонно увеличивается, что обусловлено уменьшением энергии фотона облучаемого света и, как следствие, уменьшением энергии возбужденных электронов и, следовательно, средней относительной скорости движения электронов [9, С. 12-21], [10, С. 1244-1252].

Из приведенных графических зависимостей времени жизни неосновных носителей фототока для исследуемых фоторезисторов ФСК – 1 и ФСК – 2 от температуры и длины волны следует, что с увеличением температуры время жизни монотонно убывает для обоих образцов, а с увеличением длины волны облучаемого света – монотонно возрастает. Данная экспериментальная зависимость хорошо согласуется с теоретическими положениями, приведенными в работах [11, С. 550-554], [12, С. 98].

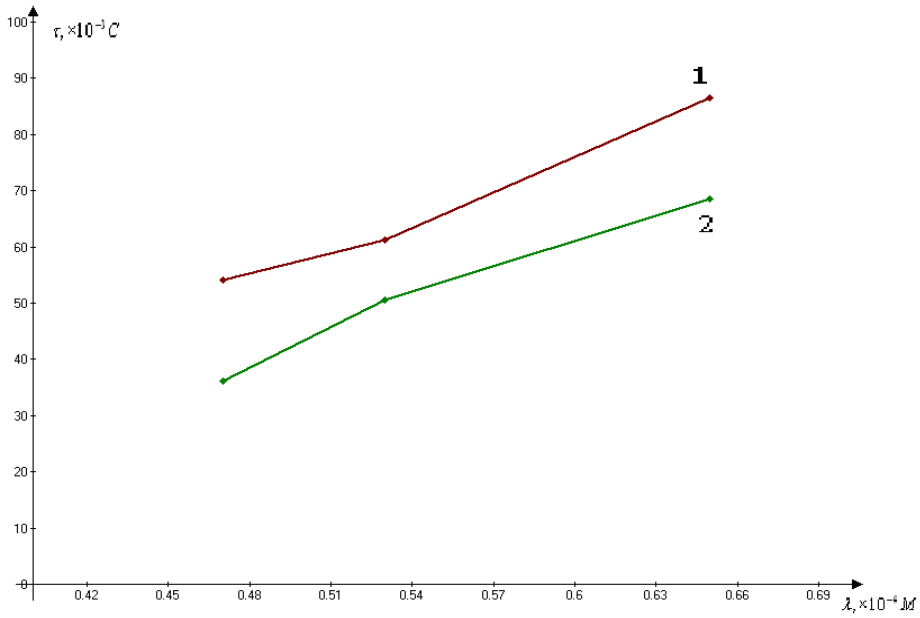


Рис. 4 – Графическая зависимость времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока от длины волны облучаемого света в фоторезисторе ФСК-1 для двух фиксированных температур: T_1= 293К (1); и T_2 = 343К(2)

Выше приведенные экспериментальные результаты можно использовать при проектировании электронных систем автоматической регистрации и управления различными технологическими процессами с использованием полупроводниковых фоторезисторов данного класса. Результаты измерения времени жизни неосновных носителей фототока, исследуемых фоторезисторов, можно учитывать при проектировании фотодатчиков для регистрации быстроизменяющихся параметров. Температурная зависимость времени жизни неосновных носителей фототока в фоторезисторах типа ФСК позволяет определить граничную частоту переключений, которую можно рассчитать по формуле $f_{ГР} = 1/\tau_Ж$.

Учитывая зависимость времени жизни неосновных носителей фототока

от длины волны света можно рассчитать поправку на граничную частоту переключений фоторезистора для различных спектральных составляющих световых волн при облучении фоторезистора.

Заключение

1. Приводится описание разработанной лабораторной оптической установки, которая в сочетании с термостатирующей фотокамерой, позволяет с высокой точностью проводить исследования зависимости фототока, как гостированных, так и экспериментальных образцов фоторезисторов в широком интервале температур $T = (273 \div 370)\ K$ при фиксированных длинах волн светового излучения: $\lambda_1 \approx 0{,}6$ *мкм;* $\lambda_2 \approx 0{,}5$ *мкм;* $\lambda_3 \approx 0{,}4$ *мкм*.

2. Из приведенных экспериментальных результатов установлено, что температурная зависимость времени жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока в исследованных фоторезисторах для всех длин волн излучения носит линейный характер.

3. С увеличением температуры фоторезисторов величина времени жизни $\tau_ж$, с точностью до статистического распределения измеряемой величины, монотонно убывает.

4. С увеличением длины волны облучаемого света время жизни $\tau_ж$ неосновных носителей фототока монотонно увеличивается.

5. Полученные результаты о температурно-частотной зависимости фототока позволяют осуществить селекцию оптических сигналов по длине волн светового излучения, что позволит использовать полупроводниковый фоторезистор в качестве датчика фазового состава исследуемой среды, то есть использовать в качестве анализатора спектра.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников : учеб. пособие / К. В. Шалимова. – 4-е изд. – СПб. : Лань, 2010. – 400 с.
2. ГОСТ 21.934-83. Фотоприемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. – Введ. 1984-01-07. – М.: Стандартинформ, 2005. – 170 с.
3. Быстров Ю. А. Оптоэлектронные приборы и устройства : учеб. пособие / Ю. А. Быстров. – М. : Радио Софт, 2012. – 256 с.
4. Коваленко А. А. Основы микроэлектроники / А. А. Коваленко, М.Д. Петропавловский. – М. : Академия, 2010. – 240 с.
5. Павлов П. В. Физика твердого тела : уч. пособие для вузов / П. В. Павлов ; под ред. А.Ф. Хохлова. – 4-е изд. – М.: Высшая школа, 2015. – 496 с.
6. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника : учеб. пособие для вузов/ А.Н. Игнатов. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 538 с.
7. Рудин А. В. Физические свойства твердых тел. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Физика твердого тела»/ А. В. Рудин, В. В. Евстифеев. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2007. – 68 с.
8. Рудин А. В. Определение времени жизни неравновесных носителей тока в полупроводниках» / А. В. Рудин, С. В. Рудин, И.В. Бойков // Сборник статей X Международной научно-технической конференции «Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем». – Пенза : ПГУ, 2015. – С. 127 – 131.
9. Казанский А. Г. Фотоэлектрические свойства микрокристаллического кремния /А. Г. Казанский // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2009. – №8. – С. 12–21.
10. Кокурин И. А. Оптическая ориентация электронов в компенсированных полупроводниках / И. А. Кокурин, П. В. Петров, Н. С. Аверкиев // Физика и техника полупроводников. – 2013. – № 9 – С. 1244–1252.
11. Шишкин Г. Г. Электроника: учебник для бакалавров / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. – 2-е изд. – М. : Юрайт, 2014. – 702 с.
12. Аминов Л. К. Термодинамика и статистическая физика. Конспект лекций и задачи / Л. К. Аминов. – Казань. : Казан. ун.-т, 2015. – 180 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Shalimova K. V. Fizika poluprovodnikov: ucheb. posobie [Semiconductor Physics: Textbook] / K. V. Shalimova. - 4th ed. - SPb.: Lan, 2010. - 400 p.
2. GOST 21.934-83. Fotopriemniki izlucheniya poluprovodnikovye fotoelektricheskie i fotopriemnye ustroistva [Photodetectors of Radiation Semiconductor Photoelectric and Photodetecting Devices]. Terms and Definitions. - Intr. 1984-01-07. - M.: Standardinform, 2005. - 170 p.
3. Bystrov Yu. A. Optoelektronnye pribory i ustroistva: ucheb. posobie [Optoelectronic Devices and Units: Textbook] / Yu. A. Bystrov. - M.: Radio Soft, 2012. - 256 p.
4. Kovalenko A. A. Osnovy mikroelektroniki [Fundamentals of Microelectronics] / A. A. Kovalenko, M.D. Petpropavlovskiy. - M.: Academy, 2010. - 240 p.
5. Pavlov P. V. Fizika tverdogo tela: uch. posobie dlia vuzov [Solid State Physics: Textbook for Universities] / P.V. Pavlov; ed. by A. F. Khokhlova. - 4th ed. - M.: Vysshaya Shkola, 2015. - 496 p.
6. Ignatov A. N. Optoelektronika i nanofotonika: ucheb. posobie dlia vuzov [Optoelectronics and Nanophotonics: Textbook for Universities] / A. N. Ignatov. - St. Petersburg: Lan, 2011. - 538 p.
7. Rudin A. V. Fizicheskie svoistva tverdykh tel [Physical Properties of Solids] Guidelines for Laboratory Work in the Course “Solid State Physics” / A. V. Rudin, V. V. Evstifeev. - Penza: IITs PSU, 2007. - 68 p.

8. Rudin A. V. Opredelenie vremeni zhizni neravnovesnykh nositelei toka v poluprovodnikakh [Determination of Lifetime of Non-equilibrium Current Carriers in Semiconductors] / A. V. Rudin, S. V. Rudin; I. V. Boykov // Collection of articles of the X International Scientific and Technical Conference “Analytical and Numerical Methods for Modeling Natural Science and Social Problems.” - Penza: PSU, 2015. - P. 127 - 131.

9. Kazanskii A. G. Fotoelektricheskie svoistva mikrokristallicheskogo kremniya [Photoelectric Properties of Microcrystalline Silicon] / A. G. Kazanskiy // Proceedings of Higher Educational Institutions. Materials of Electronic Technology. - 2009. - No.8. - P. 12-21.

10. Kokurin I. A. Opticheskaya orientatsiya elektronov v kompensiro-vannykh poluprovodnikakh [Optical Orientation of Electrons in Compensated Semiconductors] / I. A. Kokurin, P. V. Petrov, N. S. Averkiev // Physics and Technology of Semiconductors. - 2013. - No. 9 - P. 1244–1252.

11. Shishkin G. G. Elektronika: uchebnik dlia bakalavrov [Electronics: Textbook for Bachelors] / G. G. Shishkin, A.G. Shishkin. - 2nd ed. - M.: Yurayt, 2014. - 702 p.

12. Aminov L. K. Termodinamika i statisticheskaya fizika [Thermodynamics and Statistical Physics]. Lecture Notes and Tasks / L. K. Aminov. - Kazan: Kazan. Un., 2015. - 180 p.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.011

БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Научная статья

Булаев А.Г.[1,] *, Меламуд В.С.[2]

[1] ORCID: 0000-0001-7914-9817,

[1, 2] Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук; Москва, Россия;

[1] Биологический факультет, Московский государственный университет имени М.В .Ломоносова; Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (bulaev.inmi[at]yandex.ru)

Аннотация

Был проведен процесс перколяционного биовыщелачивания цветных металлов (меди и цинка) из отходов обогащения (хвостов флотации) медно-цинковой сульфидной руды. Проба отходов содержала 0,26 и 0,22% меди и цинка. Процесс биовыщелачивания проводили с использованием микробного консорциума предварительно адаптированного к перерабатываемым отходам, который включал *Acidithiobacillus ferrivorans, At. caldus, Leptospirillum ferriphilum, Ferroplasma acidiphilum* и *Acidiplasma* sp. Перед процессом биовыщелачивания отходы обогащения подвергали кислотному выщелачиванию 10% серной кислотой, что позволило извлечь 39 и 42% меди и цинка. Биовыщелачивание на протяжении 200 суток позволило извлечь в жидкую фазу 67,5 и 53,9% меди и цинка.

Ключевые слова: отходы обогащения, ацидофилы, биовыщелачивание.

BIOX OF COLOR METALS FROM WASHERY REFUSES

Research article

Bulaev A.G.[1,] *, Melamud V.S.[2]

[1] ORCID: 0000-0001-7914-9817,

[1, 2] Vinogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Center "Fundamentals of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia;

[1] Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

* Corresponding author (bulaev.inmi[at]yandex.ru)

Abstract

The process of percolation BIOX of non-ferrous metals (copper and zinc) from washery refuses (flotation tailings) of copper-zinc sulfide ore was carried out. The waste sample contained 0.26% of copper and 0.22% of zinc. The bioleaching process was performed with the use of microbial consortium pre-adapted to recyclable waste, which included *Acidithiobacillus ferrivorans, At. caldus, Leptospirillum ferriphilum, Ferroplasma acidiphilum and Acidiplasma* sp. Before the BIOX process, the washery refuses were subjected to acid leaching with 10% sulfuric acid, which made it possible to extract 39 and 42% of copper and zinc. Bioleaching for 200 days made it possible to extract 67.5 and 53.9% of copper and zinc in the liquid phase.

Keywords: enrichment wastes, acidophiles, bioleaching.

Введение

Биогидрометаллургические технологии широко применяются для получения цветных и благородных металлов из сульфидных руд и концентратов. С помощью биогидрометаллургии получают в такие металлы как медь, уран, никель и золото [1]. Основой биогидрометаллургических технологий являются процессы микробного окисления сульфидных минералов, содержащихся в рудах, ацидофильными микроорганизмами, использующими в качестве энергетического субстрата двухвалентное железо, серу и сульфидные минералы [2]. Ионы цветных металлов (меди, цинка, никеля, кобальта) входят непосредственно в состав сульфидных минералов (например: халькопирита ($CuFeS_2$), борнита (Cu_5FeS_4), энаргита (Cu_3AsS_4), ковеллина (CuS), халькозина (Cu_2S), сфалерита (ZnS), пентландита ($(Fe, Ni)_9S_8$) и др.), поэтому при окислении сульфидных минералов происходит выход ионов цветных металлов в раствор, откуда они затем извлекаются различными методами (цементация, жидкостная экстракция, осаждение сероводородом, извлечение с помощью ионообменных смол). При переработке сульфидных руд и концентратов золота в процессе биоокисления золотовмещающих сульфидных минералов происходит разрушение их кристаллической решетки, а золото не растворяется непосредственно в процессе биоокисления, а только вскрывается, становясь доступным для цианирования [3].

Выделяют отвальное, кучное, подземное и чановое (реакторное или агитационное) биоокисление [4]. В случае подземного выщелачивания производится закачка раствора, содержащего кислоту, окислитель (Fe^{3+}), генерируемый микроорганизмами, а также клетки микроорганизмов непосредственно в место залегания руды. При отвальном и кучном выщелачивании осуществляется обработка растворами отвалов руд (чаще некондиционных) или куч измельченного и окомкованного рудного материала, расположенного на площадке с гидроизоляцией. Чановое или реакторное биовыщелачивание подразумевает проведение окисления измельченного сырья в реакторах с перемешиванием [5]. По сравнению с подземным, отвальным и кучным биовыщелачиванием, чановое обеспечивает переработку сырья с большей скоростью, но требует гораздо больших капитальных и эксплуатационных затрат. Поэтому кучное биовыщелачивание применяется для переработки бедных руд цветных металлов, прежде всего меди, а чановое – для переработки сульфидных концентратов золотосодержащих руд [1].

В табл. 1 приведены примеры использования кучного биовыщелачивания для переработки бедных медных руд с содержанием меди от 0,15 до 2% [6]. Масса эксплуатируемых куч бедных медных руд может достигать нескольких миллионов тонн, время их эксплуатации – нескольких лет. По приблизительным оценкам около 5% мирового производства меди обеспечивается кучным биовыщелачиванием [1]. Россия в настоящее время отстает от мирового уровня развития технологии кучного биовыщелачивания, несмотря на то, что в СССР в 1970-1980 гг. проводились полупромышленные испытания по кучному выщелачиванию меди из руд месторождений Урала и Казахстана [7]. При этом Россия, являющаяся лидером по добыче некоторых цветных металлов (например, по добыче никеля РФ в 2014 году занимала второе место в мире (260 тыс. т), по кобальту - пятое (6300 тыс. т.), по меди и свинцу - седьмое (850 и 195 тыс. т., соответственно [8]), могла бы занять лидирующие позиции по использованию биогидрометаллургии, в частности кучного биовыщелачивания. Особенно широкое применение могут найти биогидрометаллургические технологии для переработки бедных руд цветных металлов (прежде всего меди, а также цинка и никеля), а также отходов их добычи и обогащения. Отвалы пустой породы, которые накапливаются в непосредственной близости от карьеров горно-добывающих предприятий, а также хранилища отходов обогащения по сути являются техногенными месторождениями бедных сульфидных руд [8], [9], [10], [11], [12]. Согласно различным оценкам, ежегодно в странах СНГ складируется в отвалах около 5 млрд. т. вскрышных пород и 700 млн. т хвостов. Всего в отвалах горнодобывающих предприятий Российской Федерации накоплено более 40 млрд. т отходов [13]. Отечественные исследователи сходятся на том, что данные хранилища негативно воздействуют на окружающую среду, прежде всего путем загрязнения поверхностных и подземных вод и как следствие, почв [14], [15]. Площадь почвенного покрова, загрязненного цветными металлами, достигает в России 3,6 млн га, при этом чрезвычайно высокий уровень загрязнения степенью загрязнения обнаружен на площади более 0,25 млн. га. [16].

Таблица 1 – Примеры переработки бедных медных руд с помощью кучного биовыщелачивания [6]

Месторождение (Страна)	Содержание меди в руде, %	Производство меди, т/год
Duval (США)	0,15 - 0,20	2,500
Bluebird (США)	0,5	6,800
Degtyarsky (СССР)	н.д.	900
Kosaka (Япония)	0,15 - 0,25	800
Río Tinto (Испания)	н.д.	8,000
Cananea (Месика)	н.д.	9,000
St. Domingo (Португалия)	н.д.	670
Cerro Colorado (Чили)	1,0	130,000
Ivan (Чили)	2,1	10,000
Quebrada Blanca (Чили)	0,9	82,000
Chuquicamata (Чили)	0,3	12,500
Los Bronces (Чили)	0,45	46,400
Zaldívar (Чили)	н.д.	147,000
Alliance Copper (Чили)	1,4	20,000
Escondida (Чили)	0,3-0,7	750,000
Spence (Чили)	1,1	200,000
Zijinshan (КНР)	0,3	Н.д.

На некоторых ГОКах накоплены сотни миллионов тонн. вскрышных пород и отходов обогащения. Они могли бы быть переработаны с помощью технологий отвального и кучного биовыщелачивания. Российскими исследователями проведен ряд лабораторных исследований по переработке отходов обогащения (хвостов) с помощью биовыщелачивания. Пиритные хвосты флотации полиметаллических руд содержат достаточно высокие количества цветных металлов (до 1%) и золота (до 2 г/т) и могут рассматриваться как техногенное сырье. Показано, что биоокисление позволяет достичь достаточно высокого извлечения ценных металлов из хвостов (от 40 до 90% меди и цинка) за срок от 21 до 130 суток [8], [9], [10], [11], [12]. Таким образом, биовыщелачивание позволяло извлекать цветные металлы из хвостов с различной эффективностью, что могло быть обусловлено как особенностями минерального состава различных отходов, так особенностями составом микробных культур, используемыми для выщелачивания. Известно, что промышленные процессы биовыщелачивания осуществляются не чистыми культурами, а сообществами микроорганизмов [2]. При этом наилучших результатов окисления, как правило, удается достичь при использовании микробных сообществ, адаптированных к конкретному минеральному сырью [2], [17]. Эта закономерность была подтверждена и на примере процесса биовыщелачивания отходов обогащения. В работе [12] было показано, что использование сообщества, состоящего из аборигенных микроорганизмов, выделенных непосредственно из мест складирования отходов обогащения, позволило проводить процесс биовыщелачивания с более высокой эффективностью, чем использование типового штамма *A. ferrooxidans.*

Целью данной работы было проведение лабораторных испытаний по биовыщелачиванию цветных металлов (меди и цинка) из пробы отходов обогащения (хвостов флотации) одного из ГОКов России в перколяционной установке, чтобы оценить перспективность кучного биовыщелачивания для переработки данных отходов. Для проведения процесса микробный консорциум был предварительно адаптирован для окисления конкретного субстрата, а его состав после адаптации был определен с помощью молекулярно-биологических методов.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась проба лежалых пиритных хвостов обогащения с одного из ГОКов России. Выход класса крупности -100 мкм составил 100% Минеральный и химический состав пробы приведен в табл. 2 и 3. Проба характеризовалась высоким содержанием пирита, кроме того в пробе было зафиксировано высокое содержание оксидного железа, что свидетельствовало о том, что в процессе хранения хвосты обогащения подвергались окислению (в том числе биологическому). В хвостах обогащения содержались медь и цинк (0,26 и 0,22%, соответственно). Рентгенодифрактометрический анализ показал присутствие халькопирита и сфалерита.

Таблица 2 – Химический состав усредненной пробы лежалых пиритных хвостов обогащения

Элемент	Символ	Содержание, масс. доля, %
Сера общая	$S_{общ.}$	17,80
Сера сульфидная	$S_{сульфид.}$	14,5
Железо общее	$Fe_{общ.}$	17,4
Железо сульфидное	$Fe_{сульфид.}$	13,4
Железо оксидное	$Fe_{оксидн.}$	3,3
Медь	Cu	0,26
Цинк	Zn	0,22

Таблица 3 – Минеральный состав усредненной пробы лежалых пиритных хвостов обогащения по данным рентгенодифрактометрического метода

Минеральная фаза	Формула	Содержание, % масс. доли
Пирит	FeS_2	31
Халькопирит	$CuFeS_2$	0,5
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	13
Ярозит	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	1
Мусковит	$K,Al_2(AlSi_3O_8)(OH,F)_2$	4
Плагиоклаз	$NaAlSi_3O_8$	2
Клинохлор	$(K,Mg)_6(SiAl)_4O_{10}(F,OH)_2$	5
Сфалерит	ZnS	1
Кварц	SiO_2	41

При проведении процессов биоокисления величины pH и Eh измеряли с помощью pH-метра-милливольтметра pH-150МА (Беларусь), значения Eh выражали относительно нормального водородного электрода. Концентрацию ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} определяли трилонометрическим титрованием [18]. Определение содержания железа, меди и цинка в твердой фазе проводили методами фазового анализа [19]. Концентрации меди и цинка определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра с пламенной ионизацией Perkin Elmer 3100 (США).

Для создания микробного консорциума в качестве инокулята использовалось микробный консорциум, сформировавшееся в процессе биовыщелачивания отходов обогащения [8], а также чистые культуры *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* Sh 10-1 и Sh 10-2, *Acidithiobacillus caldus* MBC, и *Acidiplasma* sp. MBA-1. Для адаптации микробного сообщества инокулят был засеян в цилиндрические стеклянные сосуды с эрлифтным перемешиванием, вмещающие 1 л жидкой среды. В сосуды помещали по 100 мл инокулята, 900 мл минеральной питательной среды, используемой для культивирования ацидофильных железо- и сероокислителей [20], а также 100 г навески пиритных хвостов обогащения. Хвосты обогащения предварительно промывали, чтобы удалить оксидные соединения, не являющиеся питательным субстратом для микроорганизмов, 10% раствором серной кислоты, затем дистиллированной водой, а затем высушивали. Культивировали микробный консорциум при комнатной температуре (20-25°С). Об адаптации сообщества микроорганизмов к субстрату судили по параметрам жидкой фазы в процессе окисления (концентрации железа, pH, Eh среды, количество клеток микроорганизмов), которые позволяют характеризовать активность окисления минералов, содержащихся в хвостах обогащения. После достижения стабильных параметров жидкой фазы и высокого числа клеток микроорганизмов микробный консорциум культивировали в полупроточном режиме, один раз в 25−30 сут. заменяя 10% жидкой среды и внося навески промытых хвостов обогащения.

Видовой состав сформировавшегося микробного сообщества, проводили с помощью ДГГЭ. Пробу для анализа отбирали после начала полупроточного культивирования. ДНК из образцов выделяли и очищали по стандартным методикам, описанным ранее [21]. Реакцию амплификации проводили в 20 мкл смеси, содержащей однократный реакционный буфер фирмы «Evrogen», 200 мкг каждого дезоксирибонуклеотид-трифосфата, соответствующее количество каждого праймера, 1 ед. активности Taq ДНК полимеразы (Evrogen, Россия) и 1 мкл раствора матричной ДНК в концентрации 1–10 нг. Для амплификации использовались праймеры Univ515F 5'-GTGBCAGCMGCCGCGGTA-3' (универсальный) и Bac907R 5'-CCGTCAATTCMTTTGAGTTT-3' (бактериальный) или Arch915R 5'-GTGCTCCCCCGCCAATTCCT-3' (архейный). Температурную программу подбирали экспериментально, основываясь на стандартном протоколе ПЦР. Перед проведением анализа DGGE к полученным ампликонам добавляли участок, богатый Г+Ц нуклеотидами, для чего проводили реамплификацию с праймерами, содержащими так называемый Г+Ц-кламп, состоящий из 40 нуклеотидов:515FGCclamp5'CGCCCGCCGCGCCCCGCGCCCGTCCCGCCGCCCCCGCCCGGTGBCAGCMGCCGCGG TAAB-3'. Во всех экспериментах в качестве одного из отрицательных контролей использовали реакцию без добавления ДНК. Амплификацию проводили на многоканальном ДНК-амплификаторе Терцик (ДНК-технология,

Россия). Продукты амплификации анализировали с помощью электрофореза в 1,5% агарозном геле. Полученные с помощью ПЦР ампликоны разделяли на основании характеристики их плавления в 8% (по объему) полиакриламидном геле с относительным градиентом концентрации денатурирующих агентов от 30% до 70% с помощью прибора TV400-DGGE (SCIE-PLAS, Англия). Электрофорез проводили при постоянном напряжении 70 В и температуре 60°С в течение 20 ч. После электрофореза гель промывали бидистиллированной водой и затем окрашивали SYBR® Gold (Molecular probes, Лейден, Нидерланды) в течение 40 мин в темноте. После окрашивания продукт амплификации визуализировали на трансиллюминаторе при длине волны 470 нм, и нужные полосы вырезали для дальнейшего анализа. Полосы из геля помещали в пробирки, содержащие 20 мкл дистиллированной воды, и оставляли в холодильнике на ночь для элюирования ДНК из геля. Элюат в количестве 1мкл использовали в качестве матрицы для проведения ПЦР с соответствующими праймерами. Продукты реамплификации чистили электрофорезом в 1,5% агарозном геле, ДНК из которого вырезали и чистили с помощью набора для очистки ДНК из геля и реакционных смесей (Цитокин, Россия). Секвенирование проводили по методу Сэнгера. Первичный анализ сходства полученных нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК проводили с помощью сервера BLAST (ncbi.nlm.nih.gov/blast). Выравнивание последовательностей и построение филогенетического дерева исследуемых бактерий осуществляли с помощью пакета программ MEGA 6 [22].

Биовыщелачивание проводили в перколяционных установках, состоящих из колонок в которые помещали навески сырья, емкостей для сбора продуктивных растворов, емкостей для регенерации окислителя, снабженной компрессором для аэрацией (рис. 1).

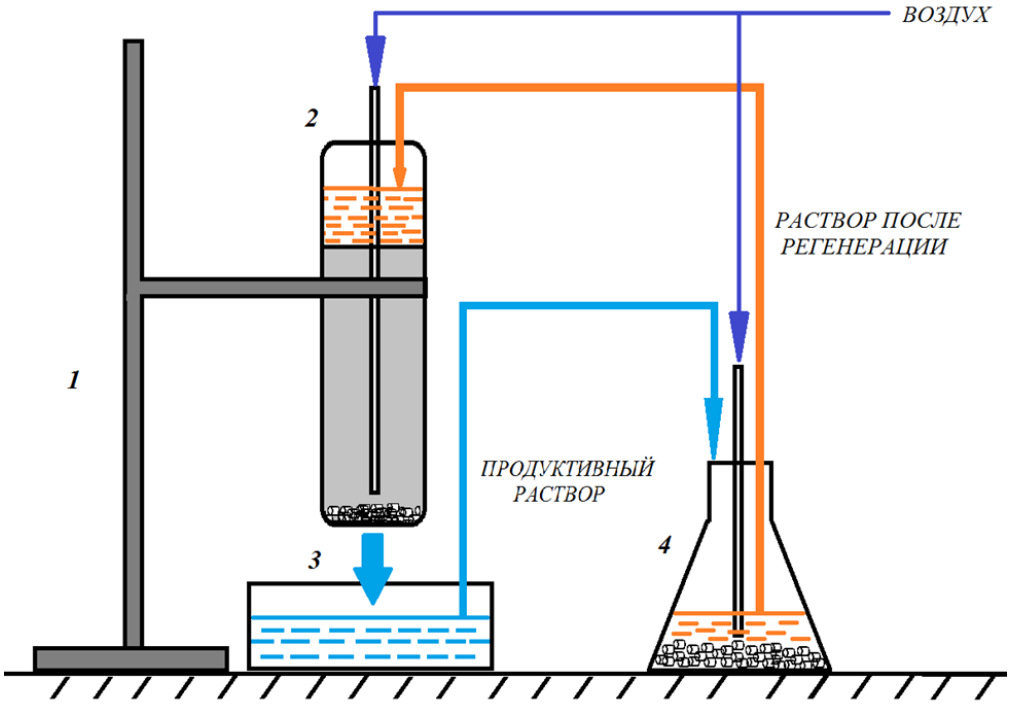


Рис. 1 – Схема перколяционной установки. *1* – штатив; *2* – перколяционная колонка; *3* – емкость для сбора продуктивного раствора; *4* – емкость для регенерации окислителя

Каждая перколяционная колонка вмещала 1 кг отходов обогащения. Перед началом процесса биовыщелачивания отходы флотации, помещенные в колонки, промывали 10 % (м/об.) раствором серной кислоты. После кислотной промывки продуктивный раствор удаляли. После этого в каждую колонку вносили по 700 мл. культуры, выращенной на жидкой среде с отходами обогащения в качестве питательного субстрата. Выщелачивание проводили в режиме затопления, наливая раствор в верхнюю часть колонки. Просочившийся через слой сырья продуктивный раствор поступал в емкость для сбора продуктивных растворов. Так как в ходе перколяции раствора, содержащего окислитель, через слой сырья, содержащего окислитель (Fe^{3+}), трёхвалентное железо восстанавливалось до двухвалентного, продуктивные растворы переносили в емкость-регенератор, куда подавали воздух с помощью компрессора. Благодаря интенсивной аэрации в емкости-регенераторе микроорганизмы окисляли двухвалентное железо до трехвалентного. В емкость-регенератор помещали керамические кольца Рашига, чтобы избежать вымывания биомассы. После окисления раствор переносили в верхнюю часть колонки для перколяции. Процесс биоокисления проводили в две стадии по 100 суток. После первой стадии навески хвостов обогащения в перколяцию прекращали, проводили промывку подкисленной водой (pH 1,5), затем дистиллированной водой. Навески извлекали из колонок, высушивали до постоянного веса, чтобы определить выход твердой фазы после биовыщелачивания, определяли химический состав остатков биоокисления. Затем остатки биоокисления снова помещали в колонки и повторяли процесс биовыщелачивания. После второй стадии биовыщелачивания остатки биовыщелачивания анализировали как указано выше.

Процесс биовыщелачивания проводили в двух проворностях, в результатах работы представлены средние значения всех параметров.

Результаты исследований и их обсуждение

Параметры жидкой фазы при адаптации микробного консорциума к пиритным хвостам представлены в табл. 4. Как видно из представленных данных концентрация двухвалентного железа в процессе адаптации была практически равна нулю, а Eh был выше 800 мВ, pH постепенно снижался пока не стабилизировался на уровне 1,69.

Таблица 4 – Параметры жидкой фазы при адаптации микробного сообщества к пиритным хвостам при 22−25°С

Сутки	Fe^{3+}, г/л	Fe^{2+}, г/л	∑Fe, г/л	pH	Eh, мВ	Численность микроорганизмов, кл/мл $\times 10^7$
0	0,49	0	0,49	2,27	749	2,60
5	1,19	0	1,19	1,79	830	53
10	1,54	0	1,54	1,72	860	80
15	1,54	0	1,54	1,69	891	72
20	1,82	0	1,82	1,69	880	100

Численность микроорганизмов в жидкой фазе достаточно быстро росла и за 20 суток адаптации выросла на два порядка. Все это указывает на то, что микробный консорциум достаточно быстро адаптировался к минеральному субстрату. После 20 суток адаптации микробный консорциум поддерживался в полупроточном режиме - с интервалом 25-30 суток заменяли 10-20% жидкой среды и вносили свежие навески отходов обогащения. При поддержании консорциума в полупроточном режиме параметры жидкой фазы были стабильными: концентрация ионов Fe^{3+} была в интервале 1,6-2,5 г/л, pH в диапазоне 1,5-1,7. После того, как можно стало возможным судить о стабильности состава микробного консорциума по стабильности физико-химических параметров жидкой фазы, была отобрана проба для анализа с помощью ДГГЭ фрагментов генов 16S рРНК. Анализ показал, что в консорциуме присутствовали как бактерии, так и археи. Были выявлены *Acidithiobacillus ferrivorans, At. caldus, Leptospirillum ferriphilum, Ferroplasma acidiphilum* и *Acidiplasma* sp. Следует отметить, что виды архей рода *Acidiplasma* порядка *Thermoplasmatales* практически не отличаются друг от друга по последовательности генов 16S рРНК, поэтому не могут быть идентифицированы с помощью использованного метода до вида, в отличие от остальных микроорганизмов сообщества [23].

Таким образом, микробный консорциум был успешно адаптирован к минеральному сырью. Достаточно большое для консорциума ацидофильных микроорганизмов, окисляющих сульфидные минералы видовое разнообразие, выявленное с помощью ДГГЭ, указывает на то, что используемый субстрат является благоприятным для развития различных ацидофильных микроорганизмов и относительно легко окисляется при невысоких температурах.

Перед началом процесса биовыщелачивания отходы флотации, помещенные в колонки, промывали 10 % (м/об.) раствором серной кислоты (1 л раствора на 1 кг отходов), чтобы удалить оксидные соединения, которые могли бы препятствовать контакту микроорганизмов с сульфидными минералами и избежать колебаний pH при проведении процесса биовыщелачивания. Усредненный состав продуктивных растворов кислотной промывки представлен в Таблице 5.

Таблица 5 – Содержание металлов в продуктивном растворе кислотного выщелачивания и степень извлечения из отходов обогащения

Парметр	Fe^{3+}	Fe^{2+}	∑ Fe	Cu^{2+}	Zn^{2+}
Содержание в растворе, г/л	10,50	9,94	20,44	1,49	1,33
Извлечение в раствор, %	-	-	8,22	39,98	42,16

На смачивание 1 кг отходов обогащения ушло примерно 300 мл раствора кислоты. Поэтому объем продуктивного раствора составил примерно 70% от объема раствора кислоты. Как следует из представленных данных, при кислотном химическом выщелачивании удалось достигнуть достаточно высокой степени извлечения меди и цинка (39 и 42%, соответственно). Также стоит отметить, что pH продуктивного раствора значительно превышал pH 10% раствора серной кислоты, использованного для выщелачивания (0,8 и 0 соответственно). Это является следствием растворения оксидных минералов, содержащихся в отходах обогащения [24]. Достаточно высокое извлечение меди и цинка при кислотном выщелачивании может свидетельствовать о том, что часть данных металлов может содержаться в оксидных минералах. Несмотря на то, что анализ минерального состава выявил присутствие халькопирита и сфалерита (сульфидных минералов), можно предположить, что некоторая часть цветных металлов была представлена в аморфных оксидных соединениях, которые не могут быть выявлены рентгеноструктурным анализом [24]. Это подтверждается данными о том, что халькопирит трудно поддается выщелачиванию растворами кислот [25].

В колонках с отходами обогащения, подвергнутыми предварительному кислотному выщелачиванию, после слива продуктивных растворов кислотного выщелачивания был начат процесс биовыщелачивания. Для этого был использован микробный консорциум, адаптированный на первом этапе исследования. Жидкая фаза из сосудов, в которых культивировали микробный консорциум, была подвергнута отстаиванию и фильтрованию через бумажный фильтр, чтобы удалить из жидкой фазы минеральные частицы. Для биовыщелачивания отходов обогащения, смоченных в ходе кислотного выщелачивания использовали, 700 мл жидкой фазы на 1 кг отходов. Таким образом, соотношение твердой и жидкой фазы в процессе было 1:1. Аналогично была проведена 2 стадия биовыщелачивания.

Параметры продуктивных растворов приведены на рис. 2. Как видно из представленных данных pH раствора колебался на протяжении процесса биовыщелачивания (особенно сильно в первые 50 суток 1 стадии) (рис. 2а)

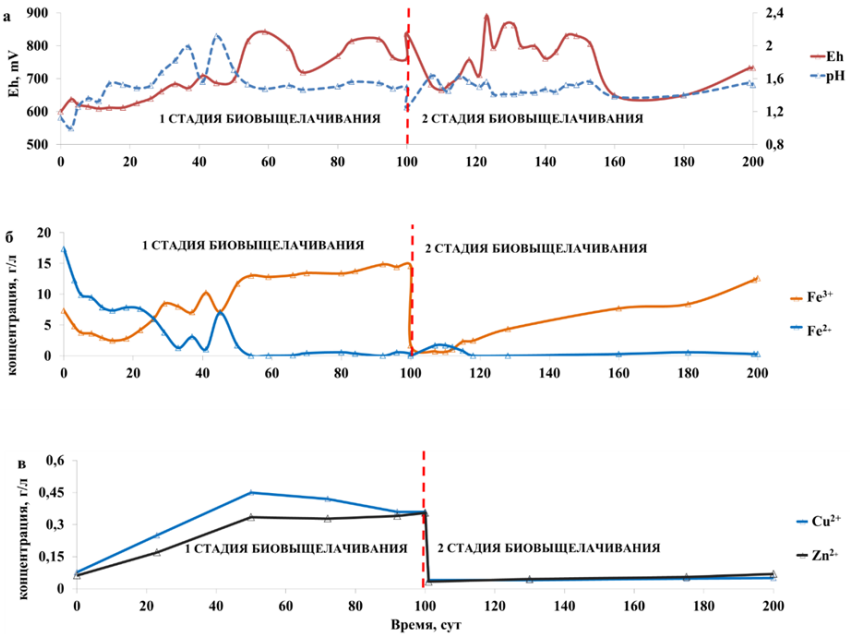


Рис. 2 – Параметры продуктивных растворов биовыщелачивания: А - Eh и pH; Б - концентрации ионов Fe^{3+} и Fe^{2+}; В - концентрации ионов Cu^{2+} и Zn^{2+}

Поэтому требовалось постоянное внесение дополнительного количества серной кислоты в растворы для поддержания pH в диапазоне 1,3-1,5. Средний расход серной кислоты составил 25 кг/т (кг кислоты на тонну сырья).

Концентрация двухвалентного железа в начале 1 стадии процесса биоокисления была достаточно высокой (почти 17 г/л), а затем постепенно снизилась практически до нуля и не поднималась выше десятых долей грамма. В начале 2 стадии процесса концентрация двухвалентного железа незначительно росла (до 1,68 г/л), а затем также снижалась до десятых долей грамма (рис. 2б). Это свидетельствует о том, что активность микроорганизмов в толще отходов обогащения в начале процесса оставалась невысокой, но затем постепенно увеличилась, очевидно, по мере их роста и колонизации поверхности минеральных частиц. Поскольку продуктивные растворы подавались на стадию регенерации (окисления железа микроорганизмами), то в колонки подавался раствор, содержащий только трехвалентное железо. По мере просачивания через слой отходов трехвалентное железо реагировало с сульфидными минералами и восстанавливалось. Это вело к постепенному увеличению суммарной концентрации железа в растворе. Так как в ходе биооксиления микроорганизмы развивались и в навеске отходов обогащения, они стали активно окислять двухвалентное железо не только в регенераторе, но и в перколяционных колонках, что и привело к снижению концентрации Fe^{2+} в продуктивных растворах. Концентрация трехвалентного железа постепенно росла и на 1 и 2 стадии процесса, достигнув в конце 1 и 2 стадий 14 и 12,5 г/л, соответственно. Изменению концентраций ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} соответствовали колебания Eh (рис. 2а).

Концентрации цветных металлов возрастали в ходе процесса биоокисления и на 1 и на 2 стадии, но оставались при этом низкими. На первой стадии биовыщелачивания концентрации меди и цинка достигли 0,36 и 0,355 г/л, на второй лишь 0,05 и 0,069 г/л, соответственно.

После проведения биовыщелачивания был проанализирован состав твердых остатков биовыщелачивания и рассчитаны степени извлечения металлов. Эти данные представлены в табл. 6 и на рис. 3.

Из представленных данных видно, что значительная часть металлов была извлечена уже при кислотном выщелачивании. При этом первая стадия биовыщелачивания позволила извлечь дополнительно около 20% меди и 10% цинка, а извлечение меди и цинка на второй стадии было крайне незначительным. Нужно отметить, что выщелачивание сульфидного железа было достаточно значительным (11 и 25% на первой и второй стадии). Это указывает на достаточно активное биовыщелачивание пирита и на достаточно высокую активность биоокисления. Низкое извлечение цветных металлов на второй стадии позволяет сделать вывод о том, что минералы, которые относительно легко подвергаются кислотному или биовыщелачиванию были растворены в начале процесса, тогда как оставшаяся часть либо плохо подвергалась биоокислению, либо находилась в сростках с минералами, препятствующими биологическому либо химическому выщелачиванию.

Таблица 6 – Содержание металлов твердых остатках биовыщелачивания и выход твёрдой фазы

Содержание, %				Выход твердой фазы, %
$Fe_{общ.}$	$Fe_{сульфид.}$	Cu	Zn	
14,7	13,4	0,11	0,12	88,4
12,9	11,8	0,1	0,12	84,5

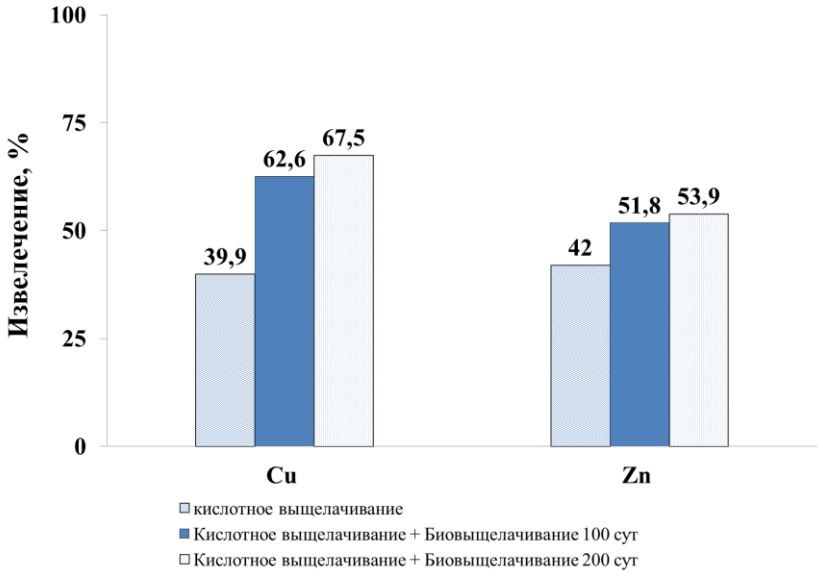


Рис. 3 – Извлечение меди и цинка в процессе кислотного и биовыщелачивания

Результаты данной работы позволили оценить перспективность технологии кучного биовыщелачивания для переработки лежалых отходов обогащение некоторых типов. Проба отходов, использованная в данной работе (как и многие отходы флотации полиметаллических руд вообще [26]), характеризовалась содержанием цветных металлов сходным с содержанием таковых в бедных рудах, перерабатываемых с помощью кучного биовыщелачивания (табл. 1). При этом в ней содержалось намного больше железа в сульфидных и оксидных минералах, чем обычно содержится в таких рудах. Поэтому в продуктивных растворах выщелачивания присутствовала высокая концентрация железа, намного превышающая концентрацию цветных металлов. Это может создавать определенные препятствия для извлечения металлов из продуктивных растворов [28]. Это позволяет сделать вывод о необходимости разработки модификаций технологии кучного биовыщелачивания для применения их для переработки по крайней мере некоторых типов отходов обогащения. Это должно стать предметом будущих исследований, так как отходы обогащения являются весьма перспективным техногенным сырьем.

Финансирование

Работа была выполнена в рамках государственного задания при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Funding

The work was carried out as part of a government task with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Johnson D. B. Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials / D. B. Johnson // Current Opinion in Biotechnology. — 2014. — V. 30. — P. 24–31. — doi: 10.1016/j.copbio.2014.04.008

2. Кондратьева Т. Ф. Микроорганизмы в биогеотехнологиях переработки сульфидных руд / Т. Ф. Кондратьева, А. Г. Булаев, М. И. Муравьев — Москва: Наука, 2015. — 212 с.

3. Rawlings D. E. Heavy metal mining using microbes / D. E. Rawlings // Annual Review of Microbiology. — 2002. — V. 56. — P. 65–91. — doi: 10.1146/annurev.micro.56.012302.161052

4. Каравайко Г. И. Биогеотехнология металлов. Практическое руководство / Г. И. Каравайко, Д. Росси, А. Агате и др. —Москва: Центр международных проектов ГКНТ, 1989. —375 с.

5. van Aswegen P.C., van Niekerk J., Olivier W. The BIOX^{TM} process for the treatment of refractory gold concentrate: Biomining / P. C. van Aswegen, J. van Niekerk, W. Olivier; edited by D.E.Rawlings, B.D. Johnson. — Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2007. — P. 1–35. — doi: 10.1007/978-3-540-34911-2

6. Gentina J. C. Application of bioleaching to copper mining in Chile / J. C. Gentina, F. Acevedo // Electronic Journal of Biotechnology. — 2013. — V. 16. Is. 3. — doi: 10.2225/vol16-issue3-fulltext-12

7. Халезов Б. Д. Кучное выщелачивание медных и медно-цинковых руд (отечественный опыт): монография / Б. Д. Халезов; под ред. А. И. Окунева. — Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. — 348 с

8. Mineral commodity summaries 2015 // U.S. Geological Survey, 2015 — 196 p., — doi.org/10.3133/70140094.

9. Kondrat'eva T. F. Percolation bioleaching of copper, zinc and gold recovery from flotation tailings of the sulfide complex ores of the Ural region, Russia / T. F. Kondrat'eva, T. A. Pivovarova, A. G. Bulaev and others // Hydrometallurgy. — 2012. — V. 111−112. — P. 82–86. — doi: 10.1016/j.hydromet.2011.10.007

10. Sagdieva M. G., Borminskiy S. I., Mavjudova A. M., Cherkasova G. V., Scott B. Bioleaching of Whitehorse copper tailing with use of tank method / M. G. Sagdieva, S. I. Borminskiy, A. M. Mavjudova and others // Proceedings of the 19th International Biohydrometallurgy Symposium (IBS 2011) 18−22 September 2011, Changsha, China / Central South university. — Changsha, 2011. — P. 593–596.

11. Черкасова Д. В. Биологическое выщелачивание отходов флотации сульфидных медно-цинковых руд в перколяционной установке / Д. В. Черкасова, М. Д. Бакаева, С. П. Четвериков и др. // Биотехнология. — 2012. — № 6. — С. 61–69.

12. Четверикова Д. В. Биологическое выщелачивание цинка и меди из отходов флотацинного обогащения сульфидных руд Бурибаевского горно-обогатительного комбината в перколяционной установке / Д. В. Четверикова, М. Д. Бакаева, С. П. Четвериков и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2013. — Т. 15. — № 3 (5). — С. 1690–1693.

13. Грановская Н. В. Техногенные месторождения полезных ископаемых / Н. В. Грановская, А. В. Наставкин, Ф. В. Мещанинов. — Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2013. — 93 с.

14. Бурдзиева О. Г. Эколого-экономические аспекты хранения отходов горного производства / О. Г. Бурдзиева, Е. В. Шевченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — №8. — С. 37−42.

15. Орехова Н. Н. Эколого-экономические аспекты комплексной переработки техногенно- го гидроминерального сырья / Н. Н. Орехова, И. В. Шадрунова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — Т. S1. — С. 161−179

16. Соловьянов А. А. Прошлый (накопленный) экологический ущерб: проблемы и решения. 1. Источники и виды загрязнения / А. А. Соловьянов // Экологический вестник России. — 2015. — № 3. — С. 20−26.

17. Parada P. Biomass production and inoculation of industrial bioleaching processes / P. Parada, P. Morales, R. Collao and others // Advanced Materials Research. — 2013. — V. 825. — P. 296−300. — doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.825.296

18. Резников А.А. Методы анализа природных вод / А. А. Резников, Е. П. Муликовская, И. Ю. Соколов. — Москва: Недра, 1970. — 140 с.

19. Филиппова Н. А. Фазовый анализ руд и продуктов их переработки / Н. А. Филипова. — Москва: Химия, 1975. — 279 с.

20. Zaulochnyi P. A. Two-stage process of bacterial-chemical oxidation of refractory pyrite-arsenopyrite gold-bearing concentrate / P. A. Zaulochnyi, A. G. Bulaev, E. E. Savari and others // Applied biochemistry and microbiology. — 2011. — V. 47. — № 9. — P. 833–840. — doi: 10.1134/S0003683811090080

21. Maniatis T. Molecular Cloning: A Laboratory Manual / T. Maniatis, E. Fritsch, D. M. Sambrook. — New York: Cold Spring Harbor Laboratory, 1982.— 545 p.

22. Tamura K. MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 6.0 / K. Tamura, G. Stecher, D. Peterson and others // Molecular Biology and Evolution. — 2013. — V. 30. — P. 2725–2729. — doi: 10.1093/molbev/mst197

23. Булаев А. Г. Применение метода REP-PCR для типирования близкородственных штаммов эвриархей рода Acidiplasma (Thermoplasmatales) / А. Г. Булаев, М. В. Сухачева, Б. Б. Кузнецов // Микробиология. — 2016. — Т. 85. — № 2. — С. 223−226. — doi: 10.1134/S0026261716020041

24. Lottermoser B.G. Mine Wastes. Second Edition. / B. G. Lottermoser. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. — 304 p. — doi: 10.1007/978-3-540-48630-5

25. Watling H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides — A review / H. R. Watling // Hydrometallurgy. — 2006. — V. 84. — P. 81–108. — doi: 10.1016/j.hydromet.2006.05.001

26. Марченко Н.В. Металлургия тяжелых цветных металлов / Н. В. Марченко, Е. П. Вершинина, Э. М. Гильдебрандт. — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — 394 с.

27. Kordosky G. A. Copper recovery using leach/solvent extraction/electrowinning technology / G. A. Kordosky. // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. — 2002. — V. 102. — Is. 8. — P. 445−450. — doi: hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_2713

Список литературы на английском языке / References in English

1. Johnson D. B. Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials / D. B. Johnson // Current Opinion in Biotechnology. — 2014. — V. 30. — P. 24–31. — doi: 10.1016/j.copbio.2014.04.008

2. Kondrat’eva T. F. Mikroorganizmy v biogeotekhnologiyah pererabotki sul'fidnyh rud [Microorganisms in biotechnologies of sulfide ores processing] / T. F. Kondrat’eva , A. G. Bulaev, M. I. Muravyov — Moscow: Nauka, 2015. — 212 p. [in Russian]

3. Rawlings D. E. Heavy metal mining using microbes / D. E. Rawlings // Annual Review of Microbiology. — 2002. — V. 56. — P. 65–91. — doi: 10.1146/annurev.micro.56.012302.161052

4. Karavaiko G. I. Biogeotekhnologiya metallov. [Biogeotechnology of metals] / G. I. Каравайко, G. Rossi, A. Agate and others — Moscow: Centre for International Projects, 1989. —375 p.

5. van Aswegen P.C., van Niekerk J., Olivier W. The BIOX^{TM} process for the treatment of refractory gold concentrate: Biomining / P. C. van Aswegen, J. van Niekerk, W. Olivier; edited by D.E.Rawlings, B.D. Johnson. — Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2007. — P. 1–35. — doi: 10.1007/978-3-540-34911-2

6. Gentina J. C. Application of bioleaching to copper mining in Chile / J. C. Gentina, F. Acevedo // Electronic Journal of Biotechnology. — 2013. — V. 16. Is. 3. — doi: 10.2225/vol16-issue3-fulltext-12

7. Khalezov B. D. Kuchnoe vyshchelachivanie mednyh i medno-cinkovyh rud (otechestvennyj opyt): monografiya [Heap leaching of copper and copper-zinc ores (domestic experience): Monograph] / B.D. Khalezov; edited by A. I. Okunev. — Yekaterinburg: RIO UrO RAN, 2013. — 348 p. [in Russian]

8. Mineral commodity summaries 2015 // U.S. Geological Survey, 2015 — 196 p., — doi.org/10.3133/70140094.

9. Kondrat’eva T. F. Percolation bioleaching of copper, zinc and gold recovery from flotation tailings of the sulfide complex ores of the Ural region, Russia / T. F. Kondrat’eva, T. A. Pivovarova, A. G. Bulaev and others // Hydrometallurgy. — 2012. — V. 111−112. — P. 82–86. — doi: 10.1016/j.hydromet.2011.10.00

10. Sagdieva M. G., Borminskiy S. I., Mavjudova A. M., Cherkasova G. V., Scott B. Bioleaching of Whitehorse copper tailing with use of tank method / M. G. Sagdieva, S. I. Borminskiy, A. M. Mavjudova and others // Proceedings of the 19th

International Biohydrometallurgy Symposium (IBS 2011) 18−22 September 2011, Changsha, China / Central South university. — Changsha, 2011. — P. 593–596.

11. Cherkasova D. V. Biologicheskoe vyshchelachivanie othodov flotacii sul'fidnyh medno-cinkovyh rud v perkolyacionnoj ustanovke [Biological leaching of zinc and copper from the sulphidic ores flotation waste of buribay concentrating industrial complex in the percolator] / D. V. Cherkasova, M. D. Bakaeva, S. P. Chetverikov and others // Biotechnology in Russia. — 2012. — № 6. — P. 61–69. [in Russian]

12. Chetverikova D. V. Biologicheskoe vyshchelachivanie cinka i medi iz othodov flotacinnogo obogashcheniya sul'fidnyh rud Buribaevskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata v perkolyacionnoj ustanovke [Biological leaching of zinc and copper from the sulphidic ores flotation waste of Buribay concentrating industrial complex in the percolator] / D. V. Chetverikova, M. D. Bakaeva, S. P. Chetverikov and others // Izvestia RAS SamSC. — 2013. — T. 15. — № 3 (5). — P. 1690–1693. [in Russian]

13. Granovskaya N. V. Tekhnogennye mestorozhdeniya poleznyh iskopaemyh [Technogenic mineral deposits] / N. V. Granovskaya, A. V. Nastavkin, F. V. Meshchaninov. — Rostov-on-Don: SFU, 2013. — 93 p. [in Russian

14. Burdzieva O. G. Ehkologo-ehkonomicheskie aspekty hraneniya othodov gornogo proizvodstva [Ecological and economic aspects of processing of mining wastes storage] / O. G. Burdzieva, E. V. Shevchenko // Mining informational and analytical bulletin. — 2010. — №8. — P. 37−42. [in Russian]

15. Orekhova N. N. EHkologo-ehkonomicheskie aspekty kompleksnoj pererabotki tekhnogenno- go gidromineral'nogo syr'ya [Ecological and economic aspects processing of technogenic hydromineral raw materials] / I. V. Shadrunova, N. N. Orekhova // Mining informational and analytical bulletin. — 2014. — №. S1. — P. 161−179. [in Russian

16. Solov'yanov A. A. roshlyj (nakoplennyj) ehkologicheskij ushcherb: problemy i resheniya. 1. Istochniki i vidy zagryazneniya [Accumulated environmental damage: problems and solutions. 1. Sources and types of pollution] / A. A. Solov'yanov // Ecological Bulletin of Russia. — 2015. — № 3. — P. 20−26. [in Russian]

17. Parada P. Biomass production and inoculation of industrial bioleaching processes / P. Parada, P. Morales, R. Collao and others // Advanced Materials Research. — 2013. — V. 825. — P. 296−300. — doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.825.296

18. Reznikov A.A. Metody analiza prirodnyh vod [Metody analiza prirodnyh vod] / A. A. Reznikov, E. P. Mulikovskaya, I. Y. Sokolov. — Moscow: Nedra, 1970. — 140 p. [in Russian]

19. Filippova N. A. Phazovyj analiz rud I produktov ih pererabotki [Phase analysis of ores and products thereof] / N. A. Filippova. — Moscow: Chimia, 1975. — 279 p. [in Russian]

20. Zaulochnyi P. A. Two-stage process of bacterial-chemical oxidation of refractory pyrite-arsenopyrite gold-bearing concentrate / P. A. Zaulochnyi, A. G. Bulaev, E. E. Savari and others // Applied biochemistry and microbiology. — 2011. — V. 47. — № 9. — P. 833–840. — doi: 10.1134/S0003683811090080

21. Maniatis T. Molecular Cloning: A Laboratory Manual / T. Maniatis, E. Fritsch, D. M. Sambrook. — New York: Cold Spring Harbor Laboratory, 1982.— 545 p.

22. Tamura K. MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 6.0 / K. Tamura, G. Stecher, D. Peterson and others // Molecular Biology and Evolution. — 2013. — V. 30. — P. 2725–2729. — doi: 10.1093/molbev/mst197

23. Bulaev A. G. Primenenie metoda REP-PCR dlya tipirovaniya blizkorodstvennyh shtammov ehvriarhej roda Acidiplasma (Thermoplasmatales) [Typing of the closely related strains of euryarchaeal genus Acidiplasma (Thermoplasmatales) using REP-PCR DNA fingerprinting] / A. G. Bulaev, M. V. Sukhacheva, B. B. Kuznetsov // Microbiology. — 2016. — V. 85. — № 2. — P. 253−256. — doi: 10.1134/S0026261716020041

24. Lottermoser B.G. Mine Wastes. Second Edition. / B. G. Lottermoser. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. — 304 p. — doi: 10.1007/978-3-540-48630-5

25. Watling H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides — A review / H. R. Watling // Hydrometallurgy. — 2006. — V. 84. — P. 81–108. — doi: 10.1016/j.hydromet.2006.05.001

26. Marchenko N. V. Metallurgiya tyazhelyh cvetnyh metallov [Metallurgy of heavy non-ferrous metals] / N. V. Marchenko, E. P. Vershinina, E. M. Hildebrandt — Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009. — 394 p.

27. Kordosky G. A. Copper recovery using leach/solvent extraction/electrowinning technology / G. A. Kordosky. // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. — 2002. — V. 102. — Is. 8. — P. 445−450. — doi: hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_2713

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МЕДИ И ЦИНКА ИЗ НЕКОНДИЦИОННОГО КОНЦЕНТРАТА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЫШЬЯКА

Научная статья

Булаев А.Г.[1, *], Меламуд В.С.[2], Бодуэн А.Я.[3]

[1] ORCID: 0000-0001-7914-9817,

[1] Биологический факультет, Московский государственный университет имени М.В .Ломоносова; Москва, Россия;

[1, 2] Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук; Москва, Россия;

[3] Санкт-Петербургский горный университет; Санкт-Петербург, Россия;

[3] СП ЗАО «ИВС»; Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (bulaev.inmi[at]yandex.ru)

Аннотация

Был проведен процесс высокотемпературного (90°C) выщелачивания некондиционного полиметаллического концентрата содержащего 6,22% меди, 7,30% цинка, 24,4% железа, 1,7% мышьяка (в виде теннантита) и 38,6% серы. Выщелачивание проводили в четырех вариантах: 1% раствором H_2SO_4, 1% раствором H_2SO_4 с 1 M NaCl, 0,5M раствором ионов Fe^{3+} (в виде сульфата трехвалентного железа), 0,5M раствором ионов Fe^{3+} с 1 M NaCl. Степень извлечения цинка при выщелачивании 1% раствором H_2SO_4 составила около 35%, а в других вариантах эксперимента − около 50%. Степень выщелачивания меди растворами без ионов Fe^{3+} составила около 2-3%, а при выщелачивании 0,5M раствором ионов Fe^{3+} и 0,5M раствором ионов Fe^{3+} с 1 M NaCl составила 13 и 20% соответственно. Кек выщелачивания раствором 0,5M раствором ионов Fe^{3+} был подвергнут дальнейшему выщелачиванию с помощью 0,5M раствором ионов Fe^{3+} с 1 M NaCl. За 3 цикла выщелачивания кека удалось извлечь в раствор около 49% и 92% меди и цинка соответственно. Степень выщелачивания мышьяка во всех вариантах эксперимента была крайне низкой, что указывает невысокую эффективность выщелачивания теннантита. Результаты выполненной работы показывают, что окислительное выщелачивание может быть достаточно перспективным подходом для переработки некондиционных полиметаллических концентратов, однако его использование на практике потребует разработки комбинированных технологических схем, включающих, например, стадию сульфидного выщелачивания для удаления мышьяка.

Ключевые слова: сульфидные концентраты, мышьяк, выщелачивание.

HIGH-TEMPERATURE BIOX OF COPPER AND ZINC FROM NON-STANDARD CONCENTRATE WITH HIGH CONTENT OF ARSENIC

Research article

Bulaev A.G.[1, *], Melamud V.S.[2], Boduen A.Ya.[3]

[1] ORCID: 0000-0001-7914-9817,

[1] Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia;

[1, 2] Vinogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Center "Fundamentals of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia;

[3] St. Petersburg Mining University; Saint-Petersburg, Russia;

[3] V CJSC "IVS"; Saint-Petersburg, Russia

* Corresponding author (bulaev.inmi[at]yandex.ru)

Abstract

The high-temperature process BIOX (90°C) of non-standard polymetallic concentrate containing 6.22% of copper, 7.30% of zinc, 24.4% of iron, 1.7% of arsenic (as tennantite) and 38.6% of sulfur was carried out. BIOX was carried out in four options: 1% H_2SO_4 solution, 1% H_2SO_4 solution with 1 M NaCl, 0.5 M solution of Fe^{3+} ions (in the form of ferric sulfate), 0.5 M solution of Fe^{3+} ions with 1 M NaCl. The degree of zinc extraction during BIOX process with a 1% solution of H_2SO_4 was about 35% and about 50% in other options of the experiment. The degree of copper BIOX with solutions without Fe^{3+} ions was about 2-3%, and when BIOX with a 0.5M solution of Fe^{3+} ions and a 0.5M solution of Fe^{3+} ions with 1 M NaCl, it was 13 and 20%, respectively. The BIOX cake with a 0.5M solution of Fe^{3+} ions was further leached with a 0.5M solution of Fe^{3+} ions with 1 M NaCl. In 3 cycles of cake BIOX, it was possible to extract about 49% and 92% of copper and zinc, respectively, into the solution. The degree of leaching of arsenic in all variants of the experiment was extremely low, which indicates a low efficiency of leaching tennantite. The results of the work show that oxidative BIOX can be quite a promising approach for processing substandard polymetallic concentrates, but its practical application requires the development of combined process flow diagrams, including, for example, a sulfide leaching stage for arsenic removal.

Keywords: sulfide concentrates, arsenic, BIOX.

Введение

Сульфидные руды цветных металлов перерабатываются, главным образом, с помощью пирометаллургических технологий. Технологические схемы переработки сульфидных руд включают стадию флотационного обогащения для получения концентратов и переработку концентратов с помощью обжига, плавки и конвертирования [1]. В настоящий момент металлургия сталкивается с проблемой снижения среднего содержания цветных металлов в руде и исчерпания богатых легкообогатимых руд, что вынуждает вовлекать в переработку руды, непригодные для получения

кондиционных концентратов и приводит к повышению удельных затрат на производство металлов [2], [3]. Одним из типов медных руд, использование которых осложнено из-за высоких экологических рисков, являются руды с высоким содержанием мышьяка, содержащие сульфидные минералы энаргит Cu_3AsS_4 и теннантит $Cu_{12}As_4S_{13}$ [4], [5]. Пирометаллургическая переработка этих руд требует использования особых систем газоочистки, что значительно удорожает себестоимость получения металлов. Поэтому на металлургические комбинаты согласно действующему ГОСТу должны поставляться медные концентраты, в которых содержание мышьяка не превышает 0.6% [6]. Для получения кондиционных медных концентратов из руд с высоким содержанием необходимо проводить селективное обогащение, что приводит к потерям ценных металлов с мышьяк-содержащими сульфидами, либо направлять на переработку концентраты с превышением допустимого содержания мышьяка. Кроме того, из-за тонкого прорастания минералов меди и цинка с пиритом, медные и медно-цинковые руды с высоким содержанием мышьяка, например, с ряда месторождений Южного Урала, являются труднообогатимыми [7]. Таким образом, получение кондиционных концентратов из руд многих медных и медно-цинковых месторождений становится все более трудной задачей из-за исчерпания легкообогатимого сырья, что вынуждает разрабатывать новые технологические подходы, позволяющие решить эти проблемы.

Было установлено, что гидрометаллургические технологии могут быть перспективными для переработки некондиционного минерального сырья. Исследования, которые посвящены гидрометаллургической переработке минерального сырья, содержащего медь и мышьяк, направлены на разработку подходов позволяющих провести как деарсенизацию сырья, так и выщелачивание цветных металлов. Было показано, что автоклавное выщелачивание может позволить удалить мышьяк из медного концентрата путем его селективного выщелачивания и осаждением в виде скородите, и, таким образом, получить кондиционный медный концентрат, снизив содержание мышьяка в концентрате с 1,3% до 0,3% [5]. Существуют примеры применения технологий биовыщелачивания для переработки руд и концентратов цветных металлов, содержащих мышьяк. В 2015 году в Финляндии была введена в эксплуатацию фабрика, перерабатывающая смешанный никелевый концентрат руд месторождений Sotkamo и Vuonos, содержащий около 1,5% мышьяка, непригодный для пирометаллургической переработки. Чановое биоокисление концентрата в течении 7 сут. при T≈45°C обеспечивает 97-98% извлечение Ni и Co [8], [9].

Перспективной технологией может также являться высокотемпературное атмосферное выщелачивание с помощью сернокислых растворов трехвалентного железа [10]. Этот подход позволяет проводить окислительное выщелачивание минерального сырья при условиях, которые обеспечивают более высокую скорость окисления, чем, например, процессы биоокисления благодаря высокой температуре и плотности пульпы, но при этом не требуют проведения технологических операций при высоком давлении, как автоклавное выщелачивание. В ряде работ показано, что эта технология может быть использована для выщелачивания цветных металлов не только из сульфидных концентратов, но и из медеплавильных шлаков и отходов их переработки [10], [11], [12], а также отходов утилизации электроники [13], [14], [15]. В ряде работ показано, что мышьяксодержащие минералы меди могут быть подвергнуты выщелачиванию с помощью растворов, содержащих ионы Fe^{3+} [16].

Целью данной работы являлось проведение процессов высокотемпературного выщелачивания некондиционного полиметаллического концентрата с высоким содержанием мышьяка.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась проба некондиционного полиметаллического концентрата. Основными сульфидными минералами концентрата были пирит (FeS_2), халькопирит $CuFeS_2$, теннантит ($Cu_{12}As_4S_{13}$), сфалерит (ZnS). Концентрат содержал 6,22% меди, 7,30% цинка, 24,4% железа, 1,7% мышьяка и 38,6% серы.

Высокотемпературное химическое выщелачивание проводили в реакторе с титановым корпусом, оборудованным верхнеприводной мешалкой и ультратермостатом для поддержания необходимой температуры. В экспериментах с концентратом выщелачивание проводили с помощью раствора сульфата трехвалентного железа, который содержал около 28 г/л Fe^{3+} (500 мМ) при следующих условиях: температура − 90°C, плотность пульпы Т : Ж = 1 : 4 (250 г концентрата на 1000 мл выщелачивающего раствора). В некоторых вариантах эксперимента в раствор также вносили хлорид натрия в концентрации 58 г/л (1 М), так как ранее было показано, что в присутствии хлорид-иона выщелачивание сульфидных минералов, в частности, халькопирита может происходить с большей скоростью [17].

При проведении процесса выщелачивания производили отбор проб для измерения параметров жидкой фазы, pH и Eh измеряли с помощью pH-метра-милливольтметра pH-150МА (Беларусь), значения Eh выражали относительно нормального водородного электрода. Концентрацию ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} определяли спектрофотометрически роданидным методом [18]. Концентрации меди и цинка определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра с пламенной ионизацией Perkin Elmer 3100 (США). Продолжительность процесса определяли непосредственно в ходе эксперимента − после прекращения восстановления ионов железа Fe^{3+} процесс прекращали.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты испытаний представлены на рис. 1. Выщелачивание проводили в течение 120 минут. Выщелачивание проводили в четырех вариантах: 1% раствором H_2SO_4, 1% раствором H_2SO_4 с 1 М NaCl, 0,5М раствором ионов Fe^{3+} (в виде сульфата трехвалентного железа), 0,5М раствором ионов Fe^{3+} с 1 М NaCl. Необходимо отметить, что наиболее низкой степень выщелачивания цинка была достигнута при выщелачивании 1% раствором H_2SO_4 (около 35%), тогда как в других вариантах эксперимента степень выщелачивания цинка составляла около 50%. При этом степень выщелачивания меди значительно различалась в различных вариантах и была самой высокой при выщелачивании 0,5М раствором ионов Fe^{3+} с 1 М NaCl (около 20%). При выщелачивании 0,5М раствором ионов Fe^{3+} степень выщелачивания меди и цинка составила около 13% и 51% соответственно.

Кек выщелачивания раствором 0,5М раствором ионов Fe^{3+} был подвергнут дальнейшему выщелачиванию с помощью 0,5М раствором ионов Fe^{3+} с 1 М NaCl. Было проведено 3 цикла выщелачивания кека. Продолжительность 2 фазы составила 180 минут, а продолжительность 3 и 4 стадии составили 25 часов. Нужно отметить, что степень

выщелачивания меди и цинка возрастала только на 3 стадии, выщелачивание на 4 стадии не позволило увеличить степень выщелачивания меди и цинка. Суммарно степень выщелачивания меди и цинка составила 49% и 92% соответственно.

Степень выщелачивания мышьяка во всех вариантах эксперимента была крайне низкой (от 1 до 7%). Суммарная степень выщелачивания мышьяка в 4 стадийном выщелачивании составила около 20%. Таким образом, выщелачивание теннантита проходило с достаточно низкой эффективностью.

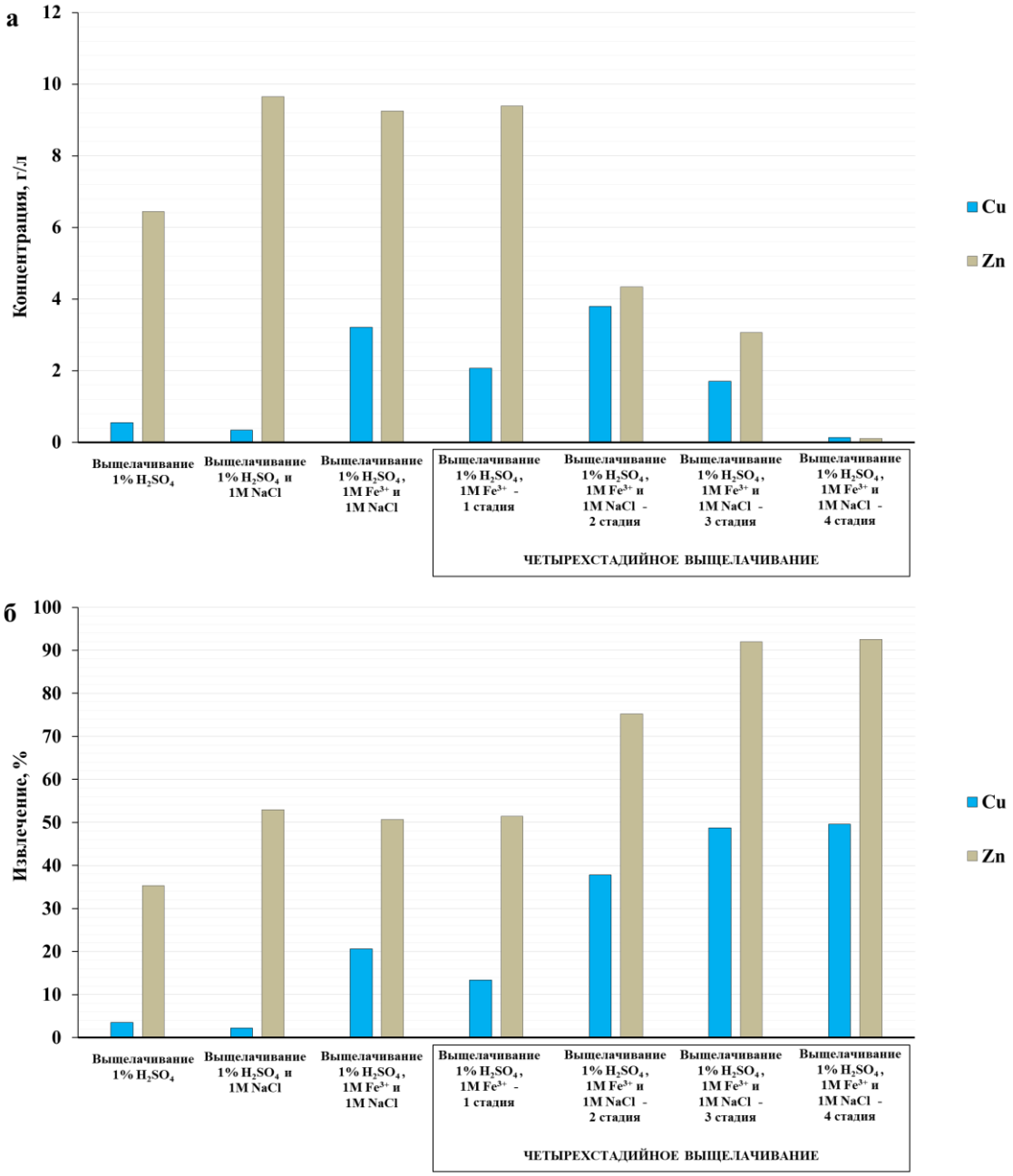


Рис. 1 – Концентрации в продуктивных растворах выщелачивания и степени извлечения меди и цинка меди и цинка

Результаты выполненной работы показывают, что окислительное выщелачивания может быть достаточно перспективным подходом для переработки полиметаллических концентратов с высоким содержанием мышьяка, так как позволяет избежать образования токсичных газовых выбросов. Однако выщелачивание теннантита происходит с достаточно низкой эффективностью (что демонстрируется низкой степенью выщелачивания мышьяка) и может потребовать введения в процесс дополнительных стадий, например сульфидного выщелачивания, которое позволяет выщелочить мышьяк из теннантита и энаргита с образованием сульфидов меди [19]. Необходимо также отметить, что высокотемпературное выщелачивание ионами Fe^{3+} обеспечило большую скорость выщелачивания цветных металлов из концентрата по сравнению с биовыщелачиванием, так как ранее было показано, что биовыщелачивание в течение 7 суток сделало возможным извлечение в раствор около 30% меди и 78% цинка [20].

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16–34–60053 мол_а_дк.

Funding

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research project No. 16–34–60053 mol_a_dk.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Марченко Н. В. Металлургия тяжелых цветных металлов / Н. В. Марченко, Е. П. Вершинина, Э. М. Гильдебрандт. — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — 394 с.

2. Crowson P. Some observationsoncopperyieldsandoregrades / Phillip Crowson // Resources Policy. — 2012. — V. 37. — P. 59–72. — doi: 10.1016/j.resourpol.2011.12.004

3. Elshkaki A. Anthropogenic nickel supply, demand, and associated energy and water use / A. Elshkaki, B. K. Reck, T. E. Graede // Resources, Conservation & Recycling. — 2017. — V. 125. — P. 300–307. — doi: 10.1016/j.resconrec.2017.07.002

4. Filippou D. Recovery of metal values from copper−arsenic minerals and other related resources / D. Filippou, P. St-Germain, T. Grammatikopoulos // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. — 2007. — V. 28:4. — P. 247–298. — doi: 10.1080/08827500601013009

5. Иванов Б. В. Возможность гидрометаллургического кондиционирования низкосортных концентратов, полученных при переработке медно-колчеданных руд / Б. В. Иванов, А. Я. Бодуэн, Ю. Р. Ягудина и др. //Цветные металлы. — 2014. — №.11. — С. 42–46.

6. ГОСТ Р 52998–2008. Концентрат медный. Технические условия (с Поправкой). Введ. 2010–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2008. – 9 с.

7. Ягудина Ю. Р. Повышение качества готового медного концентрата на обогатительной фабрике ОАО "Учалинский ГОК" / Ю. Р. Ягудина, Р. А. Ягудин, А. В. Зимин и др. // Горный журнал. — 2010. — Специальный выпуск. — С. 52–56.

8. Gericke M. Base metal tank bioleaching: from laboratory test work to commercialization / M. Gericke // Advanced Materials Research. — 2015. — V. 1130. — P. 197–200. — doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1130.197

9. Neale J. The MONDO Minerals Nickel Sulfide Bioleach Project: From Test Work to Early Plant Operation / J. Neale, J. Seppälä, A. Laukka, P. van Aswegen, S. Barnett, M. Gericke // Solid State Phenomena. — 2017. — V. 262. — P. 28-32. — doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.262.28

10. Romero R. Copper recovery from chalcopyrite concentrates by BRISA process / R. Romero, A. Mazuelos, I. Palencia and others // Hydrometallurgy. — 2003. — V. — 70. — P. 205–215. — doi: doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00081-1

11. Bulaev A. G. Bioprocessing of mining and metallurgical wastes containing non-ferrous and precious metals / A. G. Bulaev, M. I. Muravyov, T. A. Pivovarova and others // Advanced Materials Research. — 2013. — V. 825. — P. 301–304. — doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.825.301

12. Muravyov M. I. Complex treatment of mining and metallurgical wastes for recovery of base metals / M. I . Muravyov, A. G. Bulaev, T. F. Kondrat'eva // Minerals Engineering. — 2014. — V. — 64. — P. 63–66. — doi: 10.1016/j.mineng.2014.04.007

13. Bryan C. G. The use of pyrite as a source of lixiviant in the bioleaching of electronic waste / C. G. Bryan, E. L. Watkin, T. J. McCredden and others // Hydrometallurgy. — 2015. — V. 152. — P. 33–43. — doi: 10.1016/j.hydromet.2014.12.004

14. Guezennec A.-G. Co-processing of sulfidic mining wastes and metal-rich post-consumer wastes by biohydrometallurgy / A.-G. Guezennec, K. Bru, J. Jacob, P. d'Hugues // Minerals Engineering. — 2015. — V. — 75. — P. 45−53. — doi: 10.1016/j.mineng.2014.12.033

15. Rivera-Vasquez B. F. Rapid atmospheric leaching of enargite in acidic ferric sulfate media / B. F. Rivera-Vasquez, D. Dixon // Hydrometallurgy. —. 2015. — V. 152. — P. 149–158. — doi: 10.1016/j.hydromet.2014.12.012

16. Rivera-Vasquez B. F. Rapid atmospheric leaching of enargite in acidic ferric sulfate media / B. F. Rivera-Vasquez, D. Dixon // Hydrometallurgy. — 2015. — V. 152. — P. 149–158. — doi: 10.1016/j.hydromet.2014.12.012

17. Turan M. D. Improving of copper extraction from chalcopyrite by using NaCl / M. D. Turan, M. Boyrazli, H. S. Altundogan // J. Cent. South Univ. — 2018. — V. 25. — P 21–28. — doi: 10.1007/s11771-018-3713-z

18. Резников А.А. Методы анализа природных вод / А. А. Резников, Е. П. Муликовская, И. Ю. Соколов. — Москва: Недра, 1970. — 140 с.

19. Nazari A.M. Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic / A. M. Nazari, R. Radzinski, A. Ghahreman // Hydrometallurgy. — 2017. — V. 174. — P. 258–281. — doi: 10.1016/j.hydromet.2016.10.011

20. Булаев А. Г. Двустадийная биотехнология переработки мышьяксодержащего медно-цинкового концентрата / А. Г. Булаев // Актуальная биотехнология. — 2018. — №3 (26) . — С. 242−246.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Marchenko N. V. Metallurgiya tyazhelyh cvetnyh metallov [Metallurgy of heavy non-ferrous metals] / N. V. Marchenko, E. P. Vershinina, E. M. Hildebrandt — Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009. — 394 p. [in Russian]

2. Crowson P. Some observations on copper yield sand ore grades / Phillip Crowson // Resources Policy. — 2012. — V. 37. — P. 59–72. — doi: 10.1016/j.resourpol.2011.12.004

3. Elshkaki A. Anthropogenic nickel supply, demand, and associated energy and water use / A. Elshkaki, B. K. Reck, T. E. Graede // Resources, Conservation & Recycling. — 2017. — V. 125. — P. 300–307. — doi: 10.1016/j.resconrec.2017.07.002

4. Filippou D. Recovery of metal values from copper−arsenic minerals and other related resources / D. Filippou, P. St-Germain, T. Grammatikopoulos // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. — 2007. — V. 28:4. — P. 247–298. — doi: 0.1080/08827500601013009

5. Ivanov B. V. Vozmozhnost' gidrometallurgicheskogo kondicionirovaniya nizkosortnyh koncentratov, poluchennyh pri pererabotke medno-kolchedannyh rud [Possibility of hydrometallurgical conditioning of low grade concentrates, obtained during copper-zinc sulfide ores processing] / B. V. Ivanov, A. Ya. Boduen, Yu. R. Yagudina and others // Non-ferrous Metals. — 2014. — №.11. — P. 42–46. [in Russian]

6. GOST R 52998–2008. Koncentrat mednyj. Tekhnicheskie usloviya (s Popravkoj) [Copper concentrate. Specifications]. Vved. 2010–01–01. – M. : Izd-vo standartov, 2008. – 9 p. [in Russian]

7. Yagudina Yu. R. Povyshenie kachestva gotovogo mednogo koncentrata na obogatitel'noj fabrike OAO "Uchalinskij GOK" [Improving the quality of the finished copper concentrate at the enrichment plant of JSC " Uchalinsky GOK"] / Yu. R. Yagudina, R. A. Yagudina, A. V. Zimin and others // Gornyj zhurnal. — 2010. — Special issue. — P. 52–56. [in Russian]

8. Gericke M. Base metal tank bioleaching: from laboratory test work to commercialization / M. Gericke // Advanced Materials Research. — 2015. — V. 1130. — P. 197–200. — doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1130.197

9. Neale J. The MONDO Minerals Nickel Sulfide Bioleach Project: From Test Work to Early Plant Operation / J. Neale, J. Seppälä, A. Laukka, P. van Aswegen, S. Barnett, M. Gericke // Solid State Phenomena. — 2017. — V. 262. — P. 28-32. — doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.262.28

10. Romero R. Copper recovery from chalcopyrite concentrates by BRISA process / R. Romero, A. Mazuelos, I. Palencia and others // Hydrometallurgy. — 2003. — V. — 70. — P. 205–215. — doi: doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00081-1

11. Bulaev A. G. Bioprocessing of mining and metallurgical wastes containing non-ferrous and precious metals / A. G. Bulaev, M. I. Muravyov, T. A. Pivovarova and others // Advanced Materials Research. — 2013. — V. 825. — P. 301–304. — doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.825.301

12. Muravyov M. I. Complex treatment of mining and metallurgical wastes for recovery of base metals / M. I . Muravyov, A. G. Bulaev, T. F. Kondrat'eva // Minerals Engineering. — 2014. — V. — 64. — P. 63–66. — doi: 10.1016/j.mineng.2014.04.007

13. Bryan C. G. The use of pyrite as a source of lixiviant in the bioleaching of electronic waste / C. G. Bryan, E. L. Watkin, T. J. McCredden and others // Hydrometallurgy. — 2015. — V. 152. — P. 33–43. — doi: 10.1016/j.hydromet.2014.12.004

14. Guezennec A.-G. Co-processing of sulfidic mining wastes and metal-rich post-consumer wastes by biohydrometallurgy / A.-G. Guezennec, K. Bru, J. Jacob, P. d'Hugues // Minerals Engineering. — 2015. — V. — 75. — P. 45−53. — doi: 10.1016/j.mineng.2014.12.03

15. Rivera-Vasquez B. F. Rapid atmospheric leaching of enargite in acidic ferric sulfate media / B. F. Rivera-Vasquez, D. Dixon // Hydrometallurgy. —. 2015. — V. 152. — P. 149–158. — doi: 10.1016/j.hydromet.2014.12.012

16. Rivera-Vasquez B. F. Rapid atmospheric leaching of enargite in acidic ferric sulfate media / B. F. Rivera-Vasquez, D. Dixon // Hydrometallurgy. — 2015. — V. 152. — P. 149–158. — doi: 10.1016/j.hydromet.2014.12.012

17. Turan M. D. Improving of copper extraction from chalcopyrite by using NaCl / M. D. Turan, M. Boyrazli, H. S. Altundogan // J. Cent. South Univ. — 2018. — V. 25. — P 21–28. — doi: 10.1007/s11771-018-3713-z

18. Reznikov A.A. Methods of analysis of natural waters [Metody analiza prirodnyh vod] / A. A. Reznikov, E. P. Mulikovskaya, I. Y. Sokolov. — Moscow: Nedra, 1970. — 140 p. [in Russian]

19. Nazari A.M. Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic / A. M. Nazari, R. Radzinski, A. Ghahreman // Hydrometallurgy. — 2017. — V. 174. — P. 258–281. — doi: 10.1016/j.hydromet.2016.10.011

20. Bulaev A. G. Dvustadijnaya biotekhnologiya pererabotki mysh'yaksoderzhashchego medno-cinkovogo koncentrata [Two-stage biotechnology for the treatment of arsenic-bearing coPer-zinc concentrate] / A. G. Bulaev // Actual biotechnology. — 2018. — № 3 (26) . — P. 242−246. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.013

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЛЬФАТОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЦИНКОВЫХ КЕКОВ

Научная статья

Грудинский П.И.[1,] *, Смирнова В.Б.[2], Дюбанов В.Г.[3], Козлов П.А.[4]
[1] ORCID: 0000-0002-7358-150X,
[1, 2, 3] Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия;
Технический университет УГМК, Верхняя Пышма, Россия

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

Аннотация

Приведены результаты исследования процесса сульфатизирующего обжига цинковых кеков с использованием сульфатов железа $FeSO_4$ и $Fe_2(SO_4)_3$. Изучен элементный и фазовый состав, а также микроструктура цинкового кека ПАО «Челябинский цинковый завод». На основе термодинамического расчёта установлены температурные интервалы сульфатизирующего обжига и необходимое количество присадок сульфатов железа для сульфатизации цинка и меди. В лабораторных экспериментах получено, что из обожжённых образцов не менее 98% цинка и не менее 88% меди переходит в раствор в ходе водной отмывки, тогда как степень перехода железа в раствор не превышает 3%. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности сульфатизирующего обжига для перевода содержащихся в цинковых кеках цинка и меди из ферритной в водорастворимую форму.

Ключевые слова: цинковые кеки, сульфатизирующий обжиг, сульфат железа (II), сульфат железа (III), сульфатизация.

STUDY OF SULPHATING ROASTING WITH THE HELP OF IRON SULPHATES IN ZINC CAKES PROCESSING

Research article

Grudinsky P.I. [1,] *, Smirnova V.B. [2], Dyubanov V.G. [3], Kozlov P.A. [4]
[1] ORCID: 0000-0002-7358-150X,
[1, 2, 3] A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow, Russia;
[4] Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

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

Abstract

The results of the study of the process of sulphating roasting of zinc cakes with the help of iron sulfates $FeSO_4$ and $Fe_2(SO_4)_3$ are presented in the article. The elemental and phase composition, as well as the microstructure of the zinc cake of PJSC “Chelyabinsk Zinc Plant” were studied. Based on the thermodynamic calculation, the temperature ranges of the sulphating roasting and the required amount of iron sulfate additives for sulfatization of zinc and copper are established. Laboratory experiments showed that at least 98% of zinc and at least 88% of copper from calcined samples go into solution during water washing, while the degree of transition of iron into the solution does not exceed 3%. The results indicate high efficiency of sulphating roasting for converting zinc and copper contained in zinc cakes from ferritic to water-soluble form.

Keywords: zinc cakes, sulphating roasting, iron (II) sulfate, iron (III) sulfate, sulfatization.

Введение

В настоящее время около 95% цинка производят гидрометаллургическим методом [1, С. 11]. В этом методе полученный после обжига цинковых сульфидных концентратов огарок подвергают сернокислотному выщелачиванию. При этом образуются осадки выщелачивания с высоким содержанием цинка (18-24%) и меди (0,3-1,5%), называемые цинковыми кеками. Цинк и медь в кеках находятся в форме труднорастворимых ферритов. Основным применяемым методом переработки кеков является вельц-процесс [2], основанный на восстановительно-дисстиляционной пирометаллургической переработке во вращающейся трубчатой печи при температурах 1200-1300°С. В результате получаются возгоны (вельц-окись), пригодные для дальнейшего выщелачивания и электролитического извлечения цинка, а также клинкер, используемый для извлечения меди на предприятиях медной промышленности. Вельц-процесс позволяет достигнуть высоких показателей по извлечению цинка (более 90%), однако он достаточно дорогостоящий из-за высокого расхода коксовой мелочи, достигающего 50% по отношению к кеку.

В промышленной практике существуют и гидрометаллургические методы переработки цинковых кеков на основе растворения ферритов цинка и меди серной кислотой высокой концентрации с переводом цинка, меди и железа в раствор и дальнейшем осаждении железа в виде гематита (гематит-процесс), гетита (гетит-процесс) и ярозита (ярозит-процесс) [3, С. 15]. Гематит-процесс предполагает автоклавное осаждение железа при повышенных температурах (180-120°С) с получением железосодержащего осадка, направляемого на предприятия чёрной металлургии или в производство цемента. Однако использование сложного в эксплуатации и дорогого оборудования для автоклавного выщелачивания ограничивает использование этого метода. В гетит-процессе получается цинковый промежуточный продукт, направляемый на окислительный обжиг, а также кек для использования в свинцовом производстве. К недостаткам этого метода можно отнести низкое извлечение в раствор цинка и меди, а также невозможность использования железосодержащего гетитного осадка в чёрной металлургии из-за высокого остаточного содержания в нём цинка. В ярозит-процессе железо осаждают в виде непригодных для использования в чёрной металлургии ярозитов $NH_4Fe_3(SO_4)_2\cdot(OH)_6$, $KFe_3(SO_4)_2\cdot(OH)_6$, $NaFe_3(SO_4)_2\cdot(OH)_6$. По сравнению с гетит-процессом, в ярозит-

процессе выше извлечение цинка и меньше выход железистого осадка, но требуется дополнительная очистка раствора от вредных примесей. Существуют методы для снижения перехода железа в раствор при выщелачивании цинковых кеков путём специальных добавок [4], однако их эффективность недостаточно изучена.

Известны методы пирометаллургической переработки цинковых кеков путём восстановительной плавки [5], восстановительной прокалки [6], флотационной переработки с предварительной сульфидизирующей прокалкой [7]. Разработаны способы сульфатизации цинковых кеков путём прокалки совместно с элементарной серой на воздухе [8], а также совместно с олеумом [9].

В настоящей работе рассмотрен процесс сульфатизирующего обжига цинковых кеков в присутствии сульфатов железа $FeSO_4$ и $Fe_2(SO_4)_3$ с целью перевода соединений цинка и меди в водорастворимую сульфатную форму, а железа в нерастворимые в воде соединения.

Методы

Элементный состав цинкового кека ПАО «Челябинский цинковый завод» был изучен на рентгенофлуоресцентном спектрометре Axios Advanced (Нидерланды), фазовый состав – на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Швейцария) с рентгеновским излучением Cu-K_α. Содержание углерода было определено на приборе LECO CS-400 (США). Микроструктуру цинкового кека исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Zeiss EVO LS10 (Германия) с приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа в режиме детектирования отражённых электронов.

Для термодинамических расчётов использовали программу HSC Chemistry 5.11 [10]. Расчёт равновесных состояний был выполнен в интервале температур 25-900°C и атмосферном давлении. Равновесные составы систем определяли методом минимизации энергии Гиббса для изобарно-изотермических условий. Расчёты были выполнены на 100 кг цинкового кека, компоненты малых содержаний не учитывали. Ввиду отсутствия термодинамических данных для присутствующего в исходном материале ктеназита $Cu_{2.4}Zn_{2.6}(SO_4)_2{\cdot}(OH)_6{\cdot}6H_2O$ он был пересчитан на соответствующие гидраты сульфатов цинка $ZnSO_4{\cdot}6H_2O$ и меди $CuSO_4{\cdot}5H_2O$. На основании результатов элементного и фазового анализов в расчёты были заложены следующий состав цинкового кека: 45,16% $ZnFe_2O_4$; 2,84% ZnS; 11,27% $ZnSO_4{\cdot}6H_2O$; 0,07% ZnO; 8,35% $CuFe_2O_4$; 3,27% $CuSO_4{\cdot}5H_2O$; 0,14% Cu_2S; 0,10% CuO; 10,92% $CaSO_4{\cdot}2H_2O$; 6,02% $PbSO_4$; 2,35% $BaSO_4$; 1,74% FeS; 0,5% Fe_2O_3; 2,22% $CaCO_3$; 1,32% MnS; 0,41% CdO; 1,04% MgO; 0,89% Al_2O_3; 0,84% SiO_2; 0,55% As_2O_3.

Эксперименты были проведены следующим образом. Цинковый кек ПАО «ЧЦЗ», а также чистые реактивы $FeSO_4$ (хч.) и $Fe_2(SO_4)_3$ (хч.) были размолоты до фракции <0,1 мм в агатовой ступке. Смеси готовили в V-образном порошковом смесителе в течение 24 часов. Навески 7,5-12,5 г полученных смесей помещали в муфельную печь, нагревали со скоростью 300°C/час до температуры 625°C и выдерживали в течение 6 ч. Температуру задавали с помощью микропроцессорного автоматического регулятора с использованием управляющей платинородиевой термопары S-типа.

После прокалки выполняли водную отмывку полученных огарков на магнитной мешалке с подогревом MS-H280-Pro, температуру процесса задавали с помощью датчика PT1000. Отмывка была проведена при температуре 70°C, соотношении твёрдого к жидкому Т:Ж = 1:160 и времени перемешивания 30 мин. После фильтрации содержания цинка, меди и железа в полученных растворах были определены методом атомно-абсорционной спектроскопии на приборе Therm Fisher Scientific iCE 3500 (США).

Результаты и их обсуждение

Элементный состав цинкового кека представлен в табл. 1, их дифрактограмма – на рис. 1.

Таблица 1 – Химический состав цинкового кека ПАО «ЧЦЗ», %

Элемент	Fe	Zn	Cu	S	Si	Ca	Mg	Al	Cd	Pb	Ba	K	Mn	As	C
Содержание, %	34,24	15,13	2,92	5,72	1,63	3,1	0,57	0,42	0,32	3,71	1,25	0,2	0,75	0,38	0,24

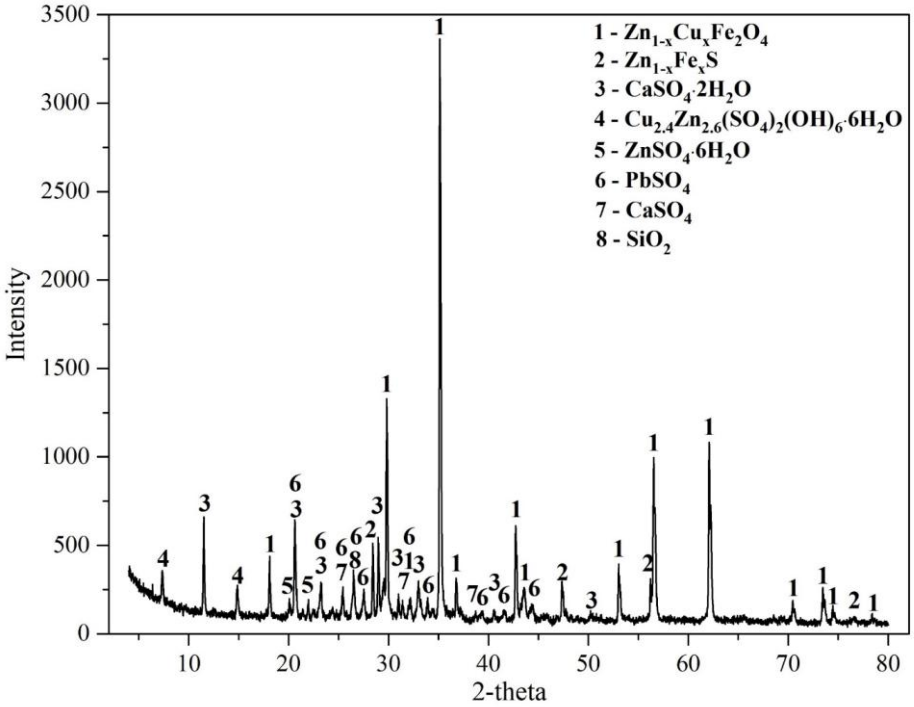


Рис. 1 – Дифрактограмма образца цинкового кека ПАО «ЧЦЗ»

Установлено, что цинковый кек имеет в своём составе более 15% цинка и чуть менее 3% меди. Основными фазами цинкового кека являются феррит цинка-меди $Zn_{1-x}Cu_xFe_2O_4$, сфалерит $Zn_{1-x}Fe_xS$, гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, ктеназит $Cu_{2.4}Zn_{2.6}(SO_4)_2 \cdot (OH)_6 \cdot 6H_2O$, бианкит $ZnSO_4 \cdot 6H_2O$ и англезит $PbSO_4$. Микроструктура образца цинкового кека с обозначением участков показана на рис.2, состав участков представлен в табл. 2.

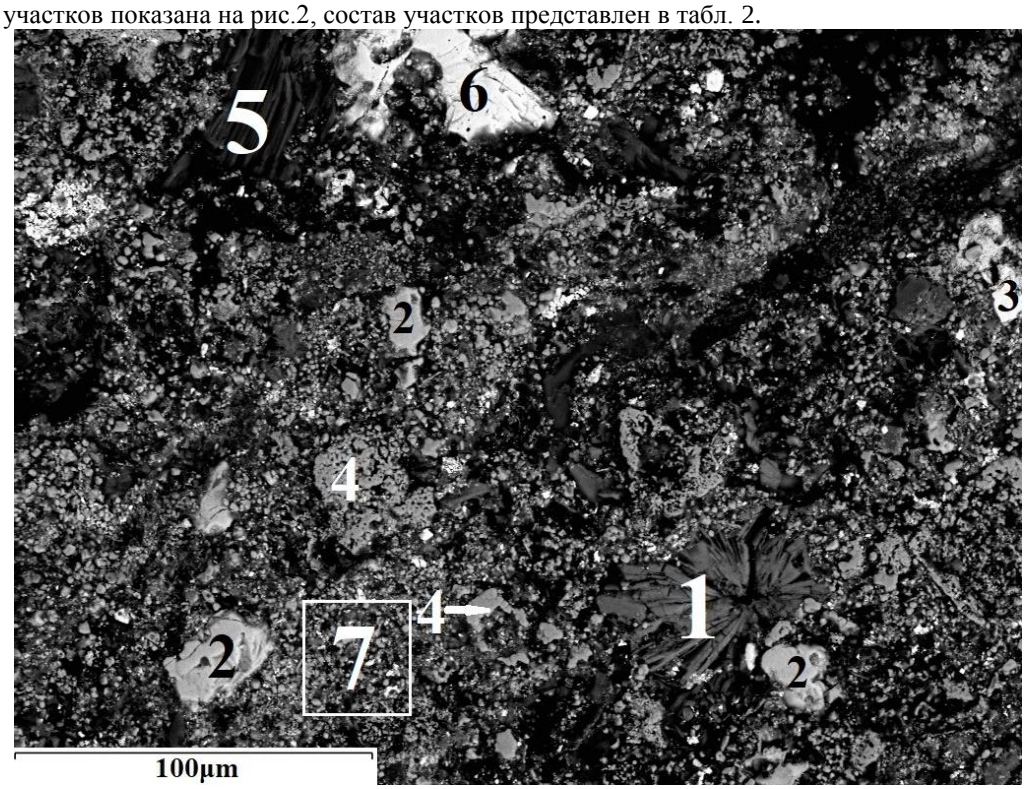


Рис. 2 – Микроструктура образца цинкового кека:
1 – сульфат цинка-меди (ктеназит); *2* – сульфид цинка (сфалерит);
3 – сульфаты свинца и бария (англезит и барит); *4* – феррит цинка-меди; *5* – сульфат кальция (гипс); *6* – сульфат бария (барит); *7* – участок мелких частиц

Таблица 2 – Состав обозначенных цифрами 1-7 участков цинкового кека ПАО «ЧЦЗ»

№	Участки	Состав, % масс.												
		Ca	Al	Si	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	Sr	As	Ba	S	O
1	ктеназит	-	-	-	2,5	23,64	29,96	-	-	-	-	-	11,97	31,92
2	сфалерит	-	-	-	2,53	0,50	63,48	-	0,52	-	-	-	32,98	-
3	англезит и барит	0,67	-	-	2,73	0,37	2,96	43,80	-	1,56	-	13,66	10,87	23,39
4	феррит цинка		0,30	-	47,65	1,79	27,99	-	0,34	-	-	-	0,17	21,76
5	гипс	28,65	-	-	0,69	-	-	-	-	-	-	-	23,63	47,03
6	барит	-	-	-	0,25	-	-	-	-	3,12	-	53,28	14,62	28,73
7	участок мелких частиц	0,45	1,23	2,83	30,24	3,42	22,84	7,36	-	-	0,90	0,92	3,63	26,19

Исследования микроструктуры показали, что основная часть цинкового кека представлена в виде субмикронных частиц, основную часть которой представлена в ферритной форме. Также присутствуют отдельные частицы гипса, ктеназита, сфалерита, барита и англезита размером более 10 мкм.

На рис. 3 и 4 представлены результаты термодинамических расчётов в программе HSC Chemistry.

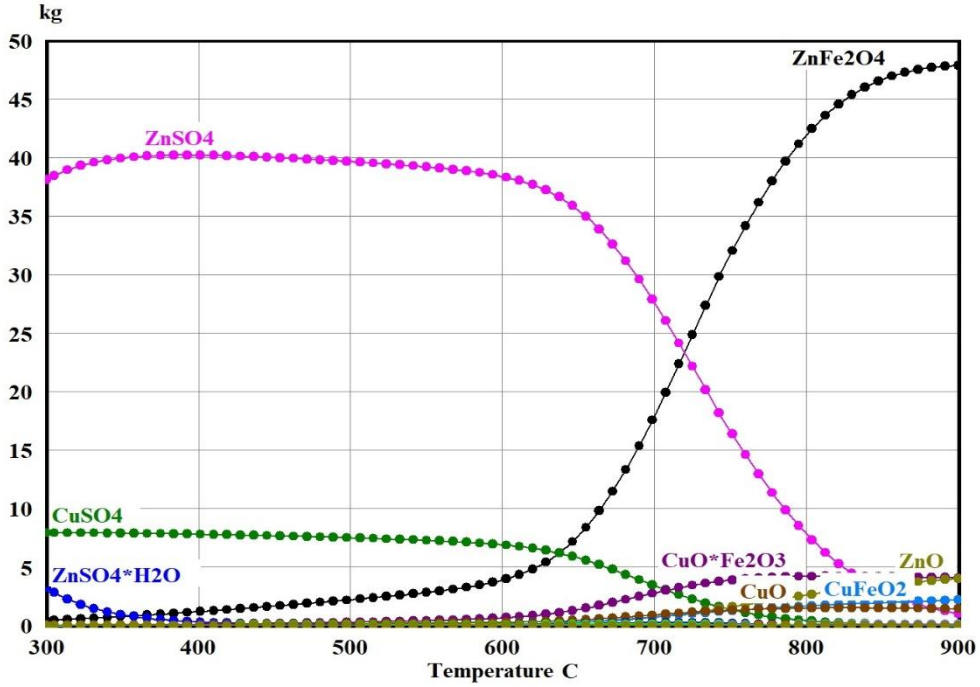


Рис. 3 – Температурная зависимость равновесных количеств соединений цинка и меди в цинковом кеке при 300-900°C при добавлении 100 кг $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

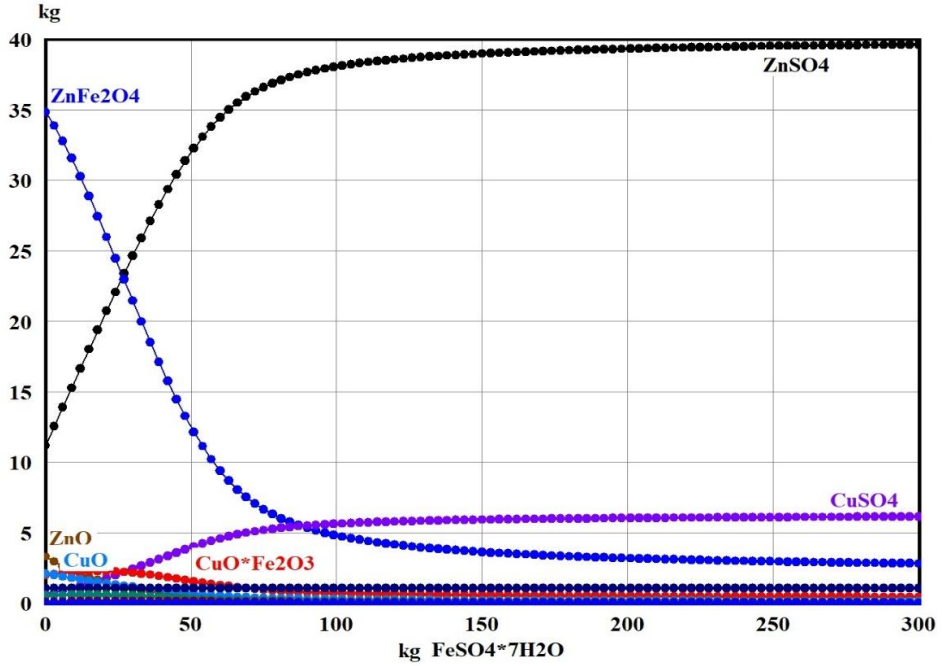


Рис. 4 – Зависимость равновесных количеств соединений цинка и меди от количества добавляемого $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ к 100 кг цинкового кека при 625°C

Расчёты показали, что сульфатизация более 90% цинка и меди, содержащихся в цинковом кеке, возможна в интервале температур 300-650°С. При повышении температуры выше 650°С количество феррита цинка в системах резко возрастает, а получаемых сульфатов цинка и меди – падает. При добавлении в систему $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ и $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ были получены качественно схожие результаты, однако количественно они оказались различными. Установлено, что для сульфатизации более 90% цинка и меди к 100% цинкового кека необходимо добавить не менее 95% $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ или не менее 55% $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$. Также расчёты показали, что железо во всех случаях будет переходить в гематит Fe_2O_3. Таким образом, процесс взаимодействия ферритов цинка и меди с сульфатами железа идёт по следующим общим реакциям:

$$4ZnFe_2O_4 + 4FeSO_4 + O_{2(г)} = 4ZnSO_4 + 6Fe_2O_3 \quad (1)$$

$$3ZnFe_2O_4 + Fe_2(SO_4)_3 = 3ZnSO_4 + 4Fe_2O_3 \quad (2)$$

$$4CuFe_2O_4 + 4FeSO_4 + O_{2(г)} = 4CuSO_4 + 6Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$3CuFe_2O_4 + Fe_2(SO_4)_3 = 3CuSO_4 + 4Fe_2O_3 \quad (4)$$

Реакции (1)-(4) термодинамически возможны во всём исследуемом интервале температур.

Для достоверной проверки возможности сульфатизации цинка и меди были проведены эксперименты со смесями при значительном избытке сульфатов к цинковому кеку по отношению к расчётным значениям. Их результаты представлены в табл. 3. Для сравнения необработанный цинковый кек без предварительного сульфатизирующего обжига также был подвергнут водной отмывке.

Таблица 3 – Степень извлечения компонентов из цинкового кека и огарков после обжига смесей при 625°С в течение 6 часов и последующей водной отмывки, %

№	Компоненты смесей	Массовое соотношение	Степень извлечения, %		
			Zn	Cu	Fe
1	Цинковый кек без обжига	-	23,5	1,8	-
2	Цинковый кек + $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	1:2	99,5	88,9	2,6
3	Цинковый кек + $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	1:1	98,5	89,1	1,8

Как следует из приведенных данных, сульфатизирующий обжиг обеспечил значительно более полное извлечение цинка и меди в раствор по отношению к необожжённому кеку. В процессе отмывки цинкового кека в раствор переходит лишь небольшая доля цинка и меди, вероятно, находящаяся в виде сульфатных соединений. Из обожжённых образцов в раствор перешло более 98% цинка и более 88% меди, при этом степень перехода железа в раствор оказалась незначительной.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности сульфатизирующего обжига для перевода содержащихся в цинковых кеках цинка и меди из ферритной в водорастворимую форму при использовании обоих сульфатов железа. При этом железосодержащий осадок с железом в форме гематита имеет перспективы быть использованным в качестве сырья в чёрной металлургии. Параметры обжига и отмывки для конкретных условий производства могут быть оптимизированы в части количества сульфатизаторов, температуры процесса и времени обжига. Предложенный подход может быть использован для переработки других материалов, содержащих цинк и медь в виде труднорастворимых ферритов.

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной по программе Президиума РАН №39 (проект № АААА-А18-118031490126-8)

Funding

The article was prepared based on the results of the work carried out under the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 39 (project No. AAAA-A18-118031490126-8).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Информационный справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 13-2016. Производство свинца, цинка и кадмия. М.: Бюро НДТ, 2016. – 253 с.

2. Kozlov P. A. The Waelz Process / P. A. Kozlov. – Moscow: Ore and metals publishing house, 2003. – 160 p.

3. Fugleberg S. Finnish expert report on best available techniques in zinc production / S. Fugleberg. – Helsinki: Edita Ltd, 1999. – 45 p.

4. Alizadeh R. Recovery of zinc from leach residues with minimum iron dissolution using oxidative leaching / R. Alizadeh, F. Rashchi, R. Vahidi // Waste Management & Research. – 2011. – V. 29, Iss. 2. – P. 165–171. doi: 10.1177/0734242X10372661

5. Chumarev V. M. Carbon metallothermic smelting of zinc cakes in the electric furnace / V. M. Chumarev, E. N. Selivanov, G. P. Kharitidi, et al. // Proceedings – European Metallurgical Conference, EMC 2009. – 2009. – V. 3. – P. 817–832.

6. Peng N. Decomposition of zinc ferrite in zinc leaching residue by reduction roasting / N. Peng, B. Peng, L. Y. Chai, et al. // Procedia Environmental Sciences. – 2012. – V.16. – P. 705-714. doi: 10.1016/j.proenv.2012.10.097

7. Zheng Y. X. An innovative technology for recovery of zinc, lead and silver from zinc leaching residue / Y. X. Zheng, J. F. Lu, W. Liu // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2016. – V. 52, Iss. 2. – P. 943–954. doi: 10.5277/ppmp160233

8. Zhang Y. Zinc recovery from franklinite by sulphation roasting / Y. Zhang, X. Yu, X. Li // Hydrometallurgy. – 2011. – V. 109. – P. 211–214. doi: 10.1016/j.hydromet.2011.07.002

9. Алкацева В. М. Принципиальная схема переработки цинковых кеков / В. М. Алкацева // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2014. – №3. – С. 28–32.

10. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database / A. Ronie. – Pori: Outokumpu Research OY, 2002. – 448 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Informatsionnyy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 13-2016. Proizvodstvo svintsa, tsinka i kadmiya [Best Available Technique information guide ITS 13-2016. Production of lead, zinc and cadmium]. M. : Byuro NDT, 2016. – 253 p. [In Russian]

2. Kozlov P. A. The Waelz Process / P. A. Kozlov. – Moscow: Ore and metals publishing house, 2003. – 160 p.

3. Fugleberg S. Finnish expert report on best available techniques in zinc production / S. Fugleberg. – Helsinki: Edita Ltd, 1999. – 45 p.

4. Alizadeh R. Recovery of zinc from leach residues with minimum iron dissolution using oxidative leaching / R. Alizadeh, F. Rashchi, R. Vahidi // Waste Management & Research. – 2011. – V. 29, Iss. 2. – P. 165–171. doi: 10.1177/0734242X10372661

5. Chumarev V. M. Carbon metallothermic smelting of zinc cakes in the electric furnace / V. M. Chumarev, E. N. Selivanov, G. P. Kharitidi, et al. // Proceedings – European Metallurgical Conference, EMC 2009. – 2009. – V. 3. – P. 817–832.

6. Peng N. Decomposition of zinc ferrite in zinc leaching residue by reduction roasting / N. Peng, B. Peng, L. Y. Chai, et al. // Procedia Environmental Sciences. – 2012. – V.16. – P. 705-714. doi: 10.1016/j.proenv.2012.10.097

7. Zheng Y. X. An innovative technology for recovery of zinc, lead and silver from zinc leaching residue / Y. X. Zheng, J. F. Lu, W. Liu // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2016. – V. 52, Iss. 2. – P. 943–954. doi: 10.5277/ppmp160233

8. Zhang Y. Zinc recovery from franklinite by sulphation roasting / Y. Zhang, X. Yu, X. Li // Hydrometallurgy. – 2011. – V. 109. – P. 211–214. doi: 10.1016/j.hydromet.2011.07.002

9. Alkatseva V. M. Printsipial'naya skhema pererabotki tsinkovykh kekov [The principal diagram of zinc cakes processing] / V. M. Alkatseva // Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya. – 2014. – №3. – P. 28–32. [In Russian]

10. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database / A. Ronie. – Pori: Outokumpu Research OY, 2002. – 448 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.014

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ХВОСТОВ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЛЬФАТОВ ЖЕЛЕЗА

Научная статья

Грудинский П.И.[1,] *, Дюбанов В.Г.[2]
[1] ORCID: 0000-0002-7358-150X,
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия;

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

Аннотация

Представлены результаты исследования сульфатизирующего обжига хвостов переработки медных шлаков (песков) Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) с использованием сульфатов железа (II) и (III). Изучен элементный и фазовый состав, а также микроструктура песков СУМЗ. Путём термодинамического моделирования установлены температуры сульфатизирующего обжига и необходимые количества сульфатов железа для сульфатизации цинка и меди. Лабораторные эксперименты показали, что степень извлечения цинка и меди из обожжённых образцов в ходе водной отмывки находится в пределах 60-79% при степени перехода железа в раствор менее 1,1%. Полученные результаты сопоставимы с результатами прямого выщелачивания песков концентрированной серной кислотой.

Ключевые слова: хвосты производства меди, сульфатизирующий обжиг, сульфат железа (II), сульфат железа (III), сульфатизация.

RESEARCH OF THE PROCESS OF SULPHATING ROASTING OF ZINC-CONTAINING TAILINGS IN COPPER PRODUCTION USING IRON SULFATES

Research article

Grudinsky P.I.[1,] *, Dyubanov V.G.[2]
[1] ORCID: 0000-0002-7358-150X,
[1, 2] Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS, Moscow, Russia;

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

Abstract

The article presents the results of the study of sulphating roasting of tailings of copper slag processing (sands) of the Sredneuralsk copper-smelting plant (SCSP) using iron sulfates (II) and (III). The elemental and phase composition, as well as the microstructure of SCSP sands were studied. Based on the thermodynamic calculation, the temperature ranges of the sulphating roasting and the required amount of iron sulfate additives for the sulfatization of zinc and copper are established. Laboratory experiments showed that the degree of zinc and copper extraction from the calcined samples during water washing is in the range of 60-79% with the degree of transition of iron into the solution less than 1.1%. Obtained results are comparable to the results of direct leaching of sand with concentrated sulfuric acid.

Keywords: copper production tailings, sulfating roasting, iron sulfate (II), iron sulfate (III), sulfatization.

Введение

В РФ для извлечения меди добывают руды с содержанием меди 0,4-1% [1, С. 3]. В связи с истощением природных месторождений и одновременным накоплением техногенных отходов в настоящее время возникает необходимость в переработке образующихся и отвальных шлаков медной плавки. На предприятиях медной промышленности извлечение меди из них ведётся методом флотации [2]. При этом образуются хвосты обогащения шлаков плавки меди, содержания цинка и меди в которых больше, чем в рудах разрабатываемых месторождений. Только на Среднеуральском медеплавильном заводе (СУМЗ) накоплено несколько миллионов тонн таких хвостов, в которых содержится 0,3-0,45% Cu, 2,7-3,2% Zn, 33-37% Fe [3], что делает их перспективным сырьём для извлечения металлов. Эти хвосты называют техническими песками из-за высокого содержания в них кремниевых фаз. Отвальные хвосты флотации содержат медь и цинк, в основном, в виде труднообогатимых и труднорастворимых ферритов и имеют сложную минералогическую структуру, поэтому освоенные промышленные флотационные и металлургические методы не могут быть эффективны для их переработки.

В мировой практике хвосты обогащения медных руд частично вовлекаются в производство цемента [4] и бетона [5], [6]. Однако, содержащиеся в песках СУМЗ значительные количества цветных металлов ограничивают их использование в строительной отрасли. В настоящее время всё больший интерес вызывают гидрометаллургические методы извлечения меди из хвостов обогащения медеплавильных предприятий. В работе [7] был исследован метод сернокислотного выщелачивания отвальных хвостов со средним содержанием меди 0,2%. Извлечение меди в раствор составило 60-70% при низком извлечении железа (2-3%). В работе [8] были определены оптимальные условия выщелачивания хвостов серной кислотой, извлечение меди составило 84,7%. В работе [9] провели опыты по сернокислотному выщелачиванию хвостов медеплавильного производства с последующим дробным осаждением в четыре стадии с помощью $Ca(OH)_2$ и Na_2S. На выходе получили четыре продукта: железистый с 49% Fe, медный с 19,5% Cu, цинковый с 33,4% Zn и марганцевый с 14,1% Mn. Данные работ авторов [7], [10] показывают, что прямое выщелачивание хвостов с высокими концентрациями серной кислоты позволяет извлечь цинк и медь лишь на 60-85%.

В настоящей работе с целью перевода соединений цинка и меди в легко растворимую форму был опробован способ предварительного сульфатизирующего обжига хвостов с использованием сульфатов железа $FeSO_4$ и $Fe_2(SO_4)_3$ и последующей водной отмывки.

Методы

Элементный состав хвостов производства меди (песков) Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) был изучен на рентгенофлуоресцентном спектрометре Axios Advanced (Нидерланды), фазовый состав – на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Швейцария) с рентгеновским излучением Cu-K_α. Содержание углерода было определено на приборе LECO CS-400 (США). Микроструктуру песков исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Zeiss EVO LS10 (Германия) с приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа в режиме детектирования отражённых электронов.

Для термодинамических расчётов использовали программу HSC Chemistry 5.11 [11]. Расчёт равновесных состояний был выполнен в интервале температур 25-900°C и атмосферном давлении. Равновесные составы систем определяли методом минимизации энергии Гиббса для изобарно-изотермических условий. Расчёты были выполнены на 100 кг песков, компоненты малых содержаний не учитывали. На основании результатов элементного и фазового анализов в расчёты был заложен следующий состав песков: 71,25% Fe_2SiO_4; 5,68% $ZnFe_2O_4$; 2,11% ZnS; 3,31% $ZnSiO_3$; 0,84% $CuFe_2O_4$; 0,65% $CuFeS_2$; 1,64% K_2SO_4; 1,24% Fe_3O_4; 5,1% $CaSiO_3$; 0,30% PbS; 0,38% $BaSO_4$; 3,46% $CaMgSi_2O_6$; 3,82% Al_2O_3; 0,22% As_2O_3.

Эксперименты были проведены следующим образом. Пески СУМЗ, а также чистые реактивы $FeSO_4$ (хч.) и $Fe_2(SO_4)_3$ (хч.) были размолоты до фракции <0,1 мм в агатовой ступке. Смеси готовили в V-образном порошковом смесителе в течение 24 часов. Навески по 8,75 г полученных смесей помещали в муфельную печь, нагревали со скоростью 300°C/час до температуры 625°C и выдерживали в течение 6 ч. Температуру задавали с помощью микропроцессорного автоматического регулятора с использованием управляющей платинородиевой термопары S-типа.

После прокалки выполняли отмывку полученных огарков в дистиллированной воде на магнитной мешалке с подогревом MS-H280-Pro, температуру процесса задавали с помощью датчика PT1000. Отмывка была проведена при температуре 70°C, соотношении твёрдого к жидкому Т:Ж = 1:160 и времени перемешивания 30 мин. После фильтрации содержания цинка, меди и железа в полученных растворах были определены методом атомно-абсорционной спектроскопии на приборе Therm Fisher Scientific iCE 3500 (США).

Результаты и их обсуждение

Элементный состав песков СУМЗ представлен в табл. 1, их дифрактограмма – на рис. 1.

Таблица 1 – Химический состав песков СУМЗ, %

Материал	Fe	Zn	Cu	S	Si	Ca	Mg	Al	Pb	Ba	K	Mn	Ti	As	C
Содержание, %	42,32	3,11	0,44	1,2	12,36	2,35	0,38	1,98	0,26	0,22	0,72	0,06	0,06	0,17	0,08

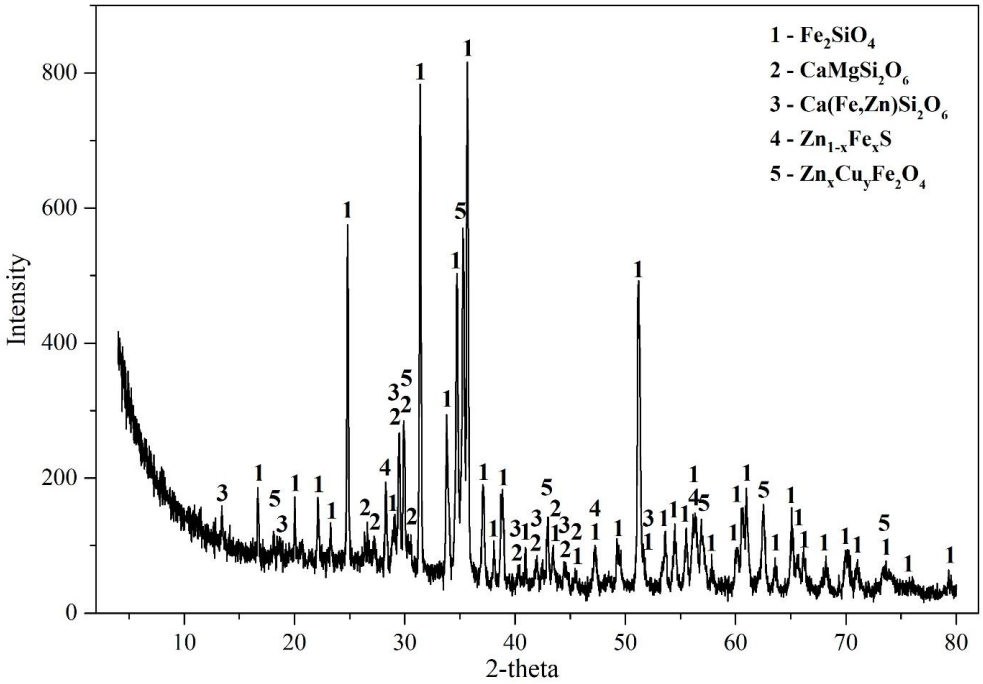


Рис. 2 – Дифрактограмма образца песков СУМЗ

Установлено, что пески имеют в своём составе более 3% цинка и более 0,4% меди. Основной фазой песков является фаялит Fe_2SiO_4, также присутствуют феррит цинка-меди $Zn_xCu_yFe_2O_4$, сфалерит $Zn_{1-x}Fe_xS$, диопсид $CaMgSi_2O_6$, пироксен $CaFe_xZn_{1-x}Si_2O_6$ и аморфная фаза. Микроструктура образца песков с обозначением участков показана на рис. 2, состав участков представлен в табл. 2.

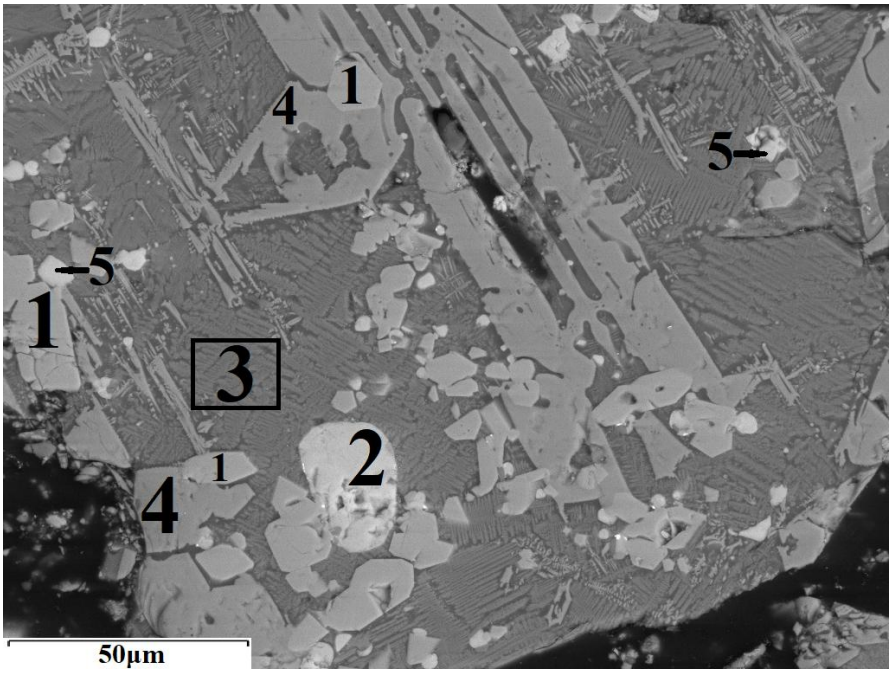


Рис. 2 – Строение образца песков СУМЗ: 1 – оксид железа-цинка; 2 – сульфид меди-железа-цинка; 3 – силикат железа-кальция; 4 – силикат железа (фаялит); 5 – сульфид цинка-железа (сфалерит)

Таблица 2 – Состав основных участков песков СУМЗ

№	Участки	Состав, %масс.											
		Ca	Mg	Al	Si	Fe	Cu	Zn	Ba	Ti	K	S	O
1	оксид железа-цинка	-	-	3,04	0,27	67,82	-	4,04	-	0,83	-	-	24
2	сульфид меди-цинка-железа	-	-	-	-	36,68	21,62	5,25	-	-	-	36,45	-
3	силикат железа-кальция	9,36		4,59	21,69	16,78	-	4,97	0,4	-	1,19	0,81	40,21
4	силикат железа	0,54	1,49	-	13,79	47,60	-	4,83	-	-	-	-	31,75
5	сульфид цинка-железа	-	-	-	0,38	11,05	-	54,84	-	-	-	33,73	-

Исследования микроструктуры показали, что образец состоит из шлаковых частиц, в которых присутствует фаялитовая основа, закристаллизованные из расплава многообразные силикаты, ферритные зёрна, а также включения сульфидных частиц. Большая часть сульфидных частиц имеет размер менее 30 мкм. Медные сульфидные частицы, которые представлены, в основном, частицами халькопирита $CuFeS_2$, представлены в виде составляющих менее 2 мкм.

На рис. 3 и 4 представлены результаты термодинамических расчётов в программе HSC Chemistry, с помощью которых исследовали влияние добавления сульфата железа (III) к пескам.

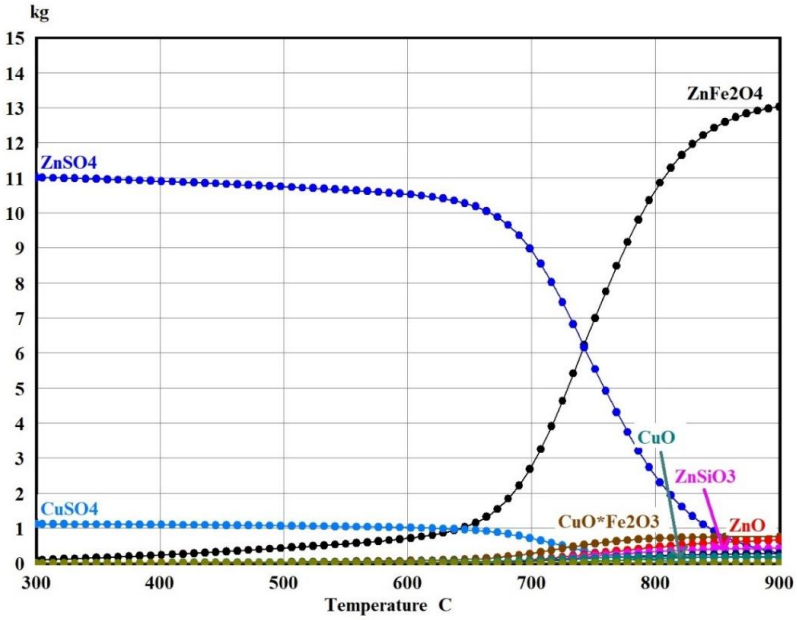


Рис. 3 – Температурная зависимость равновесных количеств соединений цинка и меди в песках при 300-900°С при добавлении 100 кг $Fe_2(SO_4)_3$

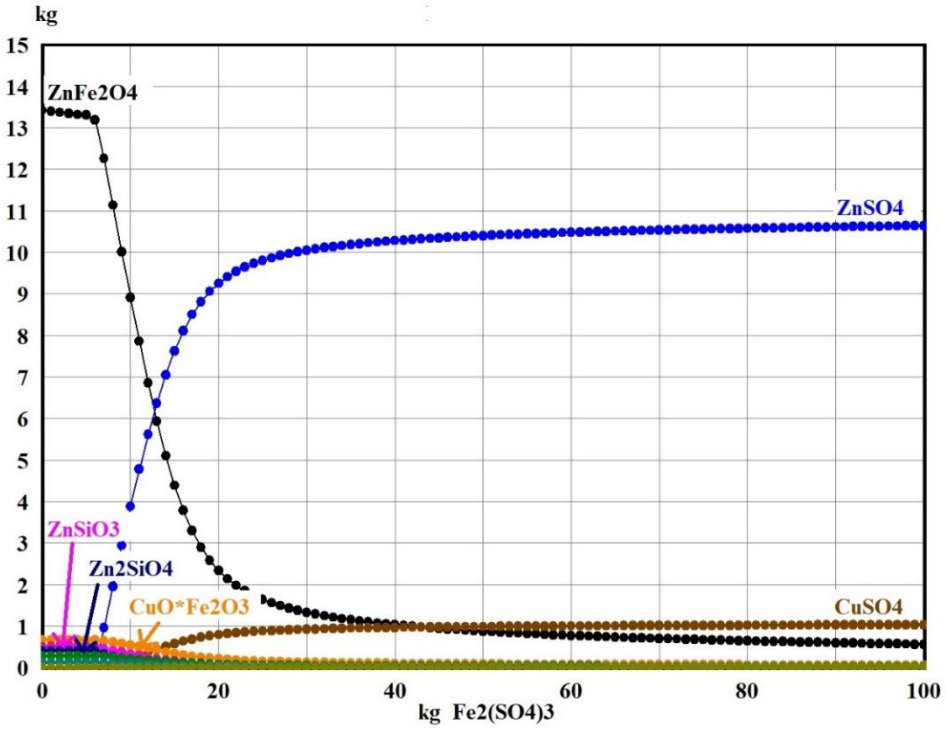


Рис. 4 – Зависимость равновесных количеств соединений цинка и меди от количества добавляемого $Fe_2(SO_4)_3$ к 100 кг песков при 625°С

Расчёты показали, что цинк и медь, содержащиеся в песках, переходят сульфаты в интервале температур 300-650°С. При температурах выше 650°С количество ферритов в системе резко возрастает, а количество сульфатов падает. Добавление в систему сульфата железа (III) и сульфата железа (II) приводит к количественно разным результатам, но сульфатизация ферритов цинка и меди имеет место в обоих случаях. Установлено, что для сульфатизации более 90% цинка и меди к 100% песков необходимо добавить не менее 35% $FeSO_4$ или не менее 32% $Fe_2(SO_4)_3$.

Расчёты были проверены экспериментально при значительном избытке сульфатов к пескам по отношению к расчётным значениям (см. табл. 3).

Таблица 3 – Степень извлечения в раствор компонентов из образцов после обжига смесей при 625°С в течение 6 часов и последующей водной отмывки, %

№	Компоненты смесей	Массовое соотношение	Степень извлечения, %		
			Zn	Cu	Fe
1	Пески СУМЗ + $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	1:1,5	78,8	83,2	0,54
2	Пески СУМЗ + $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	1:0,75	66,8	60,6	1,12

Как видно из табл. 3, добавляемый к пескам сульфат железа (II) способствует большему переходу в раствор цинка и меди, чем сульфат железа (III). В обоих случаях полученные данные по степени извлечения цинка и меди сопоставимы с результатами, представленными в работах [7, 10], где хвосты производства меди без предварительной обработки растворяли в концентрированной серной кислоте. В отличие от сернокислотного выщелачивания, в предложенном в настоящем исследовании методе получены растворы с низким содержанием железа и других примесных компонентов, что будет способствовать облегчению их последующей очистки. Кроме того, для водной отмывки не потребуется использование химически стойкого к кислотам оборудования.

Для увеличения степени извлечения цинка и меди в раствор необходима оптимизация температуры и времени сульфатизирующего обжига, а также вида и количества сульфатизаторов. Использование для отмывки кислотных, щелочных или солевых растворов может также повысить извлечение цинка и меди, однако приведёт к переходу в раствор других нежелательных примесей.

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной по программе Президиума РАН №39 (проект № АААА-А18-118031490126-8)

Funding

The article was prepared based on the results of the work carried out under the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 39 (project No. AAAA-A18-118031490126-8)

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Информационный справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 23-2017. Добыча и обогащение руд цветных металлов. М.: Бюро НДТ, 2017. – 327 с.

2. Кориневская Г. Г. Медеплавильные шлаки и вопросы утилизации минеральных отходов / Г. Г. Кориневская, В. А. Муфтахов, А. Л. Котельникова и др. // Минералогия техногенеза. – 2014. – № 15. – С. 244–250.

3. Макаров А. Б. Минеральный состав отходов переработки отвальных шлаков среднеуральского медеплавильного завода и оценка их потенциальной экологической опасности / А. Б. Макаров, О. М. Гуман, И. А. Долинина // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. – 2010. – №7. – С. 80–86.

4. Onuaguluchi O. Cement Mixtures Containing Copper Tailings as an Additive: Durability Properties / O. Onuaguluchi, O. Eren // Materials research. – 2012, V. 15, №6. – P. 1029–1036. doi: 10.1590/S1516-14392012005000129

5. Onuaguluchi O. Copper tailings as a potential additive in concrete: consistency, strength and toxic metal immobilization properties / O. Onuaguluchi, O. Eren // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – 2012, V. 19. – P. 79–86.

6. Thomas B.S. Strength and durability characteristics of copper tailing concrete / B. S. Thomas, A. Damare, R. C. Gupta // Construction and Building Materials. – 2013, V. 48. – P. 894–900. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.075

7. Antonijevic M. M. Investigation of the possibility of copper recovery from the flotation tailings by acid leaching / M. M. Antonijevic, M. D. Dimitrijevic, Z. O. Stevanovic, et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2008, V. 158. – P. 23–34. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.063

8. Liu D. Recovery of copper from flotation tailings by leaching / D. Liu, S. M. Wen, Y. J. Xian // Applied Mechanics and Materials. – 2013, V. 325-326. – P. 128–132. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.128

9. Chen T. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology / T. Chen, C. Lei, B. Yan, et al. // Hydrometallurgy. – 2014, V. 147-148. – P. 178–182. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.116

10. Реутов Д. С. Выщелачивание хвостов флотации, полученных после переработки медеплавильных шлаков // Д. С. Реутов, Н. А Ватолин, Б. Д. Халезов и др. / V международная конференция-школа по химической технологии. Волгоград. 20 мая 2016 г. Сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 3х томах. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2016. – С. 171–172.

11. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database / A. Ronie. – Pori: Outokumpu Research OY, 2002. – 448 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Informatsionnyy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 23-2017. Proizvodstvo svintsa, tsinka i kadmiya [Best Available Technique information guide ITS 23-2017. Mining and dressing of ores of nonferrous metals]. M. : Byuro NDT, 2017. – 327 p. [in Russian]

2. Korinevskaya G. G. Medeplavil'nye shlaki i voprosy utilizatsii mineral'nyh othodov [Copper-smelting slags and utilization problems of mineral wastes] / G. G. Korinevskaya, V. A. Muftahov, A. L. Kotel'nikova, et al. // Mineralogiya tekhnogeneza [Mineralogy of technogenesis]. – 2014. – № 15. – P. 244–250. [in Russian]

3. Makarov A. B. Mineral'nyy sostav otkhodov pererabotki otval'nyh shlakov sredneural'skogo medeplavil'nogo zavoda i otsenka ih potentsial'noy ekologicheskoy opasnosti [Mineral composition of wastes from dump slag of Sredneuralsk Copper Smelter Plant and assessment of their potential environmental hazard] / A. B. Makarov, O. M. Guman, I. A. Dolinina // Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Bulletin of the Ural Branch of the Russian Mineralogical Society]. – 2010. – №7. – P. 80–86. [in Russian]

4. Onuaguluchi O. Cement Mixtures Containing Copper Tailings as an Additive: Durability Properties / O. Onuaguluchi, O. Eren // Materials research. – 2012, V. 15, №6. – P. 1029–1036. doi: 10.1590/S1516-14392012005000129

5. Onuaguluchi O. Copper tailings as a potential additive in concrete: consistency, strength and toxic metal immobilization properties / O. Onuaguluchi, O. Eren // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – 2012, V. 19. – P. 79–86.

6. Thomas B. S. Strength and durability characteristics of copper tailing concrete / B. S. Thomas, A. Damare, R. C. Gupta // Construction and Building Materials. – 2013, V. 48. – P. 894–900. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.075

7. Antonijevic M. M. Investigation of the possibility of copper recovery from the flotation tailings by acid leaching / M. M. Antonijevic, M. D. Dimitrijevic, Z. O. Stevanovic, et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2008, V. 158. – P. 23–34. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.063

8. Liu D. Recovery of copper from flotation tailings by leaching / D. Liu, S. M. Wen, Y. J. Xian // Applied Mechanics and Materials. – 2013, V. 325-326. – P. 128–132. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.128

9. Chen T. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology / T. Chen, C. Lei, B. Yan, et al. // Hydrometallurgy. – 2014, V. 147-148. – P. 178–182. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.116

10. Reutov D. S. Vyshchelachivanie hvostov flotatsii, poluchennyh posle pererabotki medeplavil'nyh shlakov [Leaching of flotation tailings obtained during processing of copper smelting slag] // D. S. Reutov, N. A Vatolin, B. D. Halezov, et al. / V mezhdunarodnaya konferentsiya-shkola po himicheskoy tekhnologii. Volgograd. 20 maya 2016 g. Sbornik tezisov dokladov satellitnoy konferentsii XX Mendeleevskogo s"ezda po obshchey i prikladnoy himii: v 3h tomah [V International Conference-school of Chemical Technology. Volgograd. May 20, 2016. Proceedings of reports of the satellite conference of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 3 volumes], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet [Volgograd state technical university], 2016. – P. 171–172. [in Russian]

11. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database / A. Ronie. – Pori: Outokumpu Research OY, 2002. – 448 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.015

МНОГОТОПЛИВНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ С ТЕПЛОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ, СПОСОБНАЯ ЭФФЕКТИВНО РАБОТАТЬ В УСЛОВИЯХ СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ КАЗАХСТАНА

Научная статья

Мехтиев А.Д.[1], Югай В.В.[2], Алькина А.Д.[3], Есенжолов У.С.[4, *], Калиаскаров Н.Б.[5]

[1] ORCID: 0000-0002-2633-3976;
[2] ORCID: 0000-0002-7249-2345;
[3] ORCID: 0000-0003-4879-0593;
[4] ORCID: 0000-0003-2536-6810;
[5] ORCID: 0000-0001-9772-4205;
[1, 2, 3, 4, 5] Карагандинский государственный технический университет, Караганда, Казахстан

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

Аннотация: Проблема эффективного электроснабжения не решена в полном объеме до сих пор. Одним из путей решения данной проблемы является разработка микро тепловой электростанции, способной функционировать практически на любом топливе. Использование собственного источника энергии позволит снизить затраты на ее производство. Существенно повышаются показатели надежности электроснабжения и обеспечивается ее бесперебойная поставка потребителю. Предложенная нами электростанция приводиться в действия тепловым двигателем с внешним подводом теплоты. Приведены некоторые результаты компьютерного моделирования двигателя с внешним подводом тепла, который работает по принципу Стирлинга. Рассмотрены конструктивные особенности разрабатываемого двигателя.

Ключевые слова: тепловая электростанция, двигатель Стирлинга, когенерация, тепловая энергия, комплексное производство, альтернативная энергетика.

MULTI-FUEL ELECTRIC POWER STATION OF SUPER-SMALL POWER WITH EXTERNAL COMBUSTION THERMAL ENGINE CAPABLE OF EFFECTIVELY WORKING IN AGRICULTURAL KAZAKHSTAN

Research article

Mehtiyev A.D.[1], Yugai V.V.[2], Alkina A.D.[3], Esenzholov U.S.[4, *], Kaliaskarov N.B.[5]

[1] ORCID: 0000-0002-2633-3976;
[2] ORCID: 0000-0002-7249-2345;
[3] ORCID: 0000-0003-4879-0593;
[4] ORCID: 0000-0003-2536-6810;
[5] ORCID: 0000-0001-9772-4205;
[1, 2, 3, 4, 5] Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan

* Corresponding author автор (newneil[at]mail.ru)

Abstract: The problem of efficient power supply has not been fully resolved so far. One of the ways to solve this problem is to develop a micro thermal power plant capable of operating on virtually any fuel. Using its own energy source will reduce the cost of the production. It can also significantly increase the reliability of electricity supply and ensure uninterrupted supply to the consumer. The proposed power plant is driven by a heat engine with an external heat supply. Some results of computer simulation of an engine with an external heat supply, which works according to the Stirling principle, are given. The design features of the engine under development are considered.

Keywords: thermal power plant, Stirling engine, cogeneration, thermal energy, integrated production, alternative energy.

Общая часть и предварительный анализ уровня развития двигателя с внешним подводом теплоты. Двигатель Стирлинга (ДС), предложенный как альтернатива паровой машины в начале девятнадцатого века, претерпел множество этапов развития и трансформации, а также временных циклов развития и угасания, и сейчас вызывает достаточный интерес у изобретателей. Создаются все новые конструкции ДС и используются новые технологии для их создания. Сегодня некоторые модели могут оказать серьезную конкуренцию двигателям внутреннего сгорания (ДВС), например, по техническим и экологическим показателям. Несмотря на все достижения и преимущества они все же не нашли широкого применения как электрические машины или двигатели внутреннего сгорания, но на это есть ряд серьезных причин. Рабочее тело (газ или жидкость), движется в замкнутом объёме в условиях цикла периодического нагрева и охлаждения рабочего тела. Для его работы пригодно практически любое топливо или источник тепла [1, С. 27]. Благодаря чему этот уникальный в своем роде тепловой двигатель имеет высокий коэффициент полезного действия, равный максимальной эффективности тепловых машин, но на самом деле, на практике его достичь чрезвычайно сложно.

С исторической точки зрения, толчком в развитии данного направления послужил тепловой двигатель, предложенный католическим священником Робертом Стирлингом, и запатентовавший им в 1816 году (английский патент № 4081). Тепловые двигатели, использующие в своей работе нагретый воздух, уже использовались в 17 веке, он лишь усовершенствовал конструкцию и предложил использовать регенератор, который он назвал «эконом». Модернизация позволила уменьшить вес и добиться КПД около 10%. Этот узел позволил повысить эффективность и создать конкуренцию паровой машине, это дало возможность внедрить их на ряде предприятий, в первую очередь он был безопасным в плане допущения взрыва, что было не редкость для паровых машин того времени. Его машина была

изготовлена из чугуна весом в одну тонну и вырабатывала 1 кВт мощности, на то время она могла оказать достойную конкуренцию паровой машине [2, С. 33]. Отсутствие износостойких уплотнений и жаропрочных сталей не позволили Стирлингу добиться успехов в эффективности, а бурное развитие ДВС и электромоторов в начале 20 века полностью вытеснили их с рынка, но с развитием технологий и материалов у инженеров в 50 - 60 годах прошлого века снова появился к ним интерес. Разработки новых конструкций ДС продолжаются по сей день. Например, особенных успехов добилась фирма Philips производившая компактные электрогенераторы на основе двигателя с внешним подводом теплоты работающий по циклу Стирлинга с КПД около 30 %, что пока не достижимо для большинства современных бензиновых электростанций с ДВС [3, С. 78]. Новые машины имели более высокую эффективность за счет повышения давления в рабочей полости (в цилиндрах и камерах), что существенно улучшило показатель «вес/габарит/мощность».

Проведенный нами обзор показал, что более чем за двухсотлетнюю историю развития они прошли несколько этапов трансформации и существенных конструктивных изменений, повысивших их эффективность. Сегодня инженерами различных стран мира созданы десятки конструкций тепловых двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ), работающих по циклу Стирлинга. Будет правильней утверждать, что данные тепловые двигатели объединяет только ряд существенных признаков, связанных с внешним подводом теплоты и тепловым циклом Стирлинга. Сам Стирлинг не является автором всех разработок, напротив, его тепловая машина во многом была несовершенна, о чем он сам писал лично, а современные двигатели с внешним подводом тепла в некоторых конструкциях не имеют ничего общего с предложенным им изобретением. В научной литературе совершенно разные по конструкции ДВПТ приписываются к авторству Стирлинга, о которых не было и речи в его работах.

Существуют основные типы тепловых двигателей Стирлинга: альфа, бета и гамма, но более перспективными в настоящее время для использования в энергетике являются свободнопоршневые и термоакустические машины, так как у них более высокий КПД и лучшие показатели массогабаритных размеров на единицу мощности [4, С.57]. Двигатель Стирлинга применяется в случаях, когда необходим небольшой преобразователь тепловой энергии, простой по устройству, либо когда эффективность других тепловых двигателей оказывается ниже: например, если разницы температур недостаточно для работы паровой или газовой турбины.

Двигатели Стирлинга могут применяться для преобразования тепловой энергии в механическую, а затем в электрическую. На них возлагают надежды по созданию солнечных электроустановок. Их применяют как автономные генераторы для туристов. Некоторые предприятия выпускают генераторы, которые работают от конфорки газовой печи.

Можно выделить ряд преимуществ использования двигателя с внешним подводом теплоты для многотопливной микроэлектростанции:

1. многотопливность и способность работать на доступном в данной местности топливе;
2. значительный моторесурс от 20000 часов;
3. возможность когенерации тепла и комплексного производства энергии;
4. от 3 до 6 раз меньшая стоимость выработанного киловатта энергии;
5. полная автономность и независимость от тарифа и конъюнктуры рынка нефти и природного газа;
6. высокие экологические показатели Евро – 5 и выше, что соответствует самым жестким мировым экологическим стандартам;
7. срок окупаемости когенерационных установок 2-4 года;
8. отсутствие необходимости прокладки и обслуживания электросетей при электрификации отдаленных районов;
9. значительное сокращение расходов региональных бюджетов на закупку привозного топлива.

В различное время ряд зарубежных фирм очень активно вели работу по исследованию и разработке новых конструкций ДС или двигателя с внешним подводом теплоты, например, ‘Philips” (Нидерланды), “General Motors Co”, “Ford Motor Co”, “NASA Lewis Research Center”, “Los Alamos National Laboratory” (США), “MAN-MBW” (Германия), “Mitsubishi Electric Corp.”, “Toshiba Corp.” (Япония). В течение последнего десятилетия к работам по созданию двигателей Стирлинга приступили также в “Daimler Benz” и “Cummins Power Generation” (CPG) [5]. В различное время проведено множество исследований и практических опытов по вопросу использования двигателя Стирлинга для различных нужд, в том числе для производства электроэнергии [6]. В настоящее время на территории России активно работают несколько крупных компаний занимающиеся разработкой электростанций когенерационного типа, например, ООО "ИИЦ "Стирлинг-технологии". На рынке имеется продукция произведенная ОАО «Машиностроительный завод «Арсенал», НПО «Гелиймаш» и др. Выпускаемые этими предприятиями ДВПТ, не являются Российскими разработками, а представляют собой копии криогенных машин, ранее выпускаемых голландскими фирмами "N.V. Philips Gloeilampenfabrieken" ("Филипс") и “Werkspoor”. В России из-за экономического кризиса сложилась крайне неблагоприятная инновационная атмосфера и научные организации, в которых ранее велись работы по созданию новых конструкций ДВПТ, например, МВТУ им. Баумана, ВНИИГТ, ОмПИ (ТУ), СПбГТУ (Политехнический университет), ЦНИДИ, вынуждены были из-за финансовых трудностей закрыть свои программы. В то же время в странах Евросоюза, США и Японии за последние 15 лет достигнуты положительные результаты в создании высокоэффективных машин Стирлинга, например термоакустического типа с линейными генераторами. Специалистами ООО «Инновационно - исследовательский центр «Стирлинг - технологии» вначале 21 века был проведен ряд экспериментальных исследований, в результате которых была разработана новая методология проектирования и расчета машин данного цикла. Данная методология включает в себя несколько "ноу-хау", среди которых: уникальный метод двухуровневой многопараметрической оптимизации машин Стирлинга; структурный синтез машин Стирлинга на основе метода функционально-эксергетического анализа сложных тепломеханических устройств и оптимального конструирования. На основании предложенных технических решений, специалистами ООО «Инновационно - исследовательский центр «Стирлинг - технологии», за 1994-2003 году было подано более 150 заявок на предполагаемые изобретения. Особое внимание уделялось проработке отдельных узлов машин Стирлинга и их конструктивного исполнения, а также созданию новых принципиальных схем установок различного функционального назначения. Практика показала, что оптимальное конструирование позволит в значительной степени сократить

суммарную удельную стоимость машин при их опытном изготовлении и серийном производстве. Предлагаемые технические решения, с учетом того, что машины Стирлинга менее дороги в эксплуатации, позволяют повысить их экономическую рентабельность по сравнению традиционными преобразователями энергии. Дальнейшее широкое распространение машин Стирлинга будет связано с развитием теории проектирования многоцилиндровых машин данного цикла, что позволит создавать двигатели и холодильные машины производительностью до 1000 кВт.

Некоторые проблемы, связанные с созданием высокоэффективных машин Стирлинга. Проанализированный нами зарубежный опыт по созданию высокоэффективных ДВПТ или двигателей Стирлинга показал, что без точного математического моделирования рабочих процессов и оптимального конструирования основных узлов, доводка проектируемых машин превращается в многолетние изнурительные экспериментальные исследования с малой вероятностью успешного результата. Ведущие разработки фирм стран Евросоюза, США и Японии, опираются на теоретические и экспериментальные исследования своих ученых из университетов и технопарки которые занимаются разработкой отдельных типов машин Стирлинга. Имеются не в полном объеме решенные технические проблемы, связанные конструкцией отдельных узлов, особенно уплотнений, регулирования мощности и т.д. Имеются проблемы обусловленные применением различных рабочих тел, например, низкая эффективность воздуха при нагреве и предотвращение утечек водорода, который является наиболее эффективным рабочим телом. Есть конструкции использующие в качестве рабочего тела гелий, он намного эффективнее воздуха, но обладает сверхтекучестью, что предъявляет повышенные требования к уплотняющим элементам рабочий поршней, штока вытеснителя и т.д., а это влияет на стоимость изготовления ДВПТ. В отличие от ДВС уплотнения работают в режиме сухого трения, так как смазка может сильно загрязнять рабочее тело и негативно влиять на работу ДВПТ, поэтому и уплотнения должны иметь низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. Продолжается работа по проектированию перспективных и новых конструкций ДВПТ, которые внедряются в производство, например, свободно поршневых, не имеющих недостатков классических ДВПТ. Для достижения высокого КПД необходим высокий уровень технологии производства и качества материалов, а это повышает их стоимость, делая не доступными для массового повсеместного использования. К примеру, компания WhisperGen (Новая Зеландия) разработала для Европейского рынка микротепловую электростанцию когенерационного типа с тепловым двигателем внешнего сгорания (двигателем Стирлинга), стоимостью около 8 тыс. евро, но если учесть ее доставку в Казахстан, то цена вырасти минимум на 50%. Данная установка способна комплексно вырабатывать электрическую мощность — 1 кВт и тепловую — 5,5 кВт, что может хватить для небольшого сельского дома. Естественно сельскому жителю данная техника не доступна из-за высокой стоимости и отсутствия природного газа для ее работы, это делает ее невостребованной на селе. Высокая стоимость формируется из-за необходимости применения жаростойких сплавов и цветных металлов, их сварки и пайки. Немалые средства вкладываются в изготовления регенератора и насадки для него, так как необходимо с одной стороны высокая теплоемкость, а другой стороны, низкого гидравлического сопротивления. Производство требует высокотехнологичного оборудования и высокой квалификации рабочего персонала, а это тоже существенно повышает стоимость. Высокая наукоемкость и технологичность производства, а также использование дорогостоящих материалов является основным сдерживающим фактором широкого распространения современных ДВПТ. Для создания конкурентоспособных на мировом рынке ДВПТ можно добиться только в результате синтеза передовых научных исследований и высокопрофессиональной конструктивной проработки основных узлов, а также передовой технологии производства.

Разработка многотопливной электростанции сверхмалой мощности с тепловым двигателем внешнего сгорания.

Целью нашей научной работы является разработка двигателя с внешним подводом теплоты для многотопливной микроэлектростанции способной эффективно в условиях сельской местности Казахстана.

Своей будущей задачей мы ставим разработку серии микроэлектростанций мощностью от 1 до 100 кВт на основе свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания и линейным генератором для энергообеспечения сельских жителей Казахстана. Наша работа выполнена в рамках проекта «Микротепловая электростанция когерационного типа с рекуперацией тепла» (№ AP05131751).

Данный тип теплового двигателя был изобретен в 50 – е годы прошлого века в США фирмой «Санпауэр». Конструкция получилась настолько удачная из всего семейства Стирлингов, что инженеры НАСА разработали несколько вариантов для использования их на космических кораблях. Немецкие инженеры сделали ряд разработок для использования их в быту, он может работать как генератор, насос и термокомпрессор [7, С. 85].

Ранее были сформулированы ряд рекомендаций по использованию двигателя Стирлинга для энергообеспечения сельских потребителей , а также приводили основные результаты исследований. Компактная когенерационная энергетическая установка способна производить электрическую и тепловую энергию, при соотношении 1/5 кВт, с КПД 10-20% и 40-50%, соответственно по видам энергии. В перспективе проведение работы по совершенствованию конструкции и оптимизации параметров для достижения комплексного КПД около 90%. Данная установка будет производить тепловую энергию примерно в 5 раз больше, чем электрическую, так как тепловая энергия охлаждающей воды и отработанных газов используется для нужд теплоснабжения потребителей. Эффективность применения двигателя Стирлинга в когенерационных установках, по сравнению с ДВС, обусловлена особенностью его теплового баланса. На рисунке 1 показана компоновка многотопливной микроэлектростанции мощностью в 1 кВт с двигателем с внешним подводом теплоты, в трех возможных вариантах, основанных на использовании энергосберегающего эффекта «Тандыра». Данная установка производит 1 кВт/ч электрической энергии и 5-6 кВт/ч тепловой, что в полнее достаточно для небольшого сельского дома. Контур охлаждения работает в летнее время, а в холодное время года его заменяет система отопления жилого дома. Установка работает на аккумулирование электрической и тепловой энергии. Накопители позволяют добиться стабильности в ее работе и обеспечить пики максимальной нагрузки, а также сбалансировать объемы произведенной и потребляемой энергии при минимальных потерях. Установка монтируется в печь или «Тандыр», которую предварительно разжигают, возможна также работа установки в длительном режиме с поддержанием процесса горения топлива.

Установка состоит из: свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания 1; линейного генератора переменного тока на постоянных магнитах 2 и кабельной линии 3 с напряжением 220 В. Кабель подключается к преобразователю AC220/DC24В, для зарядки аккумулятора емкостью примерно 200 А/ч; система охлаждения (отопления) 4, чем эффективнее она работает тем выше КПД всей установки; нагреватель рабочего тела 5 из нержавеющей жаропрочной стали; система подвода воздуха 6; основание земли 7; кирпичная кладки из шамотного кирпича 8; трубопровод для системы охлаждения 9; колосниковая решетка 10; бетонное основание печи 11; теплоизоляция 12; обшивка 13; люк для чистки 14; дымоход для удаления продуктов горения 15.

Установка работает следующим образом, под действием высокой температуры от 300 до 700^0 С силовая установка на основе свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания 1 приводит в движение линейного генератора переменного тока на постоянных магнитах 2, выработанный ток по кабельной линии 3 с напряжением 220 В поступает на преобразователь переменного тока в постоянный AC220/DC24В который имеет контроллер заряда и осуществляет зарядку аккумуляторов минимальной емкостью 200 А/ч, желательно увеличить емкость аккумуляторов в 2-3 раза, для исключения дефицита электроэнергии и избежание аварийного отключения автономной системы при разрядке аккумулятора. Если в доме есть несколько мощных приемников, то необходимо отдельно рассчитать необходимое для их работы емкость. Постоянный ток может напрямую доставляться потребителям, например светодиодным электрическим лампам и частично инвертироваться для приводов холодильника и стиральной машины. Важным моментом эффективной работы установки является система охлаждения (отопления) 4, чем эффективнее она работает, тем выше КПД всей установки, поэтому желательно лучше охлаждать рабочее тело, чем повышать температуру нагревателя. Система охлаждения подключается через трубопроводы 9 и разделяется на прямой и обратный, в качестве охлаждающей жидкости может быть использован автомобильный антифриз. Для циркуляции охлаждающей жидкости используется электрический насос(помпа), а подключение системы отопления дома осуществляется через теплообменный аппарат. Для хранения излишек тепловой энергии необходим бак с тепловой изоляцией емкостью 200 – 500 литров.

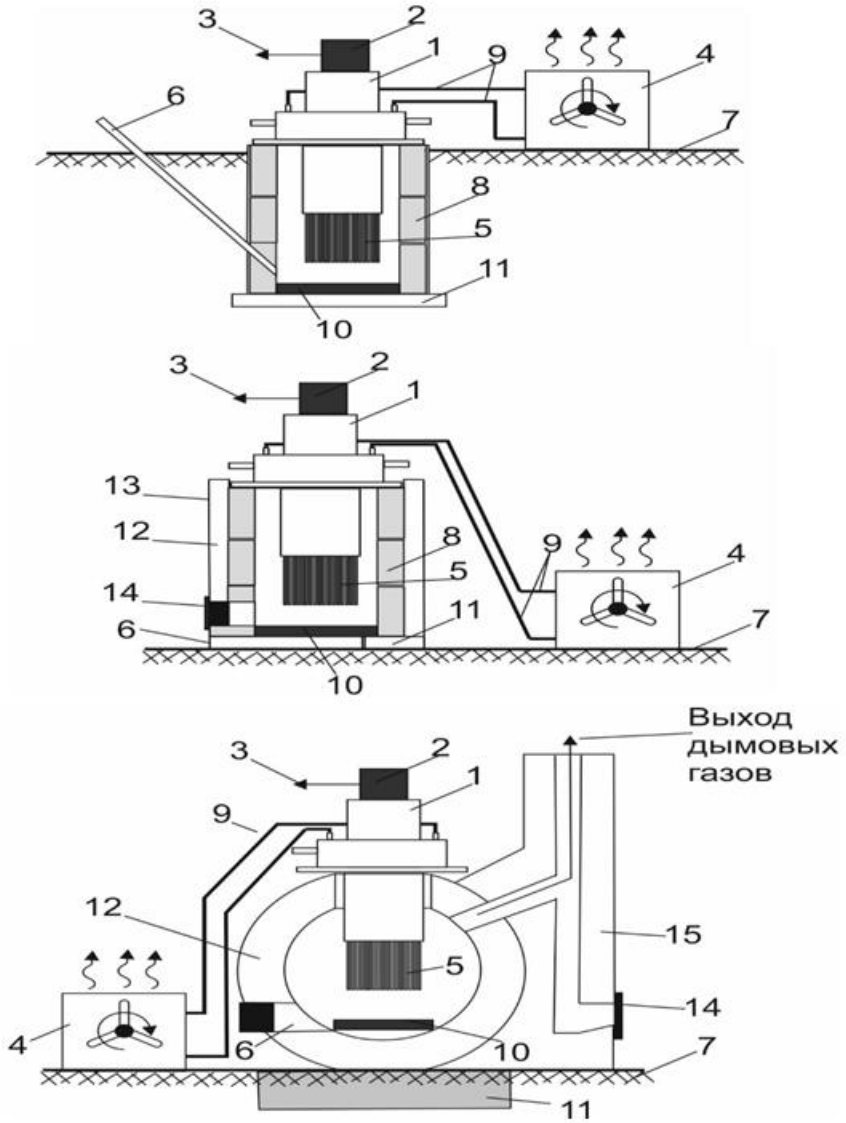


Рисунок 1 – Возможные варианты компоновки многотопливной электростанции мощностью в 1 кВт с двигателем с внешним подводом теплоты

Нагреватель рабочего тела 5 непосредственно воспринимает высокую температуру и должен быть выполнен из жаропрочной стали, для повышения эффективности он снабжен дополнительными трубчатыми нагревателями и

внутренним регенератором. Для обеспечения процесса горения топлива печь или «Тандыр» должны быть оснащены системой подачи воздуха 6. Важным моментом является конструкция самой печи, главное ее казачество должно быть энергосбережение и сохранение тепла, поэтому теплоизоляции уделяется особое внимание.

Электрическая схема установки показана на рисунке 2, основная идея заключается в разделении нагрузки на переменную и постоянную. Это позволит избежать излишних преобразований и потерь, так как большинство современного бытового электрооборудования работает на постоянном токе, например, ноутбук или сотовый телефон. Светодиодные электрические лампы тоже могут работать на постоянном токе без драйвера. Переменный ток необходим только холодильнику, стиральной машине, микроволновой печи, поэтому для них предусматривается инвертор. Система выработки электрической энергии состоит из линейного синхронного генератора переменного тока 1, выполненного на постоянных магнитах, полупроводникового выпрямителя переменного тока 2, контроллера заряда аккумулятора с реле 3 и 5, аккумуляторной батареи 4, распределительного устройства 6 для разделения нагрузки на переменный ток с питанием от инвертора и на постоянный ток для питания нагрузки постоянного тока напрямую от аккумуляторной батареи.

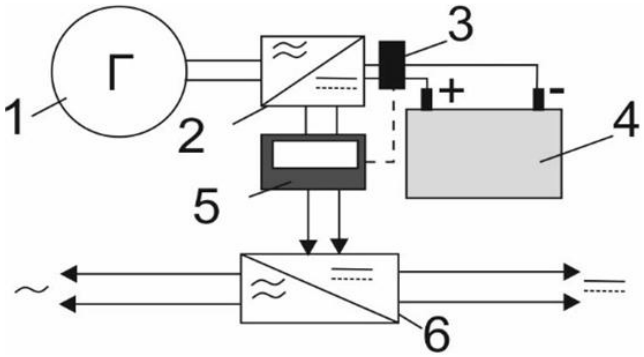


Рисунок 2 – Электрическая схема генерации

Для проведения исследований нами был разработан экспериментальный двигатель с внешним подводом теплоты, представленный на рисунке 3, мощность электрического генератора на постоянных магнитах составляет 100 Вт.

В качестве рабочего тела используется гелий с добавлением небольшого в процентном отношении воды, что позволяет создавать давление до 12 МПа.

Нами проведено компьютерное моделирование свободнопоршневого двигателя, полученные результаты помогут создать оптимальную конструкцию с максимально возможным КПД. Установлен ряд зависимостей влияющих на мощность связанных с температурой нагревателя и охладителя, диаметром и ходом поршней, фазой и другими параметрами.

Рисунок 3 – Экспериментальная лабораторная установка мощностью 100 Вт

Отдельно проведены эксперименты, позволяющие построить диаграмму замкнутого теплового цикла Карно и рассмотреть зависимость давления и объема при различных положениях поршней. Результаты приведены на рисунке 4.

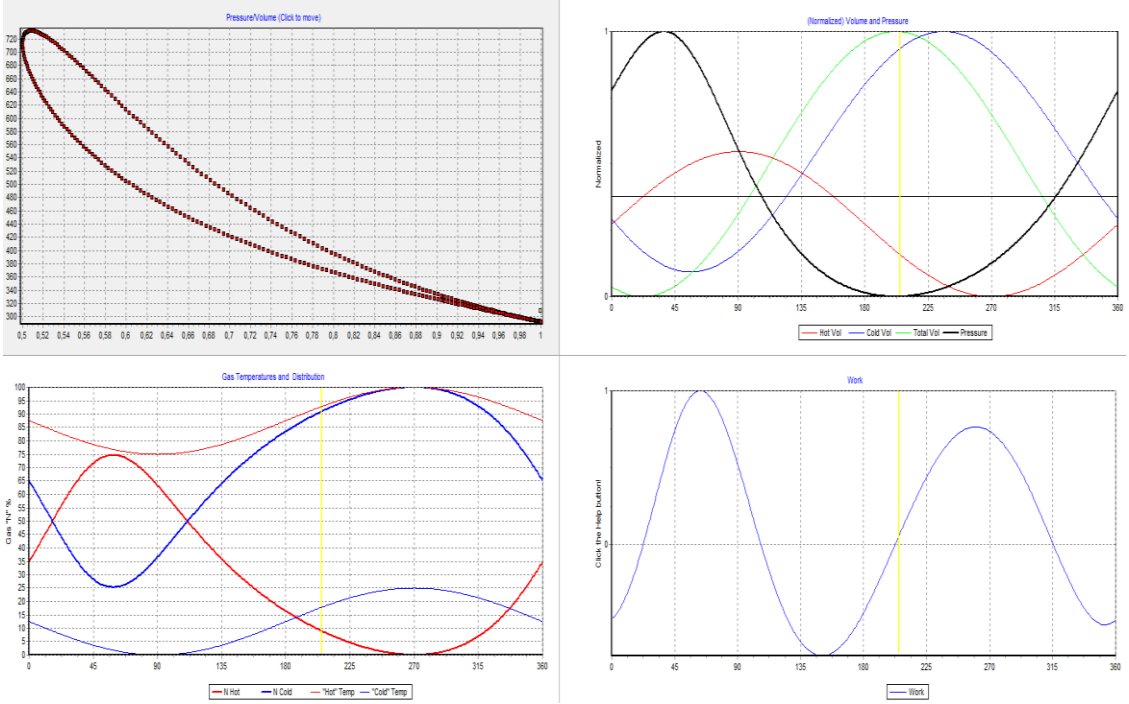


Рисунок 4 – Зависимости основных параметров свободнопоршневого двигателя при его работе

Проведенные исследования позволяют найти оптимальные параметры конструктивных частей теплового двигателя. Точно установить геометрические размеры поршня и вытеснителя, а также величину их хода с оптимальным значением фазового сдвига.

Вывод. Использование двигателя с внешним подводом теплоты для многотопливной микроэлектростанции способной эффективно работать в условиях сельской местности Казахстана является весьма перспективным и требует всестороннего научнного исследования. Считаем, что наиболее перспективной конструкцией привода силового агрегата является свободнопоршневой двигатель с внешним подводом теплоты.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Бобылев А. В. Математическая модель свободнопоршневого двигателя Стирлинга / Бобылев А. В., Зенкин В. А. // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – №1. – С. 22-27.

2. Веревкин М. Г. Метод комплексного теплового и конструкторского расчета термомеханического генератора // Известия ВУЗов. Серия «Машиностроение». – 2004. – № 10. – С.33–37.

3. Афанасьев В.А. Оценка КПД криогенного двигателя Стирлинга, входящего в состав газификатора сжиженного природного газа системы питания газовым потоком судового двигателя / Афанасьев В.А., Цейтлин А.М., Поляков П.Б. и др. // Вестник АГТУ. Серия «Морская техника и технология». – 2013. – №1. – С.78–83.

4. Горожанкин С.А. Комбинированные газотурбинные установки с двигателями Стирлинга / Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Чухаркин А.В. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета – 2015. – №2(219). – С.57-66.

5. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права Республики Казахстан. Мини ТЭЦ с линейным генератором тока с рекуператором для утилизации отходов подверженных горению. / Мехтиев А.Д., Югай В.В. Алькина А.Д. и др. // № 0956; опубл.23.05.2016.

6. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права Республики Казахстан. Альтернативная теплоэнергетическая установка когенерационного типа мини-ТЭЦ. / Булатбаев Ф.Н. Югай В.В., Алькина А.Д., Нешина Е.Г. // №2385; опубл.15.11.2016.

7. Жаукешов А. М. К выбору компонентов солнечной электростанции с двигателем Стирлинга // Вестник КазНУ. Серия «Физическая». – 2014. – №4(51). – С.85-89.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bobylev A. V. Matematicheskaya model svobodnoporshnevogo dvigatelya Stirlinga [The mathematical model of Stirling's free-piston engine] / Bobylev A. V., Zenkin V. A. // Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya [Bulletin of Equipment. Technologies. Engineering. Ser. Power engineering] – 2017 – no.1 – P.22-27. [in Russian]

2. Verevkin M. G. Metod kompleksnogo teplovogo i konstruktorskogo rascheta termomekhanicheskogo generatora [Method of complex thermal and design calculation of a thermomechanical generator]/ Verevkin M. G. // Izvestiya VUZov. Seriya «Mashinostroyeniye» [Bulletin of Proceedings of higher educational institutions. Ser. Mechanical engineering] – 2004 – no.10 – P.33-37. [in Russian]

3. Afanas'ev V. A. Otsenka KPD kriogennogo dvigatelya Stirlinga. vkhodyashchego v sostav gazifikatora szhizhennogo prirodnogo gaza sistemy pitaniya gazovym potokom sudovogo dvigatelya [Estimation of the efficiency of the cryogenic Stirling engine, which is part of the gasifier of liquefied natural gas, the gas-powered system of the marine engine]/ Afanas'ev

V.A. // Vestnik AGTU. Seriya «Morskaya tekhnika i tekhnologiya» [Bulletin of vestnik of astrakhan state technical university. Ser. marine engineering and technologies] – 2013 – no.1 – P.78-83. [in Russian]

4. Gorozhankin S.A. Kombinirovannyye gazoturbinnyye ustanovki s dvigatelyami Stirlinga [Combined gas turbine units with Stirling engines]/ Gorozhankin S. A.// Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of The founder and publisher of the journal is the St. Petersburg State Polytechnical University] – 2015 – no.2(219) – P.57-66. [in Russian]

5. Mekhtiev A.D.Mini TETs s lineynym generatorom toka s rekuperatorom dlya utilizatsii otkhodov podverzhennykh goreniyu. [Mini CHP with a linear current generator with a recuperator for recycling waste combustible] / Mekhtiev A.D., Yugay V.V. Al'kina A.D. and others, Certificate of state registration of rights to the object of copyright of the Republic of Kazakhstan – no. 0956 – 23.05.2016. [in Russian]

6. Bulatbaev F.N. Al'ternativnaya teploenergeticheskaya ustanovka kogeneratsionnogo tipa mini-TETs. [Alternative heat-power plant cogeneration type mini-CHP.] / Bulatbaev F.N., Yugay V.V., Al'kina A.D., amd others // Certificate of state registration of rights to the object of copyright of the Republic of Kazakhstan – no. 2385 – 15.11.2016. [in Russian]

7. Zhaukeshov A. M. K vyboru komponentov solnechnoy elektrostantsii s dvigatelem Stirlinga [To the selection of components of a solar power station with a Stirling engine] / Zhaukeshov A.M. // Vestnik KazNU. Seriya «Fizicheskaya» [Bulletin of herald of the Kazakh National University. Ser. Physical] – 2014 – no.4(51) – P.85-89. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.016

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Научная статья

Иванов И.Е. *
ORCID: 0000-0002-9975-8385,
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Иваново, Россия

* Корреспондирующий автор (iivanov[at]mtu.edu)

Аннотация

В работе исследуется потенциальная степень изменения параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи – сопротивлений и проводимостей прямой и нулевой последовательностей – в зависимости от погодных условий и уровня загрузки линии. На основе анализа основных факторов, наибольшим образом влияющих на вариацию параметров линий, определены несколько режимов, характеризуемых различными соотношениями температуры окружающей среды и других характеристик. Для каждого из режимов выполнена серия вычислительных экспериментов по расчету матриц сопротивлений и проводимостей линии. Эксперименты осуществлялись на основе различных конфигураций – двухцепной линии напряжением 500 кВ, расположенной в России, и одноцепной линии напряжением 345 кВ, функционирующей в США. В результате установлено, что отдельные параметры воздушных линий могут варьироваться вплоть до 30–40 %, что свидетельствует о необходимости их постоянной актуализации.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, параметры прямой последовательности, параметры нулевой последовательности, проводимость, синхронизированные векторные измерения, сопротивление.

INVESTIGATION OF THE VARIATIONS OF OVERHEAD HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINE PARAMETERS

Research article

Ivanov I.E. *
ORCID: 0000-0002-9975-8385,
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

* Corresponding author (iivanov[at]mtu.edu)

Abstract

The research is aimed at investigating how overhead transmission line parameters (positive and zero sequence impedances and admittances) could change under different weather and line loading. Analysis of the key factors having to do with line parameter variation has made it possible to sketch out a set of operational scenarios with different boundaries on the ambient temperature and other characteristics. Each of the scenarios was then used to compute a number of line impedance and admittance matrices. Two different line configurations were exploited during the simulations: a 500 kV double circuit line from the Russian power system, and a 345 kV single circuit line from the US power grid. The obtained results suggest that some of the line parameters can experience variations of up to 30–40 %, which clearly shows the need for their regular correction.

Keywords: overhead transmission line, positive sequence parameters, zero sequence parameters, admittance, synchronized phasor measurements, impedance.

Введение

С появлением технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) появилась потенциальная возможность актуализации параметров элементов электрических сетей, в том числе высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) [1], [2]. При этом количество отечественных и зарубежных публикаций, в которых детально анализировалась бы степень вариации отдельных сопротивлений и проводимостей ВЛЭП, крайне незначительно. В [3] анализируются возможные причины изменения параметров линий, и на основе большого объема вычислительных экспериментов выяснено, что основными влияющими факторами (ОВФ) можно считать следующие: средние высоты проводов и грозозащитных тросов (с учетом стрел провеса); удельная проводимость грунта вдоль трассы ВЛЭП; удельное сопротивление постоянному току материала проводов ВЛЭП; относительная магнитная проницаемость грозозащитного троса. Все остальные геометрические характеристики и физические свойства, необходимые для расчета матриц сопротивлений и проводимостей ВЛЭП, либо известны достаточно точно, либо оказывают пренебрежимое в количественном смысле влияние в рамках своих диапазонов неопределенности. Совершенно очевидно, что на практике выявленные ОВФ могут изменяться одновременно, поэтому возникает вопрос, каким образом оценить их совокупное (а не по отдельности) влияние на вариации параметров ВЛЭП, чтобы получить количественные данные о возможных изменениях сопротивлений и проводимостей прямой и нулевой последовательностей ВЛЭП. При этом необходимо понимать, что обозначенные выше ОВФ не являются полностью не зависимыми друг от друга. Поэтому было бы ошибочным просто генерировать произвольный вектор значений этих характеристик в пределах жестко заданного диапазона для каждой из них. Следовательно, возникает задача более реалистичного моделирования изменения ОВФ (и, как следствие, параметров ВЛЭП). Результаты анализа могут служить базой для совершенствования методов актуализации параметров ВЛЭП с применением современных технологий мониторинга (таких как СВИ).

Описание вычислительных экспериментов

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть несколько различных режимов функционирования ВЛЭП, задавая для каждого из них свои диапазоны значений ОВФ. Анализ будем осуществлять на основе двух различных моделей ВЛЭП – двухцепной напряжением 500 кВ, расположенной на территории Российской Федерации, и одноцепной напряжением 345 кВ, расположенной в США. Конфигурация российской ВЛЭП отражена в [3, С. 32–33], а американской – данными, представленными на рисунке 1 и в таблице 1. Матрицы сопротивлений и проводимостей линий вычисляются на базе выражений, приведенных в [4], [5].

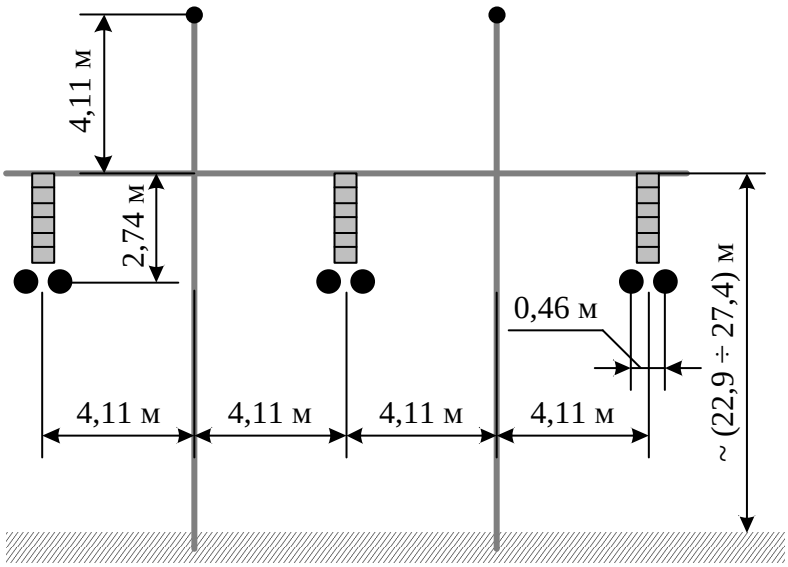


Рис. 1 – Конфигурация американской ВЛЭП напряжением 345 кВ, используемая для выполнения вычислительных экспериментов

Таблица 1 – Значения параметров американской ВЛЭП напряжением 345 кВ, необходимых для вычисления элементов матриц сопротивлений и проводимостей

Параметр	**Значение**	**СИ**
Горизонтальное расположение фазных проводников (см. рисунок 1)	[-8,2296, 0, 8,2296]	м
Горизонтальное расположение грозозащитных тросов (см. рисунок 1)	[-4,1148, 4,1148]	м
Вертикальное расположение фазных проводников*	[15, 15, 15]	м
Вертикальное расположение грозозащитных тросов*	[25, 25]	м
Внутренний радиус фазного проводника**	$0{,}5067 \cdot 10^{-2}$	м
Внешний радиус фазного проводника**	$1{,}5189 \cdot 10^{-2}$	м
Внутренний радиус грозозащитного троса**	0	м
Внешний радиус грозозащитного троса**	$0{,}4602 \cdot 10^{-2}$	м
Относительная магнитная проницаемость фазных проводников и грозозащитных тросов	10,9173	о.е.
Удельное сопротивление постоянному току материала фазных проводников (при 20° С)***	$3{,}7828/10^{8}$	Ом·м
Удельное сопротивление постоянному току материала грозозащитных тросов (при 20° С)***	$2{,}2445/10^{7}$	Ом·м
Удельная проводимость грунта	0,01	См/м
Относительная магнитная проницаемость грунта	1	о.е.
Относительная диэлектрическая проницаемость грунта	10	о.е.
Частота	60	Гц
Количество проводников в расщепленной фазе	2	–
Радиус расщепления	$22{,}86 \cdot 10^{-2}$	м
Дополнительная информация		
Грозозащитные тросы непрерывно заземлены (т.е. они учитываются при вычислении элементов обеих матриц – [**Z**] и [**Y**])		

*Примечания: * Средние высоты подвеса проводов по трассе ВЛЭП ниже по сравнению с соответствующими высотами подвеса на опоре (см. рисунок 1) из-за наличия стрелы провеса; ** марка фазного провода – "ACSR 54/7 Cardinal" (сталеалюминиевый провод), а марка грозозащитного троса – "3/8'' EHS" (стальной провод повышенной прочности); *** удельные сопротивления материала в Ом·м были рассчитаны на основе данных о радиусах проводов, а также их погонном активном сопротивлении, равном 0,0587 Ом/км для фазных проводников и приблизительно равном 3,37 Ом/км для грозозащитных тросов.*

Для того чтобы результаты осуществляемых экспериментов оказались достаточно достоверными, необходимо внимательно проанализировать не только возможные диапазоны изменения варьируемых характеристик линии, но и законы их изменения, а также корреляцию с различными влияющими факторами. Так, фактически все ОВФ зависят от температуры окружающей среды (ТОС); удельные сопротивления материала фазных проводов и грозозащитных тросов, а также величина стрелы провеса являются функцией не только ТОС, но и протекающего по ВЛЭП тока.

Удельное сопротивление грунта крайне нелинейно зависит от температуры и процентного содержания влаги [6]. При этом, как следует из [6, рисунок 11.29], крутизна графика зависимости сопротивления от температуры существенно варьируется, и зависимость имеет более пологий характер в области «плюсовых» температур. Кроме того, в районе «нуля» градусов имеется «скачок», связанный с переходом влаги, содержащейся в почве, из одного агрегатного состояния в другое [6], [7]. Указанные обстоятельства приводят к необходимости разделить принятый к рассмотрению температурный диапазон от –30˚ С до +30˚ С на множество участков (таблица 2). Выбор границ отдельных температурных интервалов и соответствующих значений удельного сопротивления грунта осуществлен на основе зависимостей, отраженных в [6, рисунки 11.28, 11.29]. Общий диапазон значений сопротивления – от 20 до 500 Ом·м – продиктован анализом данных для характерных типов почв (суглинок, глина, чернозем, глинистый песок), представленных в [6], [8], [9].

Зависимость удельного сопротивления постоянному току материала провода от температуры обычно с достаточной точностью аппроксимируется линейной функцией [10]

$$\rho_{T1} = \rho_{T0} \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(T_1 - T_0\right)\right], \tag{1}$$

где ρ_{T0} и ρ_{T1} – соответственно удельные сопротивления (в Ом·м) провода при температурах T_0 и T_1; α – температурный коэффициент сопротивления, принимаемый в наших экспериментах равным 0,004 1/˚ С. «Базовая» температура T_0 в нашем случае составляет 20˚ С, а соответствующие значения ρ_{T0} для фазных проводов и грозозащитных тросов приведены в [3, таблица 1] для первой ВЛЭП и в таблице 1 для второй ВЛЭП.

Таблица 2 – Рассмотренные режимы функционирования воздушных линий, определяющие вариацию их параметров

№ режима	Общая характеристика режима	Диапазон ТОС	Диапазон значений удельного сопротивления грунта	Значение температуры фазного провода
1	Очень холодно; малая загрузка ВЛЭП	от –30˚ С до –15˚ С	400..500 Ом·м	= ТОС
2	Очень холодно; большая загрузка ВЛЭП	от –30˚ С до –15˚ С	400..500 Ом·м	= ТОС + (10÷15)˚ С
3	Достаточно холодно; малая загрузка ВЛЭП	от –10˚ С до –5˚ С	230..450 Ом·м	= ТОС
4	Достаточно холодно; большая загрузка ВЛЭП	от –10˚ С до –5˚ С	230..450 Ом·м	= ТОС + (10÷15)˚ С
5	Немного меньше «нуля»; малая загрузка ВЛЭП	от –5˚ С до 0˚ С	100..170 Ом·м	= ТОС
6	Немного меньше «нуля»; большая загрузка ВЛЭП	от –5˚ С до 0˚ С	100..170 Ом·м	= ТОС + (10÷15)˚ С
7	Немного больше «нуля»; малая загрузка ВЛЭП	от 0˚ С до +5˚ С	50..130 Ом·м	= ТОС
8	Немного больше «нуля»; большая загрузка ВЛЭП	от 0˚ С до +5˚ С	50..130 Ом·м	= ТОС + (10÷15)˚ С
9	Тепло или жарко; малая загрузка ВЛЭП	от +5˚ С до +30˚ С	20..50 Ом·м	= ТОС
10	Тепло или жарко; большая загрузка ВЛЭП	от +5˚ С до +30˚ С	20..50 Ом·м	= ТОС + (10÷15)˚ С
11	Холодно, налипание снега на проводах*; малая загрузка ВЛЭП	от –5˚ С до 0˚ С	100..170 Ом·м	= ТОС

*Примечание: * В этом случае учитываем дополнительный провес всех проводов, выбираемый из диапазона (0,5÷1) м.*

Анализ зависимостей, представленных в [11], позволяет сделать вывод о том, что в отношении величины стрелы провеса провода также допустима линейная аппроксимация в функции температуры. При этом, обобщая графические данные из [11], [12], можно считать, что провес «фазы» в среднем увеличивается на 0,4 м при повышении температуры провода на 10˚ С (и, соответственно, уменьшается на 0,4 м при ее снижении на 10˚ С). Кроме того, как указано в [13], степень растяжения повивов из стали с увеличением температуры приблизительно вдвое меньше аналогичной для провода с повивами из алюминиевых проволок. Учитывая этот факт, а также то, что отношение сечения стали к сечению алюминиевой части существенно меньше для фазных проводов в сравнении с грозозащитными тросами, принимаем для последних изменение стрелы провеса в 0,2 м на каждые 10˚ С. Таким образом, с учетом выражения (2) в работе [3] можно записать следующие функциональные зависимости стрелы провеса от температуры:

$$H_{ph} = \left[22 - \left(S + 0{,}04 \cdot \left(T_{ph} - 20\right)\right)\right] + \frac{1}{3} \cdot \left(S + 0{,}04 \cdot \left(T_{ph} - 20\right)\right), \quad (2)$$

$$H_{gw} = \left[32 - \left(0{,}5 \cdot S + 0{,}02 \cdot \left(T - 20\right)\right)\right] + \frac{1}{3} \cdot \left(0{,}5 \cdot S + 0{,}02 \cdot \left(T - 20\right)\right), \quad (3)$$

где H_{ph} и H_{gw} – средние высоты подвеса фазного провода и грозозащитного троса соответственно; S – величина стрелы провеса фазного провода при 20˚ С, принятая равной 9 м для двухцепной ВЛЭП и 11,1042 м для одноцепной ВЛЭП; T_{ph} – температура фазного провода, определяемая ТОС и током по ВЛЭП; T – температура троса, определяемая атмосферными условиями. Нетрудно убедиться, что значения H_{ph} и H_{gw} при 20˚ С согласуются с данными, приведенными в [3, таблица 1] для первой ВЛЭП и в таблице 1 для второй ВЛЭП.

Вычислительные эксперименты выполнялись следующим образом. Для каждого из режимов, перечисленных в таблице 2, генерировалось случайным образом 10000 значений ТОС и 10000 величин удельного сопротивления грунта из соответствующих диапазонов для этих параметров, обозначенных в таблице 2. Для каждого сгенерированного значения ТОС по (1) рассчитывались удельные сопротивления фазного провода и грозозащитного троса, а по (2) и (3) – средние высоты подвеса проводов по трассе линии. При этом для режимов, характеризуемых большой загрузкой ВЛЭП, учитывался дополнительный нагрев «фазы» от протекающего тока, но не более чем на (10÷15)˚ С (конкретное значение выбиралось случайным образом). Это обосновано выполненными автором предварительными расчетами, свидетельствующими, что при наличии трех проводников в расщепленной фазе ([3, таблица 1]) может потребоваться ток порядка 1000 А для нагрева проводников на 10˚ С, а при токах в 600–700 А дополнительным нагревом (по отношению к ТОС) можно и вовсе пренебречь.

Результаты вычислительных экспериментов и выводы

По результатам экспериментов получено 10000 × 11 = 110000 значений для каждого из параметров ВЛЭП отдельных последовательностей, а затем определены отношения максимальных значений к соответствующим минимальным. Если все минимальные значения принять за «1», получаются гистограммы, изображенные на рисунках 2–5.

В отношении двухцепной линии (рисунки 2, 3) можно отметить, что наиболее сильные вариации были выявлены для активного сопротивления прямой последовательности (около 35 %) и индуктивного сопротивления, отражающего магнитную связь между двумя цепями ВЛЭП (около 27 %). В целом диапазоны изменения всех активных сопротивлений составляют как минимум 13 %, а вариации индуктивного сопротивления нулевой последовательности достигают 7 %.

Что касается моделируемой одноцепной ВЛЭП (рисунки 4, 5), были достигнуты очень существенные изменения всех сопротивлений, за исключением X_1: рассчитанные максимальные отношения составили соответственно 35 % и 41 % для активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей, а вариации индуктивного сопротивления нулевой последовательности превысили 22 %.

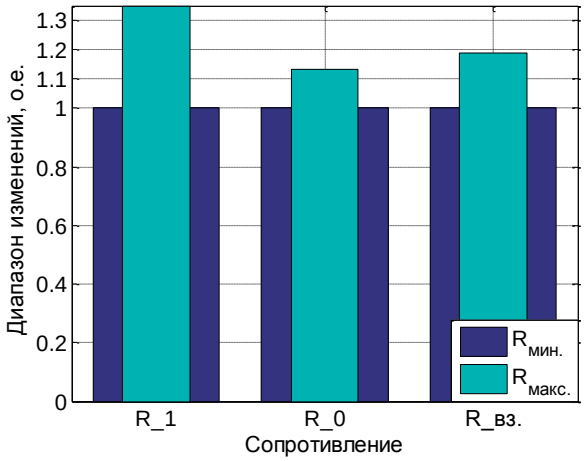


Рис. 2 – Диапазон возможных вариаций активных сопротивлений для ВЛЭП 500 кВ

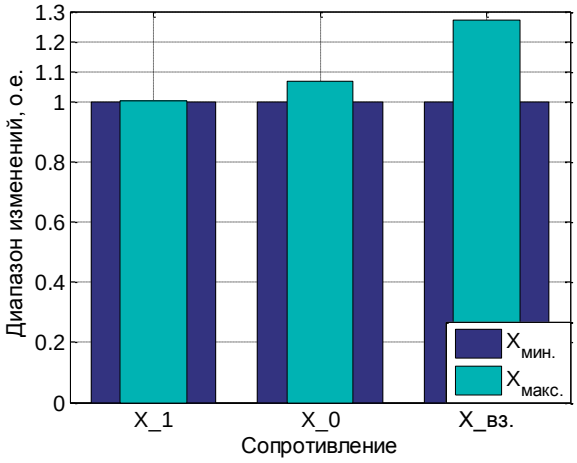


Рис. 3 – Диапазон возможных вариаций индуктивных сопротивлений для ВЛЭП 500 кВ

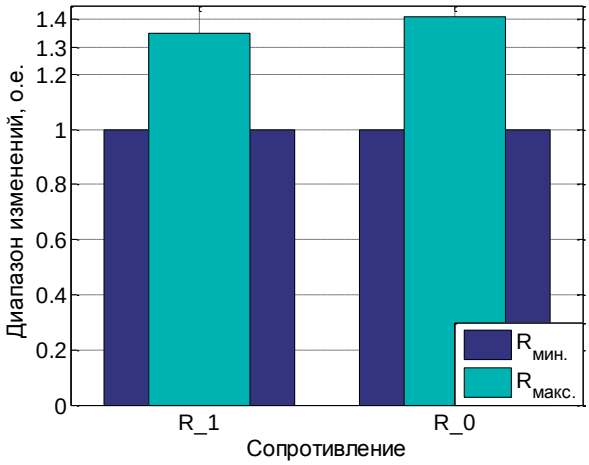


Рис. 4 – Диапазон возможных вариаций активных сопротивлений для ВЛЭП 345 кВ

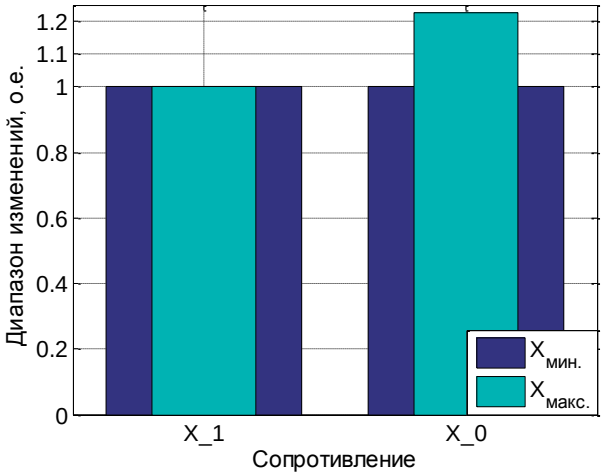


Рис. 5 – Диапазон возможных вариаций индуктивных сопротивлений для ВЛЭП 345 кВ

Что касается емкостных проводимостей, выявленные диапазоны их изменения для обеих ВЛЭП в целом меньше представленных на рисунках 2–5. Вариациями B_1 можно пренебречь, а максимальные отношения значений B_0 в обоих случаях немного превышают 3 %. Емкостная проводимость между двумя цепями ВЛЭП напряжением 500 кВ изменялась в ходе экспериментов почти на 12 %. Следует, однако, учитывать, что значения проводимостей могли варьироваться только за счет средних высот подвеса проводов, отклонения которых от «базовых» (указанных в [3, таблица 1] для первой ВЛЭП и в таблице 1 для второй ВЛЭП) определялись рассматриваемыми диапазонами температур (таблица 2), а также функциональными зависимостями (2) и (3). При этом в качестве «базовых» потенциально могли быть приняты совсем другие значения, поскольку маловероятно, что средние высоты подвеса проводов по трассе ВЛЭП могут быть известны с достаточной точностью. Поэтому возможный диапазон погрешностей в задании емкостных проводимостей шире по сравнению с достигнутым в ходе моделирования.

На основании полученных результатов можно заключить, что значения многих параметров ВЛЭП могут

существенным образом варьироваться в зависимости от погодных условий и передаваемой по линии мощности. Данные, представленные на рисунках 2–5, в целом согласуются с оценками изменения параметров в других публикациях и свидетельствуют о необходимости уточнения фактических характеристик ВЛЭП.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Liao Y. Kezunovic M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications / Y. Liao, M. Kezunovic // IEEE Trans. Power Delivery. – January 2009. – Vol. 24, no. 1. – P. 96–102.

2. Shi D.. Identification of short transmission-line parameters from synchrophasor measurements / D. Shi, D.J. Tylavsky, N. Logic, K.M. Koellner // Proc. 40th North American Power Symposium (NAPS), Calgary, AB. – Canada, Sept. 28–30, 2008.

3. Иванов И. Е. Оценка влияния различных факторов на значения сопротивлений и проводимостей высоковольтной воздушной линии электропередачи / И. Е. Иванов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 3. – С. 30-39.

4. Dommel H. W. Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. – Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.

5. Martinez-Velasco J.A. Overhead lines / Martinez-Velasco J.A., Ramirez A.I., Davila M. // Power System Transients: Parameter Determination, J.A. Martinez-Velasco, Ed. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. – P. 17–135.

6. Нерпин С. В. Физика почвы / Нерпин С. В., Чудновский А.Ф.. – М.: Наука, 1967.

7. Higgs P. J. An investigation of earthing resistances / P. J. Higgs // Journal of the Institution of Electrical Engineers. – June 1930. – Vol. 68, no. 402. – P. 736–750.

8. Тарасов А., Цилько В. Гамма-съёмка. Новый метод оценки коррозионных свойств грунта на трассах ВЛ / А. Тарасов, В. Цилько // Новости электротехники. – 2005. – № 2 (32).

9. Peck R. B. Foundation engineering / Peck R. B., Hanson W. E., Thornburn T.H.. – John Wiley & Sons; 2 edition, 1974.

10. Bockarjova M., Andersson G. Transmission line conductor temperature impact on state estimation accuracy / M. Bockarjova, G. Andersson // Proc. 2007 IEEE Lausanne Powertech, Lausanne. – Switzerland, July 1-5, 2007.

11. Du Yan, Liao Y. Online estimation of power transmission line parameters, temperature and sag / Yan Du, Y Liao // Proc. 43rd North American Power Symposium (NAPS). – Boston, MA, USA, Aug. 4–6, 2011.

12. Slegers J. M. Design of resource to backbone transmission for a high wind penetration future (master’s thesis) / J. M. Slegers. – Iowa State University, 2013.

13. Douglass D. A. Sag and tension of conductor / D.A. Douglass, F.R. Thrash // Electric Power Generation, Transmission, and Distribution, 3rd ed., L.L. Grigsby, Ed. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Liao Y., Kezunovic M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications / Y. Liao, M. Kezunovic // IEEE Trans. Power Delivery. – January 2009. – Vol. 24, no. 1. – P. 96–102.

2. Shi D. Identification of short transmission-line parameters from synchrophasor measurements / D. Shi, D.J. Tylavsky, N. Logic, K.M. Koellner // Proc. 40th North American Power Symposium (NAPS), Calgary, AB. – Canada, Sept. 28–30, 2008.

3. Ivanov I.E. Ocenka vliyaniya razlichnyh faktorov na znacheniya soprotivlenij i provodimostej vysokovol'tnoj vozdushnoj linii ehlektroperedachi [Investigation into the impact of various factors on the high voltage overhead transmission line impedances and admittances] / I.E. Ivanov // Vestnik IGEHU [Bulletin of ISPEU]. – 2017. – № 3. – P. 30-39. [in Russian]

4. Dommel H. W. Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book / H. W. Dommel. – Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.

5. Martinez-Velasco J.A. Overhead lines // Power System Transients: Parameter Determination, J.A. Martinez-Velasco, Ed. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. – P. 17–135.

6. Nerpin S.V., Chudnovskij A.F. Fizika pochvy [Soil Physics] / Nerpin S.V., Chudnovskij A.F.. – M.: Nauka, 1967. [in Russian]

7. Higgs P. J. An investigation of earthing resistances / P. J. Higgs // Journal of the Institution of Electrical Engineers. – June 1930. – Vol. 68, no. 402. – P. 736–750.

8. Tarasov A., Cil'ko V. Gamma-s"yomka. Novyj metod ocenki korrozionnyh svojstv grunta na trassah VL [Gamma survey. A new method of estimating the soil corrosive characteristics along the overhead line right-of-way] / A. Tarasov, V. Cil'ko // Novosti ehlektrotekhniki [Electrical Engineering News]. – 2005. – № 2 (32). [in Russian]

9. Peck R.B., Hanson W.E., Thornburn T.H. Foundation engineering. – John Wiley & Sons; 2 edition, 1974.

10. Bockarjova M., Andersson G. Transmission line conductor temperature impact on state estimation accuracy / M. Bockarjova, G. Andersson // Proc. 2007 IEEE Lausanne Powertech, Lausanne. – Switzerland, July 1-5, 2007.

11. Du Yan, Liao Y. Online estimation of power transmission line parameters, temperature and sag / Yan Du, Y Liao // Proc. 43rd North American Power Symposium (NAPS). – Boston, MA, USA, Aug. 4–6, 2011

12. Slegers J.M. Design of resource to backbone transmission for a high wind penetration future (master’s thesis) / J. M. Slegers. – Iowa State University, 2013

13. Douglass D.A. Sag and tension of conductor / D.A. Douglass, F.R. Thrash // Electric Power Generation, Transmission, and Distribution, 3rd ed., L.L. Grigsby, Ed. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.017

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УПОРНЫМ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ, КАК УЗЛОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Научная статья

Кузьмина Т.О.[1, *], Стоцкая А.Д.[2], Поляхов Н.Д.[3]
[1] ORCID: 0000-0002-1485-837X;
[2] ORCID: 0000-0003-2934-490X;
[1, 2, 3] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (taniasun1[at]mail.ru)

Аннотация

Данная работа посвящена разработке системы управления упорным активным магнитным подшипником (АМП) в условиях горизонтально ориентированного ротора с реализацией дифференциальной схемы управления по току. Разработанная система управления по току с ПД-регулятором позволяет учесть особенности конструкции упорного АМП. Для реализации математической модели и исследовательского комплекса для системы управления упорным АМП использован пакет математического моделирования Matlab. Разработанная система управления была верифицирована **на основе параметров заводского магнитного подшипника, показав результаты, сходные с результатами реального объекта.** Созданный исследовательский комплекс позволяет упростить разработку и реализацию систем управления высокоскоростной электрической машиной с электромагнитным подвесом ротора.

Ключевые слова: упорный активный магнитный подшипник, система управления, исследовательский комплекс.

CONTROL SYSTEM OF SUPPORTING ACTIVE MAGNETIC BEARING AS AN ELECTROMAGNETIC SUSPENSION NODE

Research article

Kuzmina T.O.[1, *], Stotskaya A.D.[2], Polyakhov N.D.[3]
[1] ORCID: 0000-0002-1485-837X;
[2] ORCID: 0000-0003-2934-490X;
[1, 2, 3] St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI” named after V.I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”), St. Petersburg, Russia

* Corresponding author (taniasun1[at]mail.ru)

Abstract

This work is devoted to the development of the suspension active magnetic bearing (AMB) control system in a horizontally oriented rotor with the implementation of a differential current control circuit. The developed current control system with two term controller allows taking into account the design features of the supporting AMB. The Matlab package of mathematical modeling was used to implement the mathematical model and research complex for the control of the supporting AMB. The developed control system was verified on the basis of the parameters of the factory magnetic bearing showing results similar to those of a real object. The created research complex allows simplifying the development and implementation of control systems for a high-speed electric machine with an electromagnetic rotor suspension.

Keywords: supporting active magnetic bearing, control system, research complex.

Активные магнитные подшипники (АМП) в современной технике широко применяются в высокоскоростных машинах, работающих в условиях, не допускающих использование традиционных подшипников с механическим контактом [1], [2].

Разработка несиловой части системы управления электромагнитным подвесом в отечественных компаниях производится силами зарубежных специалистов или по лицензии. Разработка и замена импортных технологий отечественными аналогами позволит сократить расходы на ремонт и настройку системы [3].

В данной работе рассматривается разработка системы управления упорным магнитным подшипником в условиях горизонтально ориентированного ротора с реализацией дифференциальной схемы управления по току, отличающейся тем, что предусматривается возможность предварительной настройки системы управления электромагнитным подвесом как автономно, так и в составе исследовательского комплекса.

Математическая модель и верификация системы управления

На Рисунке 1 приведена схема упорного АМП, где введены следующие обозначения: M1 и M2 – электромагниты; D – упорный диск массой m; δ – номинальный воздушный зазор; z – перемещение диска [4].

В данном случае используются два противоположно расположенных электромагнита, создающих две противоположно направленные магнитные силы притяжения F1 и F2. Помимо магнитных сил F1 и F2 на диск действует внешняя сила Q. Поскольку ротор ориентирован горизонтально, то действием силы тяжести можно пренебречь. Учитывая, что датчик положения расположен со стороны электромагнита M2, получим уравнение [5], [6]:

$$m\ddot{z} = F_2 - F_1 + Q. \quad (1)$$

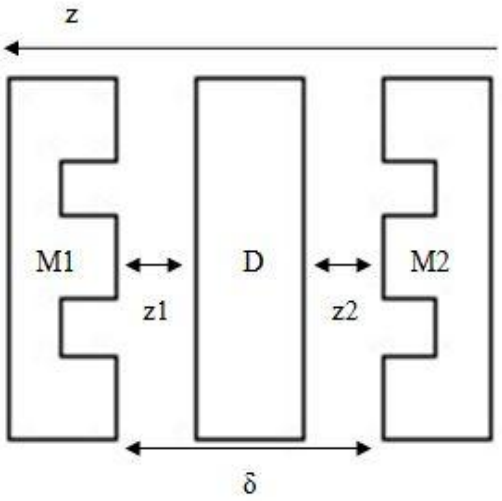


Рис. 1 – Схема упорного АМП

Для линеаризации магнитной силы в целях построения линейной системы управления необходимы токи смещения. Создаваемое ими магнитное смещение вызывает предварительный силовой натяг. Управление силой осуществляется за счёт увеличения натяга в одном направлении при одновременном его уменьшении в противоположном направлении [7].

Для магнитной силы, создаваемой каждым электромагнитом справедливо выражение:

$$F = F_0 + c_z \Delta z + h_i \Delta i, \tag{2}$$

где F_0 – магнитная сила, создаваемая электромагнитом при отсутствии тока управления i_c;

c_z – позиционная жёсткость;

h_i – токовая жёсткость.

Магнитная сила F_0 определяется выражением:

$$F_0 = \frac{c_L i_b^2}{2z_0^2}, \tag{3}$$

где i_b – ток смещения;

z_0 – равновесное положение диска, при котором z=0 и i_c=0;

c_L – конструктивный параметр.

Конструктивный параметр определяется следующим образом:

$$c_L = \frac{\mu_0 N^2 A}{2}, \tag{4}$$

где $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

N – количество витков обмотки;

A – площадь одного полюса.

Позиционная жёсткость определяется выражением:

$$c_z = -\frac{c_L i^2}{\delta^3}. \tag{5}$$

Токовая жёсткость определяется выражением:

$$h_i = \frac{c_L i}{\delta^2}. \tag{6}$$

При этом для электромагнита M1 ток $i_1 = i_b - i_c$, воздушный зазор $z_1 = z_0 - z$; для электромагнита M2 – ток $i_2 = i_b + i_c$, воздушный зазор $z_2 = z_0 + z$.

С учётом выражений (3), (5), (6) выражение (2) для каждой силы принимает следующий вид:

$$F_1 = \frac{c_L i_b^2}{2z_0^2} - \frac{c_L (i_b - i_c)^2}{(z_0 - z)^3} \Delta z_1 + \frac{c_L (i_b - i_c)}{(z_0 - z)^2} \Delta i_1, \tag{7}$$

$$F_2 = \frac{c_L i_b^2}{2z_0^2} - \frac{c_L (i_b + i_c)^2}{(z_0 + z)^3} \Delta z_2 + \frac{c_L (i_b + i_c)}{(z_0 + z)^2} \Delta i_2. \tag{8}$$

Принимая $\Delta z_1 = -z$, $\Delta i_1 = -i_c$, $\Delta z_2 = z$, $\Delta i_2 = i_c$, из выражений (7) и (8) определяем изменение каждой магнитной силы:

$$\Delta F_1 = \frac{c_L (i_b - i_c)^2}{(z_0 - z)^3} z - \frac{c_L (i_b - i_c)}{(z_0 - z)^2} i_c, \tag{9}$$

$$\Delta F_2 = -\frac{c_L (i_b + i_c)^2}{(z_0 + z)^3} z + \frac{c_L (i_b + i_c)}{(z_0 + z)^2} i_c. \tag{10}$$

С учётом выражений (7), (8), (9), (10) уравнение (1) принимает следующий вид:

$$m\ddot{z} = \Delta F_2 - \Delta F_1 + Q. \tag{11}$$

Структурная схема для моделирования представлена на Рисунке 2.

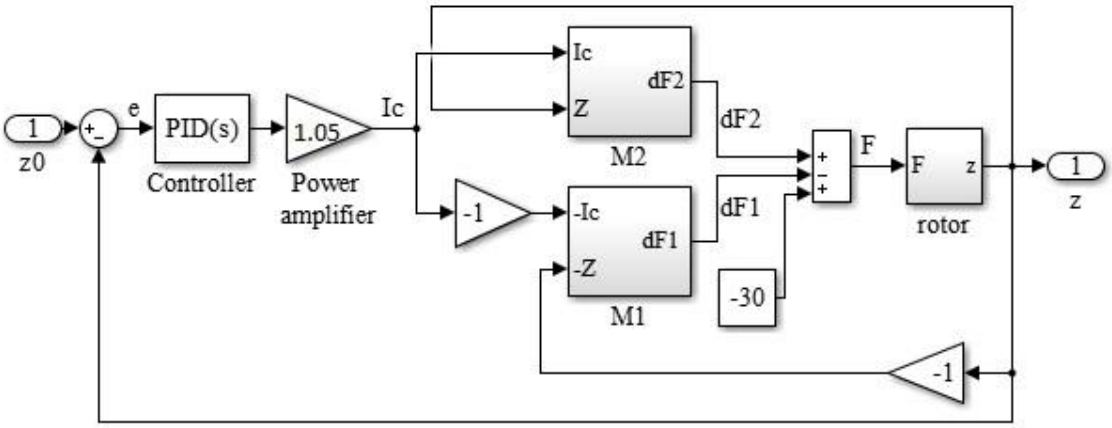


Рис. 2 – Структурная схема модели упорного АМП в Matlab/Simulink

Для верификации разработанной системы управления получены с помощью заводского оборудования графики управляющего тока и изменения перемещения ротора относительно положения равновесия, а также проведено моделирование на основе параметров реального объекта. Параметры заводского магнитного подшипника приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры упорного АМП

Параметр	Значение
Количество витков в обмотке *N*	464
Площадь полюса *A*, м^2	$4*10^{-5}$
Масса диска m, кг	230
Ток смещения i_b, А	14
Номинальный воздушный зазор δ, м	$0.6*10^{-3}$

Графики, полученные на заводском оборудовании, и при моделировании приведены на рис.3.

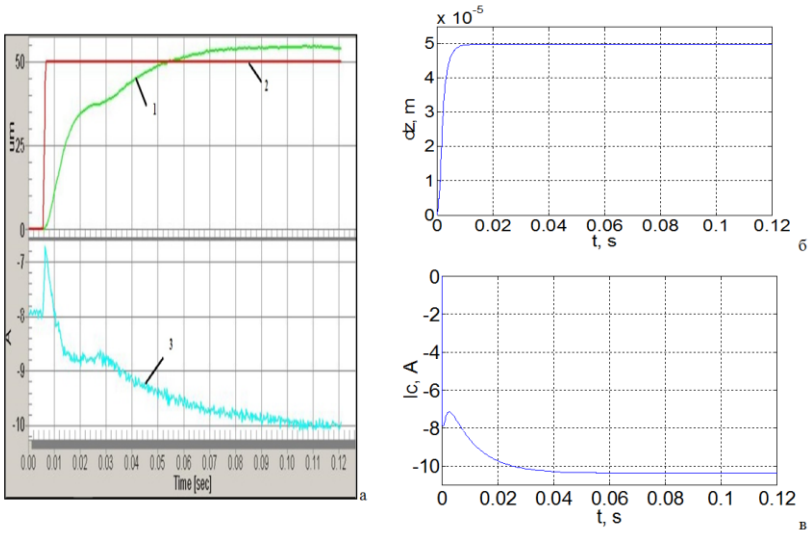


Рис. 3 – Графики верификации модели *а)* графики с заводского оборудования, *б)* график отклонения ротора от положения равновесия, *в)* управляющий ток

Графики, полученные на заводском оборудовании, на рис. 3а обозначены следующим образом: 1- график изменения отклонения ротора от равновесного положения, 2 – график изменения задающего воздействия, для изменения отклонения ротора от равновесного положения, 3 – ток управления.

Для моделирования реального объекта коэффициент усиления kamp усилителя мощности был выбран равным 1,05, а параметры регулятора [8] назначены следующие (в соответствии с реальными значениями) *Kp= 73452.4, Ki=0, Kd=205.536, Kf=46666.7.*

Различия в быстродействии систем обусловлено идеализацией датчиков модели.

Исследование влияния внешних воздействий

Одной из важных характеристик, влияющих на систему управления упорным АМП, является внешнее воздействие. Результаты моделирования системы при увеличении внешнего воздействия приведены на рисунке 4.

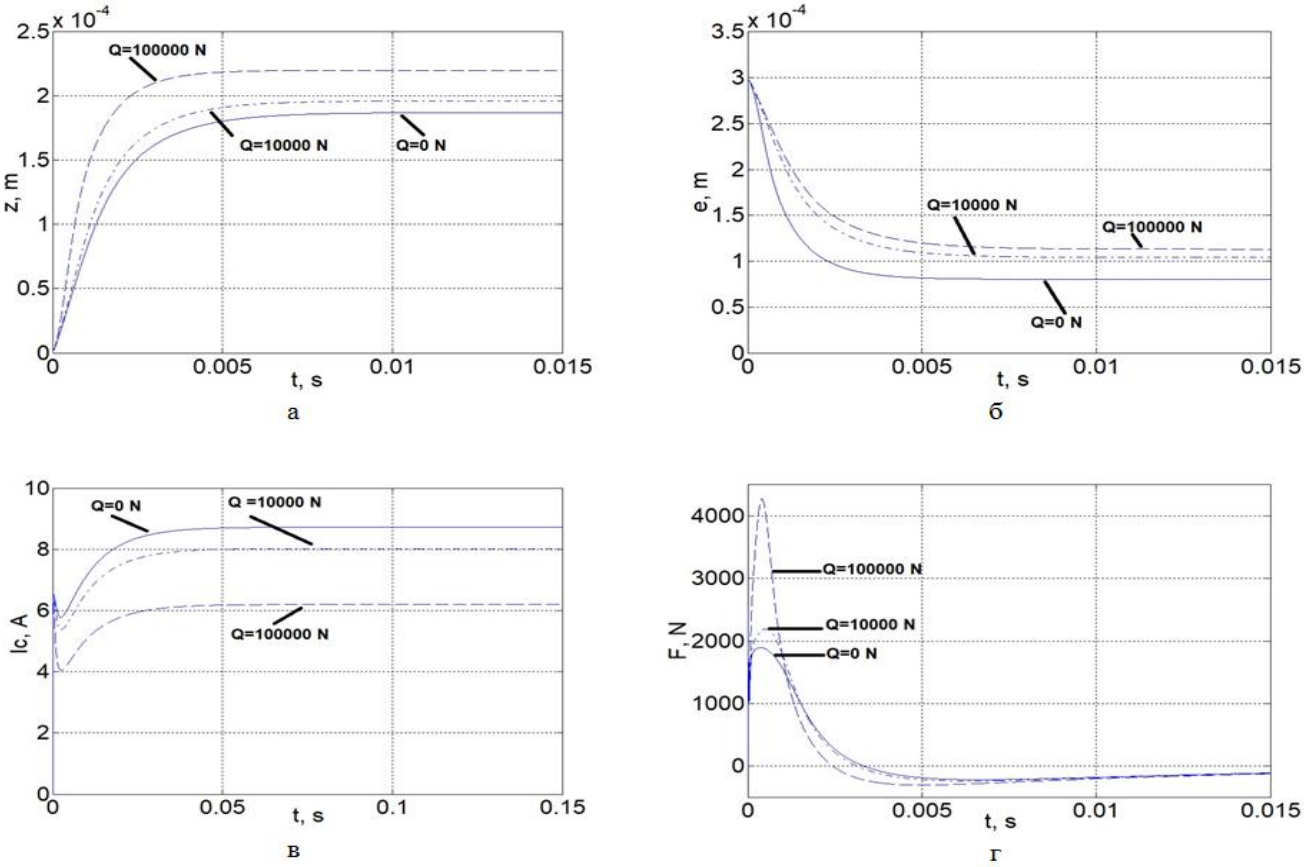


Рис. 4 – Результаты моделирования системы при увеличении внешнего воздействия *а)* изменение перемещения, *б)* изменение ошибки регулирования, в) изменение управляющего тока, *г)* изменение результирующей магнитной силы

Динамика переходных процессов, представленных на рис.4., носит на завершающей стадии экспоненциальный характер.

Исходя из полученных результатов, для спроектированной системы с заводскими параметрами максимальная величина отрабатываемого внешнего воздействия составляет 10 кН.

Исследовательский комплекс для системы управления упорным АМП

Для решения задач расчёта модели упорного АМП и визуализации результатов моделирования системы управления упорным активным магнитным подшипником разработана программа для ЭВМ «Программа для моделирования системы управления упорным активным магнитным подшипником (АМП)» [9]. Разработанная программа в совокупности с созданной в Matlab/Simulink системой управления образует исследовательский комплекс для моделирования систем управления упорным АМП при различных конструкционных параметрах АМП [10] и различных внешних воздействиях.

Основное окно программы «Программа для моделирования системы управления упорным активным магнитным подшипником (АМП)» (рисунок 5) содержит следующие элементы:

1. Меню Help.
2. Область ввода параметров системы управления упорным магнитным подшипником:

- количество витков обмотки;
- площадь полюса;
- масса диска (ротора);
- ток смещения;
- номинальный воздушный зазор;
- внешнее возмущение;
- время моделирования.

3. Кнопки управления:
- Изменить параметры;
- Начать моделирование;
- Выйти.

4. Поле выбора графика, который необходимо построить:
- **перемещение диска (z);**
- **ошибка (e);**
- **управляющий ток (Ic);**
- **токовая жёсткость электромагнита M1 (hi1);**
- **токовая жёсткость электромагнита M2 (hi2);**
- **позиционная жёсткость электромагнита M1 (cz1);**
- **позиционная жёсткость электромагнита M2 (cz2);**
- **изменение магнитной силы электромагнита M1 (dF1);**
- **изменение магнитной силы электромагнита M2 (dF2);**
- **результирующая сила (F).**

5. Поле вывода выбранного пользователем графика.

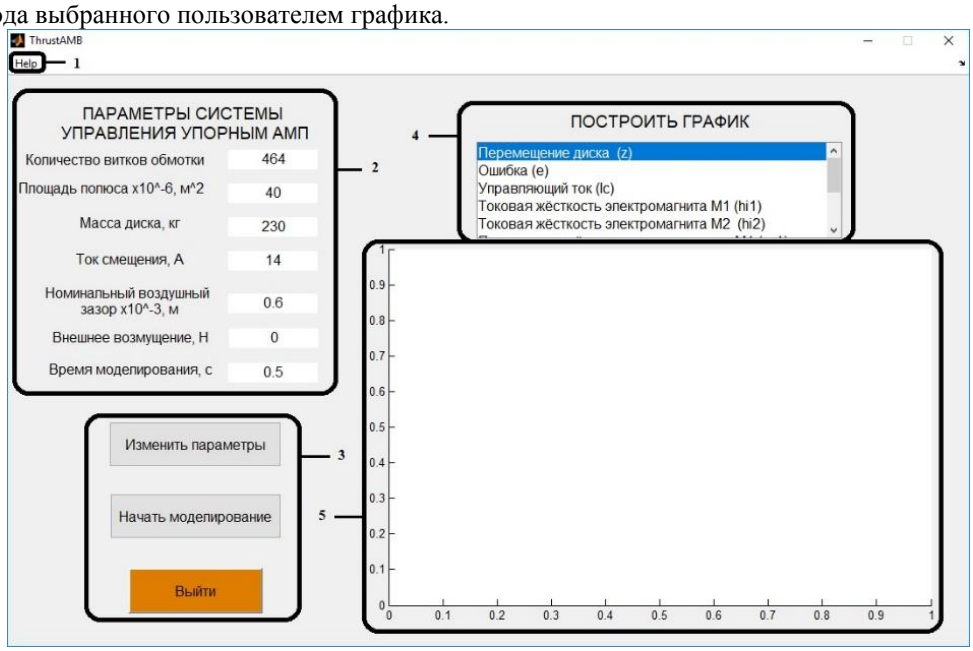


Рис. 5 – Основное окно программы

Программа обладает простым и удобным интерфейсом позволяющим осуществлять моделирование систем управления упорным АМП при различных конструкционных параметрах АМП и различных внешних воздействиях.

Заключение

Разработанная система управления упорным активным магнитным подшипником в условиях горизонтально ориентированного ротора с реализацией дифференциальной схемы управления по току была верифицирована на основе параметров заводского магнитного подшипника, показав результаты, сходные с результатами реального объекта, что позволяет утверждать, что разработанная в Matlab/Simulink структурная схема модели упорного АМП может быть использована для предварительной настройки системы управления электромагнитным подвесом как автономно, так и в составе исследовательского комплекса. Исследования разработанной системы управления показали, что для эффективного управления целесообразно использовать ПД-регулятор. Разработанный исследовательский комплекс позволяет осуществлять моделирование систем управления упорным АМП при различных конструкционных параметрах АМП и различных внешних воздействиях, что в свою очередь позволяет упростить разработку и реализацию систем управления высокоскоростной электрической машиной с электромагнитным подвесом ротора.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Стоцкая А. Д. О робастности селективного регулятора положения ротора в электромагнитном подвесе/ А. Д. Стоцкая, Т. О. Кузьмина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Автоматизация и управление– 2015 – №1 – с.51-58.

2. Schweitzer, G. Magnetic Bearings. Theory, Design, and Applicationton Rotating Machinery // G. Schweitzer, E.H. Maslen. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – pp 1-24.

3. Панкратьев Д. А. Разработка блока питания системы управления активным магнитным подвесом /Панкратьев Д. А., Кузьмина Т. О.// Материалы III Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2017» (ИСУМ-2017) – Севастополь, 2017 – с.142-146.

4. Поляхов Н. Д. Разработка и исследование системы управления упорным магнитным подшипником./ Н. Д. Поляхов, Т. О. Кузьмина, А. Д. Стоцкая и др.// Автоматика и программная инженерия. 2017, №3 (21), с. 54-58.

5. Polyakhov N.D. Mathematical Model of the Complete Electromagnetic Rotor Suspension/ N.D. Polyakhov, A.D. Stotckaia, T.O. Kuzmina// Procedia engineering – 2016. – 150 – pp. 571-578.

6. Кузьмина Т. О. Применение нечёткой логики для управления упорным активным магнитным подшипником/Кузьмина Т. О.// Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника − 2016» (ИСУМ-2016) –Севастополь, 2016. – с.501-505.

7. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение./ Ю. Н. Журавлев// – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.

8. Chiba A. Magnetic bearings and bearingless drives /A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa and others//– Elsevier, 2005. – pp. 45-80.

9. Кузьмина Т. О. Программа для моделирования системы управления упорным активным магнитным подшипником (АМП) / Кузьмина Т. О., Стоцкая А.Д. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017663088, дата регистрации 24.11.2017.

10. Кузьмина Т. О. Особенности моделирования упорного активного магнитного подшипника/ Кузьмина Т. О., Стоцкая А. Д. // Навигация и управление движением. Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» - Санкт-Петербург, 2016. – стр. 452 – 456.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Stotckaia A. D. O robastnosti selektivnogo reguljatora polozhenija rotora v elektromagnitnom podvese [About robustness properties of selective position controller for rotor in an electromagnetic suspension]/ A. D. Stotckaia, T. O. Kuzmina // Izvestiya SPbGETU "LETI", Avtomatizacija i upravlenie [Izvestiya SPbGETU "LETI", Automation and control]– 2015 – №1 – pp.51-58. [in Russian]

2. Schweitzer, G. Magnetic Bearings. Theory, Design, and Applicationton Rotating Machinery // G. Schweitzer, E. H. Maslen. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – pp 1-24.

3. Pankrat'ev D. A. Razrabotka bloka pitanija sistemy upravlenija aktivnym magnitnym podvesom [Development of a power supply unit for an active magnetic suspension control system] /Pankrat'ev D.A., Kuzmina T.O.//– Materialy III Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov «Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mehatronika – 2017» (ISUM-2017) [Materials of the III All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Intellectual Systems, Control and Mechatronics - 2017" (ISCM-2017)] - Sevastopol, 2017. – pp. 142-146. [in Russian]

4. Polyakhov N. D. Razrabotka i issledovanie sistemy upravlenija upornym magnitnym podshipnikom [Development and research of a thrust magnetic bearing control system]./ N .D. Polyakhov, T.O. Kuzmina, A.D. Stotckaia and others // Avtomatika i programmnaja inzhenerija [Automatics & Software Enginery]. 2017, №3 (21), pp. 54-58. [in Russian]

5. Polyakhov N. D. Mathematical Model of the Complete Electromagnetic Rotor Suspension/ N. D. Polyakhov, A. D. Stotckaia, T.O. Kuzmina// Procedia engineering – 2016. – 150 – pp. 571-578.

6. Kuzmina T. O. Primenenie nechjotkoj logiki dlja upravlenija upornym aktivnym magnitnym podshipnikom [Application of fuzzy logic to control a thrust active magnetic bearing]/Kuzmina T. O.// Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov «Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mehatronika − 2016» (ISUM-2016) [Collection of works of the All-Russian scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Intellectual systems, control and mechatronics-2016" (ISCM-2016)]– Sevastopol, 2016. – pp.501-505. [in Russian]

7. Zhuravlyov Yu. N. Aktivnye magnitnye podshipniki: Teorija, raschet, primenenie.[Active Magnetic Bearings: theory, design, applications]/ Yu. N. Zhuravlyov// – SPb.: Politehnika, 2003. – 206 p. [in Russian]

8. Chiba A. Magnetic bearings and bearingless drives /A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa and others //– Elsevier, 2005. – pp. 45-80.

9. Kuzmina T. O., Stotckaia A. D. Programma dlja modelirovanija sistemy upravlenija upornym aktivnym magnitnym podshipnikom (AMP) [Program for modeling a thrust active magnetic bearing (AMB) control system] / Kuzmina T. O., Stotckaia A. D // Certificate of state registration of computer programs №2017663088, date of registration: 24.11.2017. [in Russian]

10. Kuzmina T. O. Osobennosti modelirovanija upornogo aktivnogo magnitnogo podshipnika [Features of a thrust active magnetic bearing modelling]/ Kuzmina T. O., Stotckaia A. D. // Navigacija i upravlenie dvizheniem. Materialy HVSh konferencii molodyh uchenyh «Navigacija i upravlenie dvizheniem» s mezhdunarodnym uchastiem. SPb.: GNC RF AO «Koncern «CNII «Elektropribor» [Navigation and motion control. Proceedings of the XVIIIth Conference of Young Scientists “Navigation and Motion Control” with international participation. SPb .: SSC RF Concern Central Research Institute Electropribor] – Saint Petersburg, 2016. – pp. 452 – 456. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.018

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПОРТИВНОЙ ВЕРЕВКИ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ.

Научная статья

Макашова З.Э.[1,] *, Чередниченко Л.А.[2], Чередниченко Ф.Л.[3]

[1, 2] Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», Санкт - Петербург, Россия;

[3] СПбГУ Центр патриотического воспитания молодежи «Дзержинец», Санкт-Петербург, Россия

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

Аннотация

В статье предложен метод исследования динамических процессов в спортивной веревке с помощью видеонаблюдения. Получены временные диаграммы падения груза с высоты 3м. Выполнен теоретический анализ характера движения груза и веревки. Показано, что на отдельных интервалах времени они могут перемещаться раздельно. Рассчитаны коэффициенты трения и упругости на введенных временных интервалах динамического процесса.

Ключевые слова: спортивная веревка, видеонаблюдение, коэффициенты трения и упругости веревки.

RESEARCH OF PARAMETERS OF A SPORTS ROPE WITH THE HELP OF VIDEO SURVEILLANCE

Research article

Makashova Z.E.[1,] *, Cherednichenko L.A.[2], Cherednichenko F.L.[3]

[1, 2] Baltic State Technical University “VOENMEH,” St. Petersburg, Russia;

[3] SPbSU Center for the Patriotic Education of Young People “Dzerzhinets,” St. Petersburg, Russia

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

Abstract

The article proposes the method for studying dynamic processes in a sports rope with the help of video surveillance. The time diagrams of the fall of the cargo from the height of 3 meters were obtained. Theoretical analysis of the nature of the movement of cargo and rope is performed. It is shown that at individual time intervals they can be moved separately. The coefficients of friction and elasticity are calculated on the input time intervals of the dynamic process.

Keywords: sports rope, video surveillance, coefficients of friction and elasticity of the rope.

Спортивные веревки используются в различных типовых и экстремальных условиях. Принятая оценка их качества по статическим характеристикам и предельным усилиям в случае разрыва не позволяют судить о динамических нагрузках. Динамические испытания и последующий анализ результатов дают возможность определить реальные технические характеристики веревки. В статье предлагается метод исследования динамики с помощью видеонаблюдения.

Полный анализ динамического процесса в спортивной веревке возможен, если известны ее параметры: коэффициент трения $\kappa_т$ и коэффициент упругости $\kappa_у$ [1], [2], [3]. Однако в технических паспортах веревок они не приводятся, поскольку зависят от многих факторов. Для получения параметров необходимо выполнить ряд экспериментальных исследований.

Известные авторам экспериментальные стенды [4], [5], [6] позволяют измерить и записать силовое воздействие на веревку с использованием тензодатчиков и измерительных электронных схем. При этом можно снять статическую механическую характеристику веревки $F_у(x)$, где x – ее удлинение под действием силового воздействия $P = mg$ груза массой m, а также динамическое изменение силы упругости $f_y(t)$. Подобные измерения позволяют определить как статический коэффициент упругости веревки, так и динамические параметры, связанные с упругостью. Стремление к высокой точности измерений приводит к проявлению на осциллограммах высокочастотных колебаний опоры и размытию временной зависимости записываемого усилия. Сила трения при этом не исследуется.

Более информативным, но менее точным является метод видеонаблюдения за изменением длины веревки во время динамического процесса. Метод состоит в том, что деформация веревки фиксируется видеокамерой, имеющей достаточную частоту кадров. По видеозаписи определяется положение нагруженного конца веревки или самого груза, а также соответствующее время.

В качестве примера рассмотрим вертикальное падение груза, закрепленного на конце веревки, второй конец которой крепится к опоре O (рис.1а). Далее исследованы случаи падения с фактором, равным 1.

В системе веревка - груз действуют три силы: сила инерции груза $f_и(t)$, сила трения $f_т(t)$ и сила упругости $f_у(t)$. Весом веревки пренебрежем. Уравнение, описывающее динамический процесс, имеет вид:

$$f_и + f_т + f_у = P \qquad (1)$$

Если параметры веревки постоянны, т.е. выполняются законы Стокса и Гука, то уравнение (1) является линейным

$$m x'' + k_т x' + k_у x = k_у x_0 = mg,$$

где x_0 – установившееся значение удлинения веревки.

Линейная модель исследовалась в работах [2], [3], [7], в которых подчеркнуто, что реальные динамические процессы в системе веревка – груз носят нелинейный характер. Для изучения их особенностей и был разработан метод видеонаблюдения и выполнена серия опытов, в частности, связанных с падением груза. Эксперименты проводились в СПбГБУ ЦПВМ «Дзержинец» г.Санкт-Петербург под руководством педагога дополнительного образования по направлению «Спелеотуризм» Чередниченко Ф. Л. (2.04, 1 3.06.2018г.).

Опыты выполнялись в помещении высотой 7м, точка опоры находилась на удалении 1м от потолка, а от стены - на 0,5м. Использовались отечественные веревки производства заводов в Коломне и Дзержинске диаметром 10мм с начальными длинами $l_н$ = 3м. Масса груза 80кг. На стене была нанесена координатная сетка в районе движения груза с ячейкой (10 × 10) см^2, а также закреплена мерная лента с делением 1см. Район движения груза фотографировался видеокамерой GoPro 2, имеющей частоту кадров 120 к/мин.

Зависимости x (t) положения конца веревки и $x_1(t)$ - положения груза воспроизводились в виде осциллограмм после раскадровки видеозаписи. Типовые графики этих функций в предположении совпадения центра тяжести груза с концом веревки представлены на рис.1б, а при несовпадении - на рис.2.

Рассмотрим с качественной стороны динамический процесс, осциллограмма которого воспроизведена на рис.1б. В течении времени 0…t_1 груз свободно падает с высоты $h = l_н$. При этом потенциальная энергия груза преобразуется в кинетическую энергию. В конце интервала груз приобретает скорость $V_0 = (2\, g\, l_н)^{0,5}$

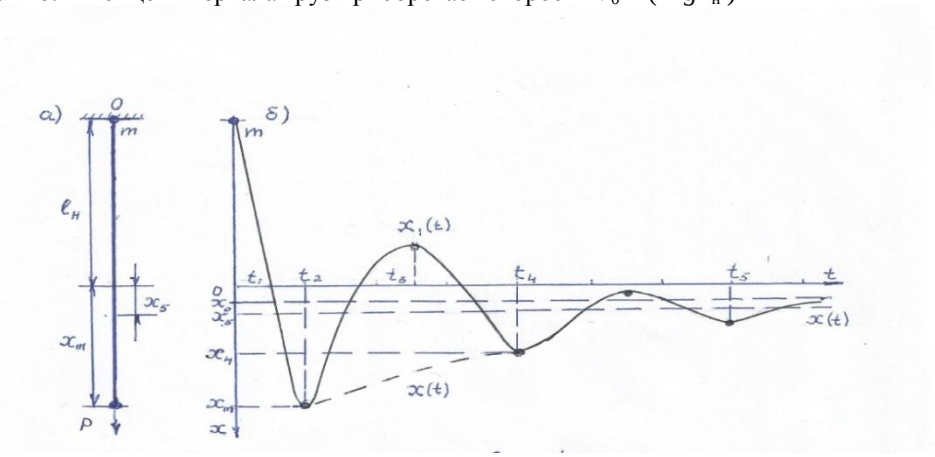


Рис. 1 – Схема опыта *(а)* и диаграммы зависимостей x (t) и $x_1(t)$ при совпадении конца веревки с центром тяжести груза *(б)*

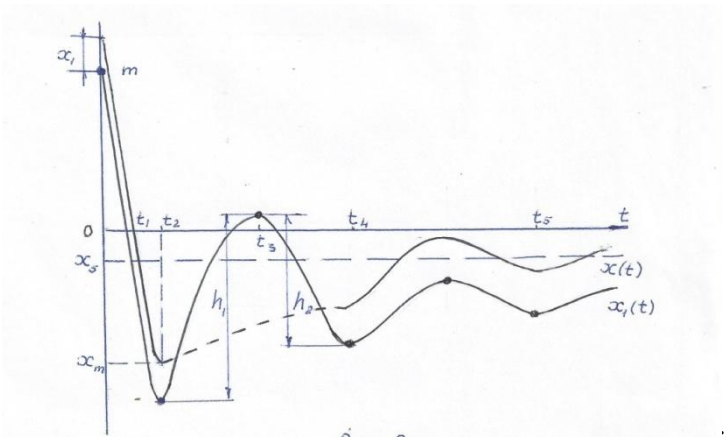


Рис. 2 – Диаграммы зависимостей x (t) и $x_1(t)$ при несовпадении конца веревки с центром тяжести груза

Далее ($t_1 \ldots t_2$) развивается динамический процесс в системе веревка - груз: груз тормозится за счет потерь энергии на трение в веревке и ее упругости (натяжения). Движение описывается уравнением (1), В момент t_2- деформация веревки достигает максимума $x = x_m$. Кинетическая энергия груза при этом равна нулю, ибо полностью преобразовалась в тепло и потенциальную энергию растянутой веревки $W_{пв} = 0,5\, k_у\, x_m^2$.

Поскольку максимальная сила упругости $F_{ym}(x_m) > P$, груз в момент t_{2+} начинает движение вверх. Начальная скорость движения находится из равенства кинетической энергии груза и потенциальной энергии веревки

$$0,5 m V_{01}^2 = 0,5\, k_у\, x_m^2, \quad V_{01} = x_m (k_у/m)^{0,5}.$$

Она может быть определена также по высоте отскока h_1 груза от точки максимального падения $V_{01} = (2\, g\, h_1)^{0,5}$. Эти формулы приводят к одному результату, если учесть нелинейность механической характеристики веревки [3]. В интервале времени $t_2 \ldots t_4$ веревка сжимается, поскольку не нагружена грузом. Процесс восстановления длины веревки силой упругости инерционен, поэтому система веревка – груз распадается на две подсистемы.

Груз выполняет «свободный» полет по вертикали. Процесс описывается уравнением (2)

$$f_и = P, \quad x_1'' = g, \tag{2}$$

здесь x_1 – координата центра тяжести груза. Решение этого уравнения имеет вид:

$$x_1' = V_{01} - g\, t, \quad x_1 = x_m + V_{01} t - 0,5\, g\, t^2.$$

Веревка складывается в «гармошку» и свободно сокращается. Процесс описывается с помощью равенства

$$f_т + f_у = 0. \tag{3}$$

Если параметры считать постоянными, то из (3) имеем

$$k_т\, x' + k_у\, x = 0,$$

$$x = A\, e^{-t/\tau}, \; A = x_m / e^{-t_2/\tau}, \; \tau_л = k_т / k_у = (t_4 - t_2)/\ln(x_m/x_4),$$

т.е. при линейном рассмотрении процесса длина веревки экспоненциально уменьшается до момента t_4, когда груз, опускаясь, снова нагрузит веревку. На рис.1а и рис.2 соответствующий участок зависимостей $x(t)$ выделен штриховой линией. Заметим, что в зависимости от длины и параметров веревки можно ожидать повторные скачки груза с убывающей амплитудой.

На следующем интервале $t_4 \ldots t_5$ система веревка – груз совершает колебания, описываемые уравнением (1) с новыми начальными условиями. К концу процесса $t > t_5$ колебания практически прекращаются, и груз медленно поднимается вверх за счет упругости веревки, достигая установившегося положения при $x = x_0$. Этот интервал времени самый продолжительный. При повторении опыта следует учитывать, что возможно наложение предыдущего процесса на последующий.

С помощью осциллограммы $x(t)$ могут быть получены функции $x'(t)$,

$x''(t)$, например, графическим методом при относительно невысокой точности.

Перейдем к определению параметров веревки с учетом нелинейных связей и результатов экспериментов для исследования составляющих силового воздействия.

Статический коэффициент упругости приближенно находится с помощью механической характеристики. Так, при $F_у(x) = P$ он равен $k_у = P/x$. При анализе переходного процесса целесообразно использовать динамический коэффициент упругости $k_{ду} = d F_у(x)/d x$.

Поскольку механическая характеристика веревки имеет вид параболы и может быть аппроксимирована квадратической параболой, будем считать зависимость $f_у(x) = ax^2$ при $a = 10^5/ l_н^2$ типовой аппроксимацией этой характеристики [2], [3], [8]. В этом случае динамический коэффициент упругости $k_{ду} = 2\,ax$, т.е. зависит от деформации веревки.

Мгновенное значение коэффициента трения может быть найдено из уравнения (1), поскольку все его другие составляющие определены. Для выделенных интервалов рационально ввести некоторое среднее значение этого коэффициента. Найдем средний коэффициент трения на интервале $t_1 \ldots t_2$, когда скорость нелинейно уменьшается, с помощью зависимости приближенно описывающей этот процесс:

$$x' = b - c\,x^2 \tag{4}$$

При $x = 0$ скорость равна V_0, а при $x = x_m$ она равна нулю, т.е.

$$x' = V_0 (1 - x^2 / x_m^2).$$

Далее энергию, расходуемую на трение, определим как работу по растяжению веревки

$$W_т = \int_0^{xm} kт\, x'\, dx = 2\, k_{т1}\, V_0\, x_m/3,$$

а с другой стороны эта энергия равна разности потенциальных энергий груза, расположенного на уровне точки опоры над точкой $x = x_m$, и взлетевшего после отскока на высоту h_1 (рис.1б)

$$W_т = mg(l_н + x_m - h_1).$$

Таким образом, среднее значение коэффициента трения на рассматриваемом интервале времени равно:

$$k_{т1} = 3mg(l_н + x_m - h_1)/2\, V_0\, x_m. \tag{5}$$

Возможность использования приближения (4) подтверждается сопоставлением с расчетом для варианта средней скорости $x'_{ср} = x_m/(t_2 - t_1)$. Отличие составляет 5%.

На интервале времени $t_2 \ldots t_4$ динамический процесс в веревке описывается однородным нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка

$$k_{т2}\, x' + a\, x^2 = 0, \tag{6}$$

из которого следует $d\,t = - k_{т2}\, d\,x/ a\, x^2$.

Интегрируя слева по t от t_2 до t_4 и справа по x от x_m до x_4, получим коэффициент трения на третьем временном интервале

$$k_{т2} = a\,(t_4 - t_2)\, x_m\, x_4/ (x_m - x_4). \tag{7}$$

Заметим, что постоянная времени этой части процесса может быть определена приближенно по формуле:

$$\tau_н = k_{т2}/2a\, x_0 > \tau_л .$$

Колебательный процесс на четвертом интервале описывается уравнением

$$m\, x'' + k_{т3}\, x' + a\, x^2 = a\, x_0^2, \tag{8}$$

а коэффициент трения находится по формуле:

$$k_{т3} = mgh_2 / x'_{ср} x_4, \tag{9}$$

здесь h_2 – высота падения груза после отскока (рис.2).

Наконец, при $t > t_5$ колебания практически прекращаются, и груз медленно поднимается вверх за счет упругости веревки, достигая установившегося положения $x = x_0$. Коэффициент трения находится из уравнения (8) при

$x'' = 0$. По аналогии с выводом $k_{т2}$ получим

$$d\,t = kт4\, d\,x/ a\, (x52 - x2).$$

После интегрирования до выбранной координаты t6 >> t5 найдем

$$kт4 = a\, (t6 - t5)\, x0 / (arctg\, (x6 / x0) - arctg\, (x5/ x0)) \approx$$
$$\approx a\, (t6 - t5)\, x02 / (x6 - x5) \tag{10}$$

В таблице 1 приведены результаты обработки осциллограмм $x(t)$, полученных при падении груза, подвешенного на новой веревке коломенского завода, и при свободной деформации этой веревки после снятия груза. Значение x относится к удлинению веревки в конце интервала времени, а Δx – к изменению длины за время Δt.

Таблица 1 – Результаты обработки осциллограмм

m (кг)	80					0
Интервал	t_1	$t_2 - t_1$	t_4 - t_2	$t_5 - t_4$	t_6 - t_5	-
Δt (с)	0,77	0,17	0,96	0,96	600	8
x (м)	0	1,05	0,7	0,55	0,28	0,49
Δx (м)	0	1,05	0,35	0,15	0,27	0,06
$k_т$ (Нс/м)	-	430	$2{,}2\ 10^4$	$8{,}2\ 10^3$	$5{,}6\ 10^6$	$4\ 10^5$

Отметим, что серия из четырех подобных опытов с другими веревками, а также узлами крепления веревки к опоре и груза к веревке показала, что данные соответствующих измерений и расчетов отличаются не более, чем на 30%, что, в частности, связано с сравнительно низкой точностью измерений координаты x. В условиях проводимых экспериментов длительность переходных процессов, связанных с падением груза, в среднем составляла 2,2с, продолжительность второго интервала ~ 0,2с, третьего и четвертого по ~ 1с.

Из предыдущего анализа и данных таблицы 1 следует, что динамический процесс в веревке развивается сложным образом. Он условно может быть разбит на четыре интервала времени с разным описанием закона изменения длины веревки. При этом коэффициент трения изменяется в широких пределах. Он растет с уменьшением скорости развития процесса.

Кроме исследования изменения коэффициента трения в динамике, видеонаблюдение позволяет косвенным методом определить силовые воздействия на веревку $f_у = ax^2$ в любой момент времени, в том числе максимальное усилие при $x = x_m$, а также изменение частоты колебаний системы на четвертом интервале. Так, в рассмотренном выше опыте f_{ym} = 12,2к Н, а частота растет от 1,7 до 2 Гц.

Таким образом с помощью видеонаблюдения и аналитических расчетов можно анализировать все составляющие динамического процесса в спортивной веревке. Такой анализ необходим при сопоставлении характеристик веревок разных производителей и типов, а также при сравнении параметров веревок бывших в употреблении и на хранении.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Петко Н.. Азбука одноверевочной техники. Перевод с болгарского / Н. Петко, 1991. С.22.
2. Макашова З. Э. Статическая нагрузка веревки, используемой троллеем. Материалы МНПК / З. Э. Макашова, Ф. Л. Чередниченко, Л. А. Чередниченко. - Вологда, 30.08,2017. С.36-38.
3. Макашова З. Э. О динамике спелеоверевки при падении груза. Сб. статей МНПК,ч.1,Уфа, МЦИИ / З. Э. Макашова, Ф. Л. Чередниченко, Л. А. Чередниченко Омега, сайнс, 2017. С.44-47.
4. Jacques G. Эксперименты в области механики при спелеоспасении / G. Jacques. 1994 - 1996.С.15
5. A. Long, M. Lyon, G. Lyon. Industrial rope access. Contract research. Report 364/ 2001. С.26-29.
6. Ступаков А. А. Стенды исследования средств индивидуальной защиты от падения человека с высоты / А. .А Ступаков. Вестник МГСУ, 2015, №8. С. 130-140.
7. Макашова З. Э. Линейная модель процессов в веревке при движении спортсмена вверх / З. Э. Макашова, Ф. Л. Чередниченко, Л. А. Чередниченко. Сб. статей МНПК,ч.1,Уфа, МЦИИ Омега, сайнс, 2017. С.106-111.
8. Серафимов К. В. Веревка – как она есть. / К. В. Серафимов, 1989-96гг. С.70. URL: www.sumgan.com
9. Ступаков А. А. Безопасность и определение рисков работы на высоте от использования страховочного оборудования. Механизация строительства / А. А. Ступаков, №11(845), 2014. С.40-44.
10. Маринов В. Проблемы безопасности в горах. Физкультура и спорт / В. Маринов. 1981г. С.154-176.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Petko N. Azbuka odnoverevochnoj tekhniki [Alphabet of single-rope technology]. Translation from Bulgarian / N. Petko, 1991. p.22.
2. Makashova Z.E. Staticheskaya nagruzka verevki, ispol'zuemoj trolleem. Materialy MNPK [The static load of the rope used by the trolley. Materials of MNPK] / Makashova Z.E., Cherednichenko F.L., Cherednichenko L.A., Vologda, 30.08,2017. Pp.36-38.
3. Makashova Z.E. O dinamike speleoverevki pri padenii gruza. Sb. statej MNPK [On the dynamics of caving in the fall of the load. Sat articles of MNPK, part 1] / Makashova Z.E., Cherednichenko F.L., Cherednichenko L., Ufa, Mtsii Omega, Sains, 2017. Pp.44-47
4. Jacques G. Ehksperimenty v oblasti mekhaniki pri speleospasenii [Experiments in the field of mechanics during speleospace] / G. Jacques. 1994 - 1996.P.15
5. A. Long, M. Stendy issledovaniya sredstv individual'noj zashchity ot padeniya cheloveka s vysoty [Industrial rope access. Contract research] / A. Long, M. Lyon, G. Lyon.. Report 364/2001. Pp.26-29
6. Stupakov A. A. and other. Stands of research of means of individual protection against falling of the person from height. Vestnik MGSU, 2015, №8. Pp. 130-140.
7. Makashova Z. E. Linejnaya model' processov v verevke pri dvizhenii sportsmena vverh [Linear model of the processes in the rope when the athlete moves up. Sat articles of MNPK] / Makashova Z. E., Cherednichenko L. A., Cherednichenko F. L, part 1, Ufa, Mtsii Omega, Sains, 2017. P.106-111
8. Serafimov K.V. Rope - as it is. / K. V. Serafimov , 1989-96. C.70. URL: Www.sumgan.com

9. Stupakov A. A. Bezopasnost' i opredelenie riskov raboty na vysote ot ispol'zovaniya strahovochnogo oborudovaniya. Mekhanizaciya stroitel'stva [Safety and risk assessment work at heights from the use of safety equipment. Mechanization of construction] / A. A. Stupakov No. 11 (845), 2014. P.40-44.

10. Marinov V. Problemy bezopasnosti v gorah. Fizkul'tura i sport [Problems of safety in the mountains. Physical education and sport] / V. Marinov. 1981 P.154-176.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.019

ОСОБЕННОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ 0, 4 КВ

Научная статья

Масенко А.В.[1, *], Сбитнева Н.И.[2], Скворцов В.А.[3], Щебетеев В.А.[4]

[1, 2, 3, 4] Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

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

Аннотация

Рассмотрены вопросы дополнительных потерь электроэнергии в низковольтной сети 0,4 кВ на примере электроснабжения птицеводческого предприятия, вызванные протеканием реактивной энергии. Проведены экспериментальные исследования в сети 0,4 кВ птицеводческого предприятия, где отсутствует резко-переменный характер нагрузок, а несимметричность вызвана в основном протеканием тока в нулевом рабочем проводнике, что при активно-индуктивной нагрузке приводит к дополнительному потреблению реактивной мощности синусоидального симметричного режима из питающей сети.

Ключевые слова: потери электроэнергии, качество электроэнергии, компенсация реактивной мощности, электроснабжение.

FEATURES OF ELECTRICITY LOSSES IN RURAL ELECTRIC NETWORK 0, 4 KV

Research article

Masenko A.V.[1, *], Sbitneva N.I.[2], Skvortsov V.A.[3], Shchebeteev V.A.[4]

[1, 2, 3, 4] 3rd year student of undergraduate courses, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

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

Abstract

The issues of additional losses of electricity in the low-voltage network of 0.4 kV on the example of the power supply of the poultry enterprise, caused by the flow of reactive energy, were considered. Experimental studies were conducted in the 0.4 kV network of the poultry enterprise, where there were no dramatically variable loads, and asymmetry was mainly caused by the flow of current in the zero working conductor, which with active-inductive load led to additional consumption of the sinusoidal symmetrical reactive power from the mains.

Keywords: power losses, power quality, reactive power compensation, power supply.

Потери электроэнергии, как неизбежные, сопутствующие передаче по проводникам сети активной мощности, необходимой для полезной работы в нагрузках потребителей, так и дополнительные, связанные с передачей по проводникам сети реактивной мощности, являются специфическим для цепей переменного тока объектом периодического, с удвоенной частотой действия источника энергетического обмена между источником и нагрузкой, естественно включаются в величину тарифа электроэнергии. Причём в первом приближении эти потери пропорциональны длине проводников тока между источником и нагрузкой. Отсюда понятно, насколько тяжело приходится именно электропотребителям в сельской местности, поскольку потери энергии в их удалённых от подстанций и широко распределённых по территории сетях оказываются в 2-3 раза выше, чем в городских сетях [1], [2], [3].

Отметим, что общепринятого стандартного определения понятия реактивной мощности нет, в отличие от активной мощности [4], [5], [6], [7], и поэтому под реактивной мощностью трёхфазной сети многие понимают не только реактивную мощность синусоидального, симметричного режима, величину векторно-ортогональную активной мощности, которая большинством исследователей [8], [9], [10] определяется также посредством ортогонализованных активного и реактивных (разных знаков: «+» – индуктивный, «-» – емкостной) токов (величина напряжения при этом выступает в роли коэффициента-параметра) (рисунок 1), при этом полная мощность S_1 есть квадратура активной и реактивной мощностей, т. е. $S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2$; но также и реактивную мощность несинусоидального режима, в которую входят и составляющие мгновенной мощности, вызванные несинусоидальностью, несимметричностью, нестационарностью нагрузки [6].

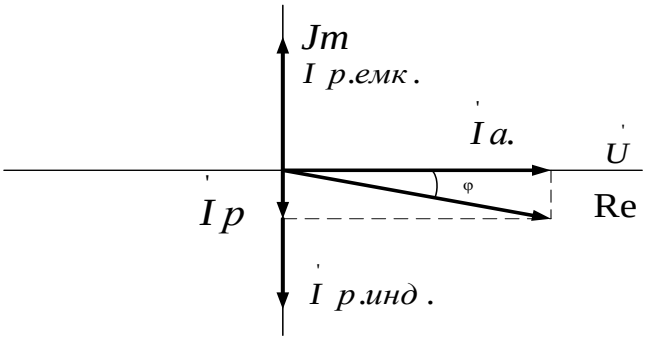


Рис. 1 – Векторная диаграмма представляющая на комплексной плоскости полный ток I и его ортогональные составляющие: активную – I_a, реактивную – I_p

При этом полная мощность нагрузки S_2 как вектор обычно представляется уже тремя ортогональными составляющими: активной – P, реактивной – Q и мощностью искажений – N (рисунок 2). Поэтому квадратура полной мощности записывается по аналогии с предыдущим выражением: $S_2^2 = P_1^2 + Q_1^2 + N_1^2$.

Проведённые экспериментальные исследования в сети 0,4 кВ птицеводческого предприятия показали, что, ввиду преобладания двигательной нагрузки, несинусоидальность тока нагрузок невысока, не более 5 % полного тока, а несинусоидальность напряжения находится на уровне величины 3 % номинального напряжения и вызвана в основном тяговыми нагрузками, генерирующими высшие гармоники в общую высоковольтную питающую сеть.

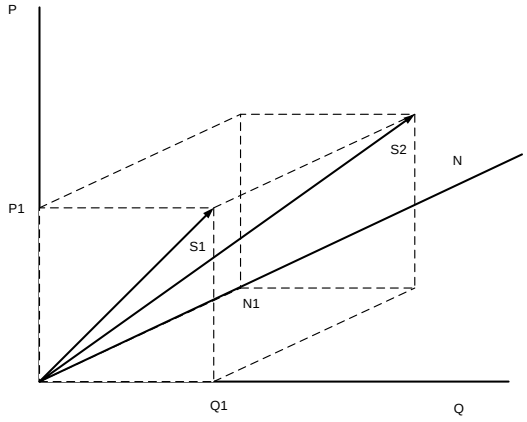


Рис. 2 – Трехмерное представление вектора полной мощности S

Нестационарность режимов данной сети также низка, период стационарности можно оценить величиной единиц минут, что позволяет не учитывать резко-переменного характера нагрузок. Несимметричность вызвана в основном током нейтрали, который при измерениях достигал величины 20 % величины фазного тока сети, а коэффициент напряжения нулевой последовательности – 2 %, что является допустимым. Мощность искажения N, как составляющая мощности S_2, будет при этом иметь величину порядка 0,5 % относительно мощности S_1, и ею можно пренебречь при последующем рассмотрении. Поэтому основную величину дополнительных потерь энергии в сети птицеводческого предприятия вызывает реактивная мощность синусоидального симметричного режима, вызванная реактивной составляющей индуктивного характера $i_p(t)$ полного тока i (t) (рисунок 1), относительное значение которой, выражаемое коэффициентом реактивной мощности, изменяется в интервале 0,6…1,0 зимой и 0,85…1,35 летом. Снизить эту реактивную мощность активно-индуктивных нагрузок до заданного значения 0,35 возможно присоединением к данной сети источника реактивной мощности противоположного знака (емкостного). Для большинства энергохозяйств промышленного производства в качестве таких источников подходят только батареи статических конденсаторов, однако их реактивная мощность не может регулироваться непрерывно, как это делается с помощью синхронных компенсаторов. Непрерывно регулировать ток батареи конденсаторов (БК) с помощью импульсно-фазового управления на основе тиристоров, как это легко на практике делается в электрических цепях с резистором или катушкой индуктивности, невозможно принципиально, так как напряжение на конденсаторе не может измениться скачкообразно. Но дискретно-ступенчатое регулирование реактивной мощности нагрузок сети 0,4 кВ, путем изменения числа единиц конденсаторов в БК, подключаемых к сети (рисунок 3), является вполне приемлемым [11], поскольку потери энергии в проводниках от протекания реактивного тока характеризуются квадратичными формами активной и реактивной мощностей, что снижает преимущества в точности непрерывного регулирования.

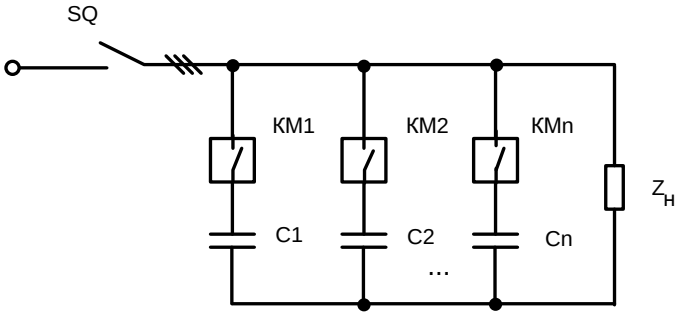


Рис. 3 – Принципиальная однолинейная схема БК с дискретно-ступенчатым регулированием реактивной мощности нагрузки

Конечно, непрерывно регулировать реактивную мощность БК, выдаваемую в сеть, возможно балластным методом с помощью параллельно подключенной катушки индуктивности, питаемой тиристорами (рисунок 4).

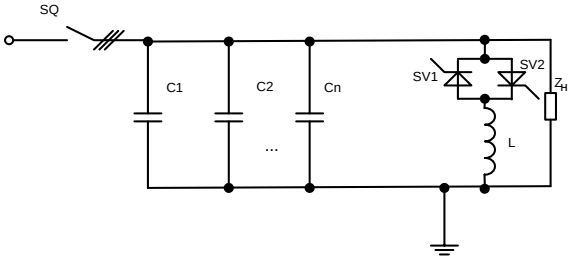


Рис. 4 – Принципиальная однолинейная схема БК с непрерывное регулированием реактивной емкостной мощности нагрузки на базе тиристорно-реакторного регулятора тока (балластный метод)

Но применение балластного метода приводит к удорожанию стоимости системы компенсации в 3 раза, поэтому так как большинство электроприемников сети 0,4 кВ сельской местности представляет собой симметричную, с малым изменением в течение суток, активно-реактивную нагрузку, то простое электромеханическое управление БК на основе магнитных контакторов допустимо по коммутационному ресурсу аппарата и по надежности работы в динамических режимах самих конденсаторов.

Также известны схемы с применением тиристорных (симисторных) блоков для дискретно-ступенчатой коммутации БК [11, 12] (рисунок 5). Преимущество, которое имеет при этом тиристорное управление, состоит в том, что конденсатор подключается к сети в тот момент, когда напряжение на «закрытом» тиристоре (как разомкнутом выключателе) перед его «открытием» близко к нулю, что позволяет предотвратить значительный импульс коммутационного тока.

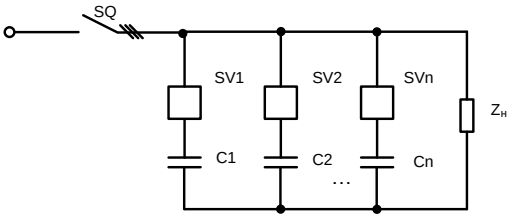


Рис. 5 – Принципиальная однолинейная схема БК с дискретным регулированием реактивной мощности нагрузки тиристорными ключами

Выполнение данного условия коммутации требует более сложной системы управления полупроводниками, что приводит к значительному увеличению стоимости системы компенсации и резко снижает ее надежность [13], [14].

Поэтому в сельских сетях используется система компенсации двух типов: централизованная и групповая.

Централизованная система компенсации реактивной мощности (КРМ) строится на базе БК, устанавливаемой на потребительской подстанции 10/0,4 кВ и подключаемой к шинам низшего напряжения (рисунок 6). У такой схемы конденсаторы в батарее защищены от негативных воздействий и легко вводятся и выводятся из эксплуатации имеющимися на подстанции коммутационными аппаратами.

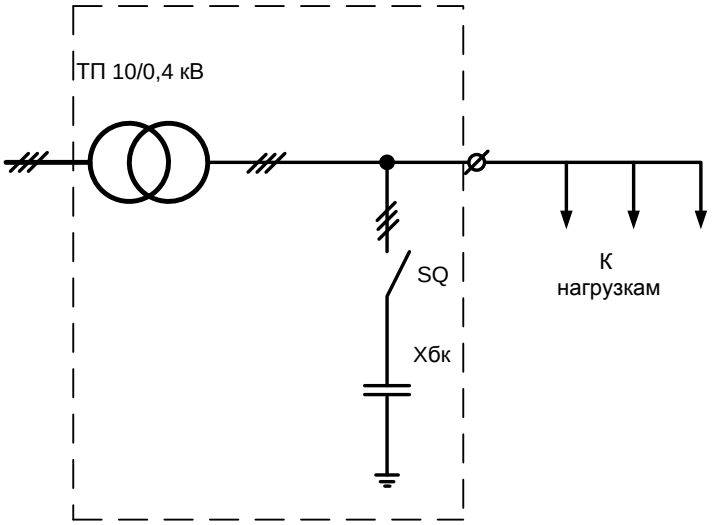


Рис. 6 – Принципиальная однолинейная схема системы КРМ централизованного вида

Однако имеется серьезный недостаток — такая батарея не «защищает» от реактивного тока линии, идущие от шин к нагрузкам, то есть, в этом случае БК только снижает реактивную нагрузку на силовой трансформатор. Поэтому такую систему нельзя рекомендовать для сельхозпроизводителей, а следует стремиться применять групповую систему КРМ (рисунок 7).

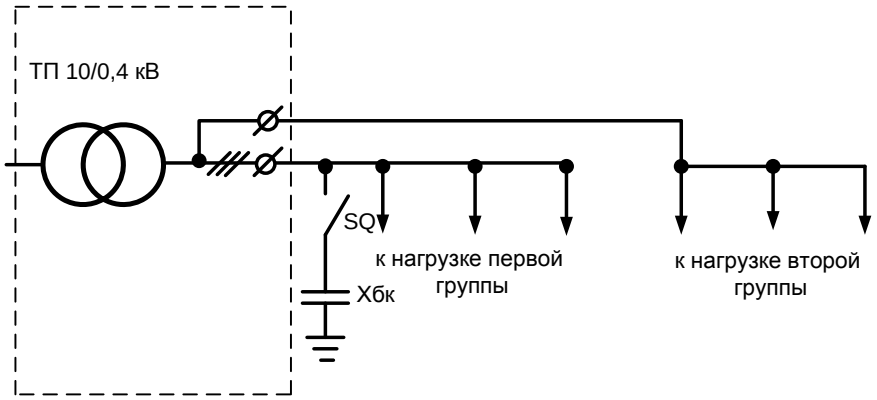


Рис. 7 – Принципиальная однолинейная схема системы КРМ группового типа

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Копылов Г. А. Снижение потерь в сетях 0,38 кВ / Г. А. Копылов // Механизация и электрификация с.х. 1985, №11. С.53-54.

2. Савиных В. В. Синтез алгоритма управления компенсатора тока нулевой последовательности / В. В. Савиных, В. В. Тропин // Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск): Известия высших учебных заведений. Электромеханика, № 3, 2012 – С. 60-63.

3. Королёв Ю. П. О надёжности электроснабжения сельских потребителей. По материалам заседания бюро Отделения механизации, электрификации и автоматизации Россельхозакадемии / Ю. П. Королёв // Техника в сельском хозяйстве. 2000, №6. С.33,34.

4. Винников А. В. Устройство компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя, как элемент его системы подсушки в технологической паузе / А. В. инников, Д. Е. Кучеренко, В. В. Тропин // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XXXVII сессии семинара по тематике «Электроснабжение». / – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2016. – С. 47 -49.

5. Демирчан К. С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций. Ортомощность./ К. С. Демирчан // Изв.РАН. Энергетика.1992.№1.С.15-38.

6. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / Р. Дрехслер. – М.: Энегоатомиздат,1985. 112с.

7. Тропин В. В. Анализ связи параметров сети с показателями качества электроэнергии / В. В. Тропин, А. В. Савенко, В. А. Перепечин // Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск): Известия высших учебных заведений. Электромеханика, № 5, 2005 – С. 16-18.

8. Савиных В. В. Автономный стенд для оценки необходимости компенсации реактивной мощности в сети 0,4 кв с нейтралью / В. В. Савиных, В. В. Тропин // Южно-Российский государственный политехнический университет

(НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск): Известия высших учебных заведений. Электромеханика, № 2, 2012 – С. 45-46.

9. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. – М.: ОАО «ВНИПИ Тяжпромэлектропроект», 2003

10. Лещинская Т. Б. Электроснабжение сельского хозяйства / Т. .Б Лещинская, И. В. Наумов. – М.: БИБКОМ, ТРАНСЛОГ, 2015. 656 с.

11. Кучеренко Д. Е. Комбинированное устройство компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя и его подсушки в технологической паузе, как элемент его системы подсушки в технологической паузе / Д. Е. Кучеренко, В. В. Тропин // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2015 год./ – Краснодар: ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», 2016. – С. 47-49.

12. Винников А. В. Анализ энергетических характеристик устройств плавного пуска асинхронных двигателей сельскохозяйственного назначения / А. В. Винников, А. В. Масенко, В. В. Тропин // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XXXVII сессии семинара по тематике «Электроснабжение». / – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2016. – С. 295-298.

13. Кучеренко Д. Е. Устройство компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя, как элемент его системы подсушки в технологической паузе / Д. Е. Кучеренко, В. В. Тропин // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко. / – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. – С. 560-561.

14. Савиных В. В. Особенности выбора коммутаторов для силовых конденсаторов / В. В. Савиных, В. В. Тропин // Известия ЮФУ. Технические науки, № 1 (126), 2012 – С. 243-245.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kopylov G. A. Snizheniye poter' v setyakh 0,38 kV [Reduction of Losses in 0.38 kV] / G. A. Kopylov. // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya s.kh. [Mechanization and Electrification of agriculture]. 1985, No. 11. P.53-54. [In Russian]

2. Savinykh V. V. Sintez algoritma upravleniya kompensatora toka nulevoy posledovatel'nosti [Synthesis of Control Algorithm of a Zero-sequence Current Compensator] / V. V. Savinykh, V. V. Tropin // Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiy universitet (NPI) imeni M.I. Platova (Novocherkassk): Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov (Novocherkassk): News of Higher Educational Institutions. Electromechanics] No. 3, 2012 – P. 60-63. [In Russian]

3. Korolev Yu. P. O nadozhnosti elektrosnabzheniya sel'skikh potrebiteley. Po materialam zasedaniya byuro Otdeleniya mekhanizatsii, elektrifikatsii i avtomatizatsii Rossel'khozakademii [On Reliability of Power Supply to Rural Consumers. According to Materials of Meeting of the Bureau of the Department of Mechanization, Electrification and Automation of the Russian Agricultural Academy / O. P. Korolev] // Tekhnika v sel'skom khozyaystve [Technique in Agriculture]. 2000, No. 6. P.33,34. [In Russian]

4. Vinnikov A. V. Ustroystvo kompensatsii reaktivnoy moshchnosti asinkhronnogo dvigatelya, kak element yego sistemy podsushki v tekhnologicheskoy pauze [Device for Reactive Power Compensation of Asynchronous Engine as Element of Its Drying System in Technological Pause] / A. V. Innikov, D. E. Kucherenko, V. V. Tropin // Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov KHKHKHVII sessii seminara po tematike «Elektrosnabzheniye». [Cybernetics of energy systems: collection of materials on the XXXVII session of the Electric Power Supply Workshop] / – Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, 2016. – P. 47-49. [In Russian]

5. Demirchan K. S. Reaktivnaya moshchnost' na sluchay nesinusoidal'nykh funktsiy. Ortomoshchnost' [Reactive Power in Case of Non-sinusoidal Functions. Ortho-power] / K. S. Demirchan // Izv.RAN. Energy 992. No.1. P.15-38. [In Russian]

6. Drekhsler R. Izmereniye i otsenka kachestva elektroenergii pri nesimmetrichnoy i nelineynoy nagruzke [Measurement and Evaluation of Quality of Electricity with Asymmetric and Nonlinear Load] / R. Drechsler. – M.: Enegoatomizdat, 1985. 112 p. [In Russian]

7. Tropin V. V. Analiz svyazi parametrov seti c pokazatelyami kachestva elektroenergii [Connection Analysis of Network Parameters with Electric Power Quality Indicators] / V. V. Tropin, A. V. Savenko, V. A. Perepechin // Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiy universitet (NPI) imeni M.I. Platova (Novocherkassk): Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (Novocherkassk): News of higher educational institutions. Electromechanics], No. 5, 2005 – P. 16-18. [In Russian

8. Savinykh V. V. Avtonomnyy stend dlya otsenki neobkhodimosti kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v seti 0,4 kv s neytral'yu [Autonomous Stand for Assessing Need for Compensation of Reactive Power in 0.4 kV Network with Neutral] / V. V. Savinykh, V. V. Tropin // Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiy universitet (NPI) imeni M. I. Platova (Novocherkassk): Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (Novocherkassk): News of higher educational institutions. Electromechanics], No. 2, 2012 – P. 45-46. [In Russian]

9. Ukazaniya po proyektirovaniyu ustanovok kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh obshchego naznacheniya promyshlennykh predpriyatiy [Guidelines for Design of Reactive Power Compensation Installations in Electrical Networks of General-purpose Industrial Enterprises] – M.: OJSC "VNIPI Tyazhpromelektroproekt", 2003 [In Russian]

10. Leschinskaya T. B. Elektrosnabzheniye sel'skogo khozyaystva [Power Supply of Agriculture] / T. B Leschinskaya, I. V. Naumov. – M.: BIBKOM, TRANSLOG, 2015. 656 p. [In Russian]

11. Kucherenko D. E. Kombinirovannoye ustroystvo kompensatsii reaktivnoy moshchnosti asinkhronnogo dvigatelya i yego podsushki v tekhnologicheskoy pauze, kak element yego sistemy podsushki v tekhnologicheskoy pauze [Combined Device for Reactive Power Compensation of Induction Motor and Its Drying in Technological Pause, as Element of Its Drying System in Technological Pause] / D. E. Kucherenko, V. V. Tropin // Nauchnoye obespecheniye agropromyshlennogo

kompleksa: Sbornik statey po materialam 71-y nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley po itogam NIR za 2015 god [Scientific Support of Agro-industrial Complex: Collected Articles on Materials of the 71st Scientific-Practical Conference of Teachers on Basis of Research in 2015] / – Krasnodar: Kuban State Agrarian University, 2016. – P. 47-49. [In Russian]

12. Vinnikov A. V. Analiz energeticheskikh kharakteristik ustroystv plavnogo puska asinkhronnykh dvigateley sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Analysis of Energy Characteristics of Devices for Smooth Start-up of Asynchronous Engines for Agricultural Purposes] / A. V. Vinnikov, A. V. Masenko, V. V. Tropin // Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov KHKHKHVII sessii seminara po tematike «Elektrosnabzheniye» [Cybernetics of Energy Systems: Collection of Materials of the XXXVII Session of the Seminar on "Power supply"] / – Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, 2016. – P. 295-298. [In Russian]

13. Kucherenko D. E. Ustroystvo kompensatsii reaktivnoy moshchnosti asinkhronnogo dvigatelya, kak element yego sistemy podsushki v tekhnologicheskoy pauze [Device for Compensation of Reactive Power of Induction Motor as Element of Its Drying System in Technological Pause] / D. E. Kucherenko, V. V. Tropin // Nauchnoye obespecheniye agropromyshlennogo kompleksa: Sbornik statey po materialam KH Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 120-letiyu I. S. Kosenko. [Scientific Support of the Agro-industrial Complex: Collection of Articles on Materials of the 10th All-Russian Conference of Young Scientists Dedicated to the 120th anniversary of I. S. Kosenko] / – Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 2017. – P. 560-561. [In Russian]

14. Savinykh V. V. Osobennosti vybora kommutatorov dlya silovykh kondensatorov [Features of Choice of Switchboards for Power Capacitors] / V. V. Savinykh, V.V. Tropin // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki, [Izvestiya SFU. Engineering science], No. 1 (126), 2012 – P. 24 [In Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.020

ОБЗОР ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА STARLINK

Научная статья

Миронова Э.Ю. *
ORCID: 0000-0001-8687-9674,
Колледж инфраструктурных технологий Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

* Корреспондирующий автор (emiron93[at]yandex.ru)

Аннотация

В настоящее время технологии беспроводной связи быстро развиваются, в частности технологии глобального беспроводного доступа – спутниковая связь. В начале 2018 года в феврале компания SpaceX анонсировала свой инновационный проект по организации системы спутниковых созвездий Starlink. Данный проект принято просто называть «космическим интернетом» или «космическим Wi-Fi». В ходе исследования выясним насколько близки к истине такие названия, а также рассмотрим организацию спутниковой системы, радиопокрытие спутников, возможные проблемы и применение.

Ключевые слова: Starlink, SpaceX, OneWeb, глобальный интернет, спутниковая система, LEO, VLEO.

OVERVIEW OF STARLINK – WIRELESS ACCESS GLOBAL NETWORK

Research article

Mironova E.Yu *.
ORCID: 0000-0001-8687-9674,
College of infrastructure technologies of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

* Corresponding author (emiron93[at]yandex.ru)

Abstract

Currently, wireless technologies are rapidly developing, in particular, global wireless access technologies – satellite communications. SpaceX has announced its innovative project on the organization of the Starlink satellite constellation system at the beginning of 2018, in February. This project is called the "space Internet" or "space Wi-Fi." During the course of the study, we will find out how close are these name to the current situation, and also consider the organization of the satellite system, satellite radio coverage, possible problems, and applications.

Keywords: Starlink, SpaceX, OneWeb, global Internet, satellite system, LEO, VLEO.

Введение

Starlink – это инновационный проект спутниковой системы на околоземной орбите, разрабатываемый частной компанией SpaceX, основателем которой является Илон Маск. Данная спутниковая система предназначена для обеспечения жителей всей планеты беспроводным доступом к дешевому и высокоскоростному спутниковому интернету. Система предназначена для предоставления широкого спектра широкополосных и коммуникационных услуг для жилых, коммерческих, институциональных, правительственных и профессиональных пользователей по всему миру.

Организация спутниковой системы

22 февраля 2018 года в 17 часов 17 минут по московскому времени компания SpaceX приступила к выполнению испанской миссии PAZ, где они с военной базы Vandenberg вывели на орбиту спутник наблюдения Земли, а также, в качестве дополнительной нагрузки два спутника Microsat-2a и Microsat-2b. Эти спутники являются прототипами, тестовыми спутниками проекта Starlink, которые отделились от ракеты-носителя на высоте 511 км и начали тестирование своих антенн посредством передачи телеметрии, тестовых пакетов данных, а также видеотрансляции с борта. В течение полугода эти спутники должны набрать высоту до 1125 км, провести тестирование и затем сойти с орбиты по рассчитанной траектории. Следовательно, их нельзя причислить к рабочей группе спутников проекта Starlink.

Всего в спутниковой системе проекта Starlink должно быть задействовано около 12 тысяч спутников, в первую очередь SpaceX будет выводить рабочую группу из 4425 спутников LEO на высоту от 1,110-1,325 км на 83 орбитальные плоскости, которые будут вещать в K_a («above» от 26,5-40 ГГц) и K_u («under» от 12 -18 ГГц) диапазонах (К-диапазон 18-26,5 ГГц). Кроме того, в систему так же входит связанные с ними наземные средства управления, наземные станции шлюза и наземные станции конечного пользователя (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Характеристики созвездия системы спутников первой рабочей группы

СОЗВЕЗДИЕ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВ SPACEX					
Параметр	Первоначальное развертывание (1600 спутников)	Окончательное развертывание (2825 спутников)			
Количество орбитальных плоскостей	32	32	8	5	6
Количество спутников	50	50	50	75	75
Высота, км	1,150	1,110	1,130	1,275	1,325
Наклон º	53	53,8	74	81	70

Технические характеристики будущих спутников в настоящее время неизвестны. А именно мощность и количество антенн на аппаратах, поэтому не стоит ожидать скоростей более 100 Мбит/с, к тому же пропускная способность данных со спутников будет фиксированной из-за этого будет труднее обслуживать большое количество абонентов. Поэтому в первое время Starlink будут пользоваться в основном путешественники, люди, которые проживают в отдаленных регионах и с низкой плотностью населения [1].

Радиопокрытие спутниковой системы

Для густонаселенных территорий вводится вторая группировка в 7518 спутников VLEO, которая будет выведена на низкую околоземную орбиту, где высота составляет 340 км. Эти спутники будут работать в более скоростном V-диапазоне (полоса частот от 40 ГГц до 75 ГГц) для густонаселенных городов, где заявленная скорость передачи будет достигать 1 Гбит/с.

Конфигурация созвездия VLEO (SpaceX определяет, как V-band Low Earth Orbit) рассчитана в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики созвездия системы спутников второй рабочей группы

Количество спутников	2547	2478	2493
Высота, км	345,6	340,8	335,9
Наклон в градусах	53	48	42

Система SpaceX будет использовать усовершенствованные технологии формирования лучей фазированной решетки и цифровой обработки данных на борту каждого спутника, чтобы эффективно использовать и гибко распределять ресурсы спектра частот с другими пользователями сети на основе космических и наземных лицензий. Технологии с фазированной решеткой будут использоваться на пользовательских терминалах системы, чтобы можно было использовать высоконаправленные и управляемые антенные лучи, которые отслеживают спутники системы. Те же технологии с фазированной решеткой на земных станциях шлюза будут генерировать пучки с высоким коэффициентом усиления для связи с несколькими спутниками внутри созвездий с одного узла шлюза. Система также будет использовать оптические межспутниковые линии связи для бесперебойного управления сетью и непрерывности обслуживания, одновременно сводя к минимуму охват спектра всей системы и облегчая совместное использование спектра с другими космическими и наземными системами [1].

Работая на высоте 1110 км и более при наклонах от 53 до 70 градусов, спутники в созвездии LEO будут иметь относительно больший след с узкими пятнами, покрывающими относительно широкую зону обслуживания (около 4,5 млн км^2). Поскольку созвездие VLEO работает примерно на одну треть от высоты созвездия LEO, его спутники будут охватывать менее одной десятой площади лучей созвездия LEO, но отображаться будет в одну и ту же сетку (см. рисунок 1).

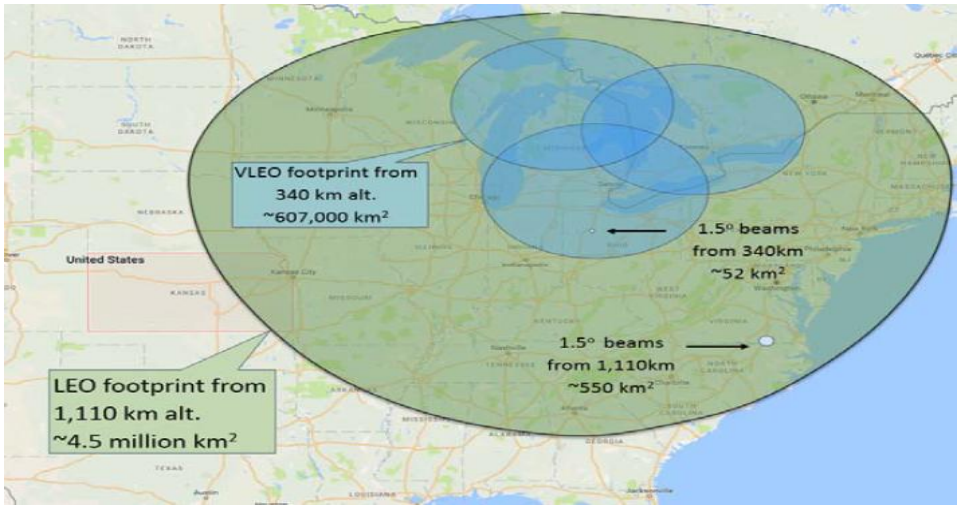


Рис. 1 – Сравнительный охват LEO и спутникового следа VLEO

Наземные технологии связи со спутниковой системой

Расширенные технологии формирования фазированной решетки и цифровой обработки данных в спутниковой полезной нагрузке дают системе возможность высокоэффективного использования ресурсов спектра Ku- и Ka-диапазона и гибкость для обмена этим спектром с другими лицензированными пользователями. Пользовательские терминалы, работающие с системой SpaceX, будут использовать аналогичные технологии с фазированной решеткой, позволяющие использовать высоконаправленные, управляемые антенные лучи, которые отслеживают спутники на низкой околоземной орбите.

На терминале доступа будет применяться фазированная антенная решетка для быстрого переключения с одного спутника на другой, поэтому для переключения абонента понадобится всего лишь несколько миллисекунд. Но данный терминал, скорее всего, будет весьма немалых габаритов в лучшем случае размером со среднестатистический ноутбук. Стоить такой прибор так же будет немало, по предварительной информации от 100-300$. К примеру, можно привести аналогичный терминал компании OneWeb, которая так же занимается подобным проектом. Обе компании работают отдельно друг от друга и являются прямыми конкурентами.

Изменения в планах

По плану SpaceX компания должна приступить к реализации проекта Starlink в 2019 году, начав выводить на орбиту рабочую группировку первой фазы. Однако, профессор Марк Хэндли из Университетского колледжа Лондона произвел расчет орбит спутников на основе данных от SpaceX и смоделировал спутниковую систему (см. рисунок 2), состоящую из трех основных рабочих групп (фаз). Также вычислил необходимое количество спутников для успешного и прибыльного функционирования на околоземной орбите, что может составить лишь треть от планируемого числа – 4425 спутников. Кроме того, данная модель имитировала передачу сигнала из одной точки мира в другую, где задержка сигнала в среднем не превышала 90 миллисекунд.

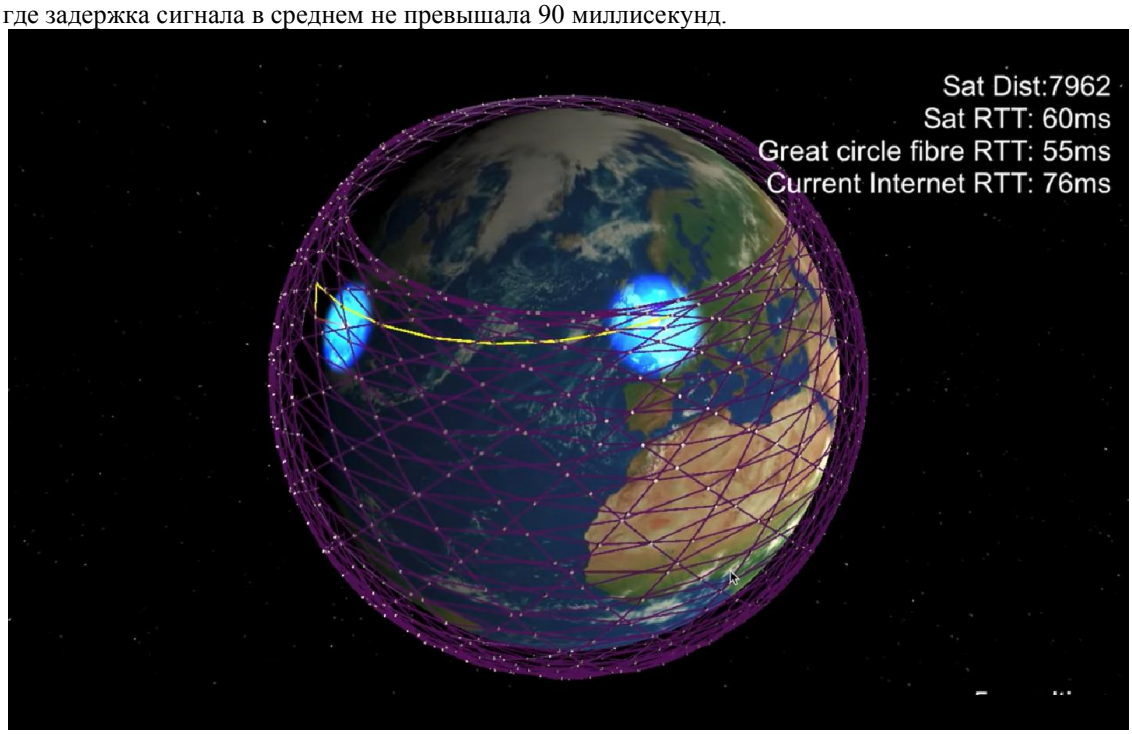


Рис. 2 – Моделирование спутниковой системы Starlink, пример процесса установления соединения и передачи данных

Марк Хэндли утверждает, что «Сеть будет иметь очень хорошую связь на больших расстояниях с малыми задержками, как, например, при отправке сообщений. Это очень важно для банков и подобных компаний, которые всегда хотят очень быстро получать информацию. Они платят большие деньги за создание сетей, зачастую, частным, а не обычным коммерческим провайдерам. Даже с первой фазой в 1600 спутников у SpaceX будут большие доходы» [5], [6].

Кроме того, по полученным данным от спутников-прототипов, компания SpaceX 8 ноября 2018 года решила сократить высоту орбиты для первой рабочей группировки спутников до 550 км и с углом наклона в 25º. Такие изменения могут повлечь за собой выгоды в том отношении, что будет расходоваться меньше топлива для подъёма на орбиту «вставки» спутников (300-350 км). Функционирование на более низкой высоте увеличивает надежность, уменьшая интенсивность потока излучения, и уменьшает шанс столкновения в переполненных 550-1,150-километровых орбитах LEO, кроме того на орбитах ниже 650 км благодаря притяжению Земли и солнечному ветру, потенциальный космический мусор будет постепенно падать и сгорать в плотных слоях атмосферы Земли. Это решение также позволяет уменьшить задержку передачи сигнала, что увеличивает скорость передачи данных, правда в ущерб области радиопокрытия [4].

Заключение

Проект пока не вступил на этап реализации, и по мере приближения к данному этапу, проект будет дорабатываться, так как будут появляться новые идеи, данные, проблемы и решения. Вполне вероятно, что изменится численность спутников, высота орбиты, а вместе с этим параметры антенн. Когда запустят спутниковый интернет Starlink, однозначно сказать нельзя, но при успешной реализации проекта может измениться многое в отношении применения спутниковых технологий для передачи данных и осуществления связи. Однако, даже при успешной

реализации проекта могут возникнуть проблемы при внедрении данной технологии в различные страны. А именно в отношении получения лицензии на предоставление услуг широкополосного интернета.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Albulet M. Spacex v-band non-geostationary satellite system: attachment a. technical information to supplement schedule s / M. Albulet. – SPACE Exploration Technologies Corp., 2017. - 60с.;

2. Musk E. Becoming a Multiplanet Species [video]. 68th annual meeting of the International Astronautical Congress in Adelaide / Musk E., Australia: SpaceX

3. Fresh FCC Filing for Starlink Satellite Constellation. [Электронный ресурс] Reddit.com: URL: https://www.reddit.com/r/spacex/comments/9vek5n/fresh_fcc_filing_for_starlink_satellite/ (дата обращения: 19.11.2018)

4. Кинякина Е. Зачем Илону Маску менять орбиту космического интернета. [Электронный ресурс] Forbes.ru: Технологии / Е. Кинякина URL: http://www.forbes.ru/tehnologii/369027-zachem-ilonu-masku-menyat-orbitu-kosmicheskogo-interneta (дата обращения 15.11.2018

5. Спутниковый интернет Starlink от SpaceX – «лицензия для печати денег». [Электронный ресурс] habr.com: URL: https://habr.com/post/429658/ (дата обращения 21.11.2018)

6. Starlink network topology simulation & predictions. [Электронный ресурс] Reddit.com: URL: https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/9sxr3c/starlink_network_topology_simulation_predictions/e8uz76s/ (дата обращения: 21.11.2018)

7. William M. Wilthshire. Application for Fixed Satelite Service by Space Exploration Holdings / M. William [Электронный ресурс] fcc.report: URL: https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083 (дата обращения: 21.11.2018)

8. Coppock M.. FCC approves OneWeb's low latency internet satellite network for remote areas / M. Coppock [Электронный ресурс] digitaltrends.com: URL: https://www.digitaltrends.com/computing/oneweb-high-speed-internet-satellite/ (дата обращения: 22.11.2018)

9. Полое оптоволокно позволяет снизить задержку распространения сигнала [Электронный ресурс] habr.com: URL: https://habr.com/post/174225/(дата обращения: 22.11.2018)

10. Handley M. Changes to Starlink phase 1, from FCC filling / M. Handley, 8th Nov 2018[video]. youtube.com: URL: https://www.youtube.com/watch?v=QEIUdMiColU (дата обращения: 22.11.2018)

Список литературы на английском/ References in English

1. Albulet M. Spacex v-band non-geostationary satellite system: attachment a. technical information to supplement schedule s / M. Albulet. – SPACE Exploration Technologies Corp., 2017. - 60с.;

2. Musk E. Becoming a Multiplanet Species [video]. 68th annual meeting of the International Astronautical Congress in Adelaide / Musk E., Australia: SpaceX

3. Fresh FCC Filing for Starlink Satellite Constellation. [Electronic resource] Reddit.com: URL: https://www.reddit.com/r/spacex/comments/9vek5n/fresh_fcc_filing_for_starlink_satellite/ (date of the address19.11.2018

4. Kinyakina E. Zachem Ilonu Masku menyat' orbitu kosmicheskogo interneta [Why to Elon Musk to change an orbit of the space Internet]. / Kinyakina E.[Electronic resource] Forbes.ru: Technology/Elon Musk URL: http://www.forbes.ru/tehnologii/369027-zachem-ilonu-masku-menyat-orbitu-kosmicheskogo-interneta (accessed: 15.11.2018) [in Russian]

5. The satellite Internet of Starlink from SpaceX - "the license for printing of money". [Electronic resource] habr.com: URL: https://habr.com/post/429658/(accessed: 21.11.2018)

6. Starlink network topology simulation & predictions. [Electronic resource] Reddit.com: URL: https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/9sxr3c/starlink_network_topology_simulation_predictions/e8uz76s/ (accessed: 21.11.2018

7. William M. Wilthshire. Application for Fixed Satelite Service by Space Exploration Holdings / M. William [Electronic resource] fcc.report: URL: https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083 (accessed: 21.11.2018)

8. Coppock M. FCC approves OneWeb's low latency internet satellite network for remote areas / M. Coppock [Electronic resource] digitaltrends.com: URL: https://www.digitaltrends.com/computing/oneweb-high-speed-internet-satellite/ (accessed: 22.11.2018

9. Hollow optical fiber allows to lower propagation delay of a signal [Electronic resource] of habr.com: URL: https://habr.com/post/174225/(accessed: 22.11.2018

10. Handley M. Changes to Starlink phase 1, from FCC filling / M. Handley, 8th Nov 2018[video]. youtube.com: URL: https://www.youtube.com/watch?v=QEIUdMiColU (accessed: 22.11.2018)

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВОКЗАЛА СРЕДСТВАМИ ANYLOGIC

Научная статья

Елуферьева Ю.С.[1], Пальмов С.В.[2, *]

[1, 2] Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия;
[2] Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

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

Аннотация

Авторы статьи демонстрируют возможности имитационного моделирования на примере системы AnyLogic PLE. С этой целью была построена модель процесса билетно-кассового обслуживания железнодорожного вокзала. Поставлена серия экспериментов, направленных на исследование свойств созданной модели и сбора статистической информации. Далее был проведен анализ полученных результатов и выработаны рекомендации относительно модернизации моделируемого процесса. AnyLogic PLE проявил себя как эффективное средство разработки, анализа и оптимизации моделей процессов.

Ключевые слова: моделирование, имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, моделирование бизнес-процессов, AnyLogic.

SIMULATION OF RAILWAY STATION OPERATION USING ANYLOGIC MEANS

Research article

Elufereva Yu.S.[1], Palmov S.V.[2, *]

[1, 2] Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia;
[2] Samara State Technical University, Samara, Russia

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

Abstract

The authors of the article describe the simulation capabilities on the example of the AnyLogic PLE system. A model of the ticket and cash service process for the railway station was built for that. A series of experiments aimed at studying the properties of the developed model and collecting statistical information was set up. Then, the analysis of the results was carried out, and recommendations were made regarding the modernization of the process being modeled. AnyLogic PLE proved to be an effective tool for developing, analyzing and optimizing process models.

Keywords: modeling, simulation modeling, discrete-event simulation, simulation of business processes, AnyLogic.

Преобладающая часть населения прибегает к использованию железнодорожного транспорта для передвижения на дальние расстояния. Бесперебойная работа железнодорожного вокзала зависит от слаженного взаимодействия всех его подразделений. Следовательно, необходимость обладания четким представлением об эффективности функционирования вокзала является актуальным вопросом. Поскольку железнодорожный вокзал представляет собой сеть сложных взаимосвязанных процессов, для рассмотрения механизмов работы лучше использовать информационные технологии. Предпочтительнее всего для решения этой задачи, на взгляд авторов, подходит имитационное моделирование.

Цель работы была сформулирована следующим образом: построить имитационную модель железнодорожного вокзала и провести ее анализ. Это позволит выявить возможные пути повышения эффективности процессов предметной области.

Имитационное моделирование - мощный инструмент анализа деятельности человека в самых разнообразных областях. Существуют и другие «универсальные» методы моделирования, например [1, С. 265], однако они проигрывают имитационному, поскольку последнее позволяет получить качественные и количественные оценки возможных последствий принятия тех или иных решений [2]. Одним из средств имитационного моделирования является программное обеспечение компании The AnyLogic Company – AnyLogic. Отличительной его особенностью является наличие бесплатной версии для начинающих и студентов (PLE), которая, несмотря на ограничения, обладает серьезным функционалом [3], что делает возможным ее использование в учебном процессе [4].

Железнодорожный вокзал предназначен для быстрого, безопасного и качественного обслуживания пассажиров. Для них вокзал предоставляет следующие услуги: обеспечение посадки и высадки для пассажиров дальнего и пригородного сообщения; информационно-справочное обслуживание; организация пребывания в залах ожидания и в комнатах матери и ребенка; услуги носильщиков; услуги камер хранения; оформление провоза дополнительной ручной клади; оформление перевозки корреспонденции; оформление перевозки транспортного средства; оформление перевозки крупногабаритного багажа и другие услуги.

На основании изученной информации о деятельности железнодорожного вокзала, выделим его основные бизнес-процессы [5]:

1. Составление расписания.

Технологи для составления графика опираются на основные его элементы: время хода поездов различных категорий по перегонам; продолжительность стоянки поездов на станциях для выполнения технических, грузовых и пассажирских операций; станционные интервалы; интервалы между поездами в пакете; время нахождения локомотивов на станциях локомотивного депо и в пунктах оборота. Данные сводятся в единый график движения поездов, после чего все сведения формируют в таблицы для выведения на информационное табло.

2. Информационно-справочное обслуживание.

Дежурный по выдаче справок производит поиск нужной информации в системе и предоставляет ответ пассажиру на интересующий вопрос. Для удобства пассажиров выводят на табло информацию об отправлении, прибытии поездов и об их опоздании. Так же производится информирование пассажиров с помощью звуковой информации о прибытии или отправлении поездов, передачи различных объявлений и сообщений.

3. Билетно-кассовое обслуживание.

Билетный кассир для пассажира производит поиск рейсов и сообщает время ближайшего электропоезда/поезда в нужном направлении, сообщает о стоимости билета и информирует о существующих льготах и т.д. После согласования с пассажиром по всем пунктам происходит оформление билета. Так же в кассе можно обменять контрольный купон электронного билета на проездные документы примерно за 30-60 минут до отправления поезда. Для этого в кассе предоставляется номер заказа контрольного купона электронного билета и документы, подтверждающие личность. В кассах имеется услуга по оформлению электронных багажных квитанций для перевозки мелких домашних животных.

4. Заказ электронного билета.

Пассажир заходит на сайте в раздел «Покупка билетов». Вводит в предлагаемую форму станцию отправления и конечную станцию. Так как заказать электронный билет можно за 45 дней, пассажир находит нужное число в этом интервале, выбирает дату и заполняет поля с личной информацией для покупки билета. Если пассажиру нужно несколько билетов, в таблице «информация о пассажирах» можно заказать билеты еще на 3 человек, не считая вас. После оплаты заказ появляется в колонке «Мои заказы». Пассажир может его увидеть там, открыть, распечатать бланк заказа, а также скопировать его на планшет или мобильный телефон или же записать номер заказа, состоящий из 14 цифр.

1. Перевозка крупногабаритного багажа и корреспонденции.

Железнодорожные вокзалы предоставляют услуги по перевозке крупногабаритного багажа. Сотрудник центра производит замер багажа/корреспонденции/транспортного средства в присутствии отправителя. После измерения груза сотрудник центра дает отправителю на заполнение заявление на оказание перевозки грузобагажа на особых условиях.

2. Хранение ручной клади в камерах.

Кладовщик осуществляет прием материальных ценностей на склад, производит их осмотр и взвешивание. Он выдает пассажиру чек, квитанцию или жетон и перемещает материальные ценности к местам хранения.

3. Расформирование и формирование поездов.

Получая телеграммы – натурные листы на прибывающие поезда, маневровый диспетчер устанавливает, в каких из них имеются замыкающие группы, завершающие накопление составов отдельных назначений на путях сортировочного парка, и регулирует с учетом этого очередность расформирования составов на горке. С учетом максимального совмещения процессов расформирования и формирования он дает также указания дежурному по горке и маневровым бригадам о порядке расформирования и формирования поездов.

4. Ремонт составов.

Если при техническом обслуживании и коммерческом осмотре состава маневровая бригада выявила неисправные вагоны, требующие отцепочного ремонта или вагоны с коммерческим браком, то бригада отправляет вагон в ремонтное депо. Вагоны, не требующие отцепочного ремонта, ремонтируют ремонтные бригады прямо на станциях. Они устраняют все неисправности, угрожающие безопасности движения.

В соответствии с информации представленной выше авторы статьи решили продемонстрировать возможности данного программного обеспечения, построив имитационную модель билетно-кассового обслуживания железнодорожного вокзала и проведя серию экспериментов по ее модернизации.

Для создания модели билетно-кассового обслуживания будет использована библиотека Process Modeling Library, которая поддерживает дискретно-событийный подход. Он позволяет рассмотреть процессы более детально, благодаря чему можно проанализировать их работу и выявить «узкие» места в системе. Данные используемые для создания модели были взяты из открытых источников [5], [6].

В модели (рис. 2) в качестве агента выступает «Пассажир». [7]. Для более детального рассмотрения операций процесса будем использовать единицы времени «минуты» [8], [9]. Моделируемый отрезок – один рабочий день (1440 мин.).

В итоге, была построена модель состоящая из 18 элементов, включая два блока ресурсов (рис. 2, слева внизу), задающих число кассиров и показывающих их загруженность. Для сбора и визуализации статистики модели использовались четыре блока «Данные гистограммы» (рис. 2, вверху).

Настройки модели «Билетно-кассовое обслуживание» представлены в табл. 1-6 [10].

Таблица 1 – Сведения для блока «Source»

Интенсивность прибытия, чел\мин.	Название агента
5	Пассажир

Таблица 2 – Значения вероятностей для блоков «SelectOutput»

Название блока	Значение вероятности
Выбор_Действия	0,8 (покупка в кассе)
Выбор_Кассы	0,6 (пригородный поезд)

Таблица 3 – Сведения для блоков «Queue»

Название блока	Вместимость, чел	Таймаут, мин
Кассы_Пригородного_Следования	150	25
Кассы_Дальнего_Следования	65	30
Для_Печати_Электронных_Билетов	5	0

Таблица 4 – Сведения для блоков «Seize»

Название блока	Название ресурса	Количество ресурсов, чел.	Вместимость, чел.
Seize	Кассир_Пригородный	10	10
Seize1	Кассир_Дальнего_Следования	5	5

Таблица 5 – Сведения для блоков «Delay»

Название блока	t_{min}, мин.	$t_{ср}$, мин.	t_{max}, мин.	Вместимость, чел.
Покупка_билета	1	1,5	2	10
Покупка_билета1	1	3	6	5
Печать_Билета	0,5	1	1,5	5

Таблица 6 – Сведения для блоков «ResourcePool»

Имя переменной модели	Количество, чел.
Кассир_Пригородный	10
Кассир_Дальнего_следования	5

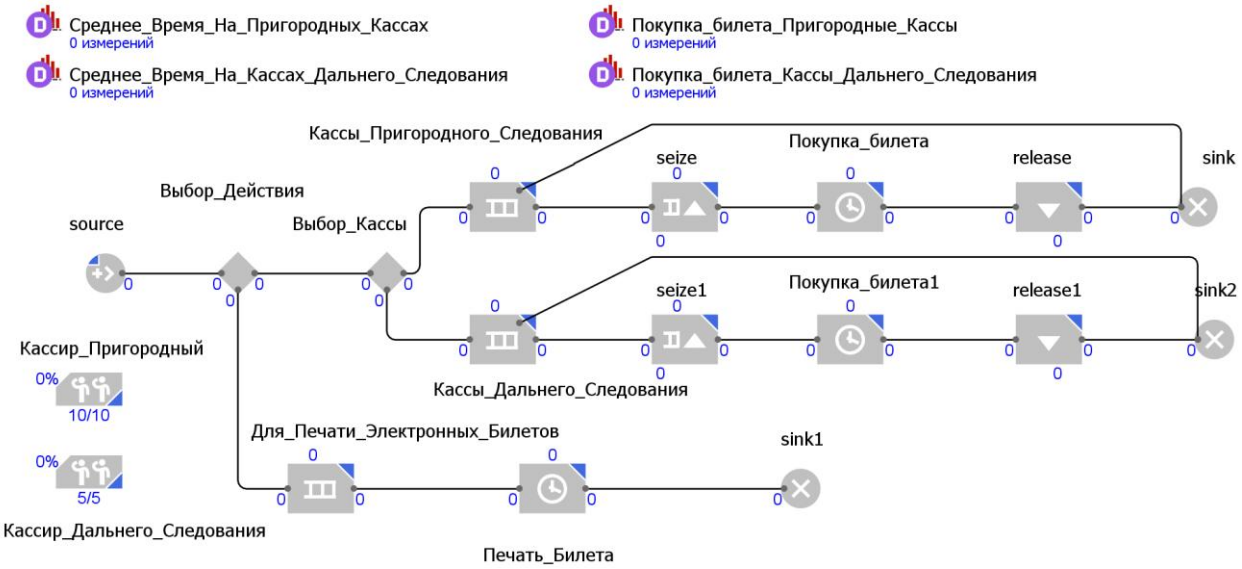


Рис. 2 – Модель процесса «Билетно-кассовое обслуживание»

После прогона модели (рис. 3), можно увидеть, что из очереди дальнего следования уходят без билета около двух процентов людей, по причине нехватки функционирующих касс. Кассиры дальнего следования задействованы на 99%. Однако на кассах пригородного сообщения этот показатель составляет всего 36%.

Данные гистограммы показывают, что среднее время потраченное на кассах пригородного сообщения составляет 1,5 минуты (табл. 7), а на кассах дальнего следования – 21,5 минут (табл. 8). При этом большее число людей попадает в промежуток обслуживнаия от 1,4 до 1,6 минуты на пригородных кассах – около 37% , и в промежуток от 13,9 до 20,3 минут на дальних кассах – около 27%. Кроме того, среднеквадратическое отклонение на кассах дальнего следования составляет 8,8, а на пригородных кассах всего 0,2.

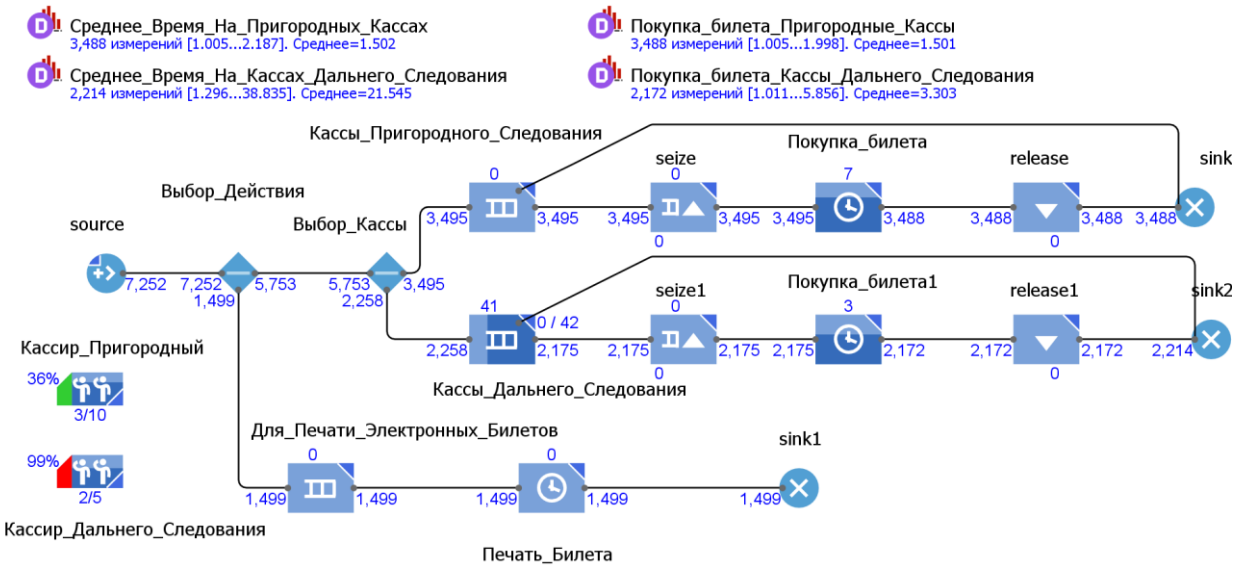


Рис. 3 – Модель «Билетно-кассовое обслуживание». Результат единичного прогона

Таблица 7 – Данные гистрограммы «Среднее_Время_На_Пригородных_Кассах»

Количество		3488	
Среднее		1,502	
Мин.		1,005	
Макс.		2,187	
Среднеквадр. отклонение		0,203	
Доверит. интервал для среднего		0,007	
Сумма		5238,233	
От	До	Плотность вероятности	Функция распределения
1	1,2	282	282
1,2	1,4	799	1081
1,4	1,6	1295	2376
1,6	1,8	841	3217
1,8	2	270	3487
2	2,2	1	3488

Таблица 8 – Данные гистрограммы «Среденее_Время_На_Кассах_Дальнего_Следования»

Количество		2214	
Среднее		21,545	
Мин.		1,296	
Макс.		38,835	
Среднеквадр. отклонение		8,762	
Доверит. интервал для среднего		0,365	
Сумма		47700,975	
От	До	Плотность вероятности	Функция распределения
1,1	7,5	143	143
7,5	13,9	293	436
13,9	20,3	605	1041
20,3	26,7	466	1507
26,7	33,1	428	1935
33,1	39,5	279	2214

В то же время, среднее время приобретения билета на пригородных кассах составляеть 1,5 минуты (табл. 9), а на кассах дальнего следования – 3,3 минуты (табл. 10). Больше всего пассажиров, приобретающих билеты в пригородной кассе, попадают в интервал от 1,4 до 1,5 минут – около 18%. Минимальное количество людей попадают в интервал от 1,9 до 2 минут – около 1,6%. На кассах дальнего следования наибольшее число пассажиров попадают в промежуток от 2,7 до 3,5 минут – около 29 %, а наименьшее число попадают от 0,3 до 1,1 минут – 0,1%.

Таблица 9 – Данные гистрограммы «Покупка_билета_Пригородные_Кассы»

Количество		3488	
Среднее		1,501	
Мин.		1,005	
Макс.		1,998	
Среднеквадр. отклонение		0,202	
Доверит. интервал для среднего		0,007	
Сумма		5234,683	
От	До	Плотность вероятности	Функция распределения
1	1,1	78	78
1,1	1,2	205	283
1,2	1,3	312	595
1,3	1,4	492	1087
1,4	1,5	650	1737
1,5	1,6	645	2382
1,6	1,7	484	2866
1,7	1,8	356	3222
1,8	1,9	211	3433
1,9	2	55	3488

Таблица 10 – Данные гистрограммы «Покупка_билета_Кассы_Дальнего_Следования»

Количество		2172	
Среднее		3,303	
Мин.		1,011	
Макс.		5,856	
Среднеквадр. отклонение		1,045	
Доверит. интервал для среднего		0,044	
Сумма		7174,541	
От	До	Плотность вероятности	Функция распределения
0,3	1,1	3	3
1,1	1,9	208	211
1,9	2,7	444	655
2,7	3,5	634	1289
3,5	4,3	469	1758
4,3	5,1	290	2048
5,1	5,9	124	2172

Опираясь на полученные сведения, делаем вывод, что необходимо обеспечить эффективность касс дальнего за счет увеличения штата работников, модернизации аппаратного и программного обеспечения для сокращения времени обслуживнаия клиентов. Таким образом, увеличив штат на 1 единицу рабочей силы, эффектиность касс возрастает и все пассажиры приобретают билеты. Среднее время проведенное на кассах дальнего следования равняется 4,7 минутам, а процент использования снизится до 87. Рекомендуется одного из кассиров с пригородного сообщения переориентировать на кассы дальнего следования. В то же время на кассах пригородного сообщения можно сократить штат сотрудников до 5, при этом функциональность касс останется неизменной, однако среднее время на кассах увеличится с 1,5 до 1,7 минут. Процент использования пригородных кассиров возрастет до 72, что означает их большую занятость (рис. 4). Однако при этом время затраченое только на покупку билета в кассе остается в тех же рамках, что и раньше. Покупка билета в пригородной кассе находится в промежутке от 1 до 1,9 минут, а в кассах дальнего следования от 1 до 5,9 минут.

При увеличении числа прибывающих хотя бы на 1 человека в минуту снова происходит переполнение очереди на кассах дальнего следования, кассиры не успевают обслужить всех пассажиров, из-за чего следует вывод, что необходимо сократить время обслуживания клиентов и увеличить количество единиц штата. При прибытии 6 человек в минуту для обслуживания всех пассажиров на кассах дальнего следования состав команды кассиров должен состоять из 7 человек, при таком соотношении люди не уходят без билета из-за долгого ожидания в очереди [11].

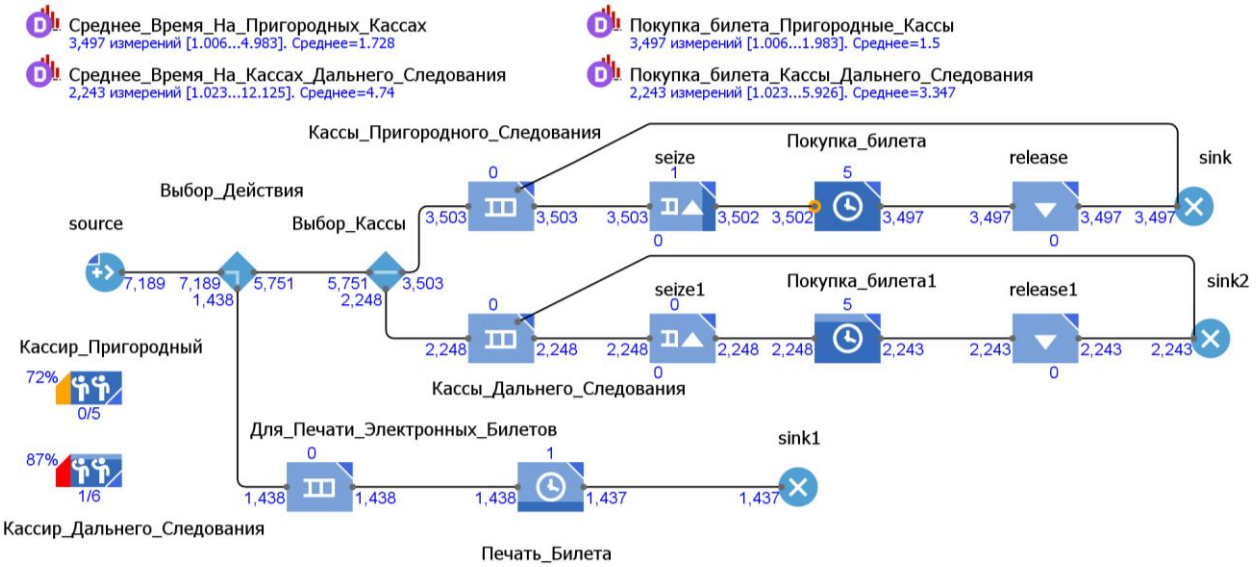


Рис. 4 – Изменения в штате кассиров

В данном примере не были рассмотрены все функциональные возможности AnyLogic, однако видно насколько эффективно использование данного продукта. Благодаря AnyLogic можно не только увидеть недостатки существующих бизнес-моделей, а также есть возможность исправить узкие места, при этом сэкономив часть бюджета [12]. Изучая работу прототипа можно вносить изменения в имитационную модель в ходе работы, что позволяет лучше проанализировать функционирование процесса и быстро решить поставленную задачу.

Полученная в результате запусков модели статистика дала возможность проанализировать данные и произвести оценку эффективности работы вокзала. При проведении первой серии экспериментов над моделью с реальными входными параметрами было выявлено, что не все процессы находятся в идеальном соотношении рабочей силы и аппаратно- программного обеспечения, при котором бы успевали обслуживать данный поток клиентов. После проведения второй серии испытаний было найдено наиболее подходящее количество единиц штата для бизнес-процесса «билетно-кассовое обслуживание» .

Таким образом, программное обеспечение AnyLogic продемонстрировало высокие результаты точности моделирования процессов. Созданная модель позволила вывить узкие места работы железнодорожного вокзала.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Лиманова Н. И. Моделирование процессов теплообмена [Электронный ресурс] / Н. И. Лиманова, Е. А. Мамзин, С. Г. Матвеев // Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета Им. Академика С.П. Королёва. – 2009 – № 3–1 (19) – С. 265–269 – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13076169 (дата обращения: 28.10.18)

2. Обухов П. А. Исследование эффективности работы сетевых серверов в среде имитационного моделирования AnyLogic [Электронный ресурс] / П. А. Обухов, А. Б. Николаев, А. В. Остроух // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 3 (часть 3) – С. 338–342. – URL: https://www.expeducation.ru/ru/article/view?id=7142 (дата обращения: 27.10.18).

3. Скачать AnyLogic [Электронный ресурс]. – URL: https://www.anylogic.ru/downloads/ (дата обращения: 27.10.18).

4. AnyLogic. Многоподходное имитационное моделирование [Электронный ресурс] / XJ Technologies Company Ltd, 2004. – URL: http://www.anylogic.ru (дата обращения: 27.10.18).

5. Официальный сайт РЖД: Российские железные дороги. [Электронный ресурс] / ОАО «РЖД». – М., 2003. – URL: http://www.rzd.ru/ (дата обращения: 27.10.18).

6. Распоряжение Правительства РФ «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (вместе с "Планом мероприятий по реализации в 2008 - 2015 годах Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года")» [Электронный ресурс] / Распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 N 877–р // КонсультантПлюс: справ. правовая система. Версия Проф. М., 2005. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92060/ (дата обращения: 27.10.18).

7. Ланцев Е. А. Получение агентной имитационной модели из дискретно-событийного описания бизнес-процесса [Электронный ресурс] / Е. А. Ланцев, М. Г. Доррер // Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2013. – № 3 (174) – С. 44–52. – URL: https://www.anylogic.ru/upload/iblock/91e/91ed57d465f905d422e7a86c7e601267.pdf (дата обращения: 28.10.18)

8. Борщев А. Как строить простые, красивые и полезные модели сложных систем [Электронный ресурс] / А. Борщев // Имитационное Моделирование. Теория и Практика: материалы Шестой науч.- практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности ИММОД 2013 г. Казань / Издательство "ФЭН" Академии наук РТ. – Казань, 2013. – Т.1. – С. 21 – 34. – URL: https://www.anylogic.ru/upload/iblock/e93/e93d42155672af376502dc4022515a22.pdf (дата обращения: 28.10.18)

9. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] / Ю. Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.

10. Российская Федерация. Федеральный закон «О железнодорожном транспорте Российской Федерации» : федеральный закон : [принят Гос. Думой 24 декабря 2002 г. : одобрен Советом Федерации 27 декабря 2002 г.] от 10.01.2003 г. № 17–ФЗ : (ред. от 20.12.2017) // Собрание законодательства РФ. – 2003, № 2, (13 января). – Ст. 169

11. Моделирование транспортной системы городских электричек: взгляд со стороны пассажира [Электронный ресурс]. — URL: https://www.anylogic.ru/blog/modelirovanie-transportnoy-sistemy-gorodskikh-elektrichek-vzglyad-so-storony-passazhira/ (дата обращения: 28.10.18)

12. CSX решает проблемы железнодорожных перевозок с AnyLogic [Электронный ресурс]. – URL: https://www.anylogic.ru/csx-solves-railroad-operation-challenges-with-and-without-anylogic-rail-library/ (дата обращения: 28.10.18).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Limanova N. I. Modelirovaniye protsessov teploobmena [Simulation of heat transfer processes] [Electronic resource] / N. I. Limanova, Ye. A. Mamzin, S. G. Matveyev // Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta Im. Akademika S.P. Korolova [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev]. – 2009 – № 3–1 (19) – Pp. 265–269 – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13076169 (accessed: 28.10.18). [in Russian

2. Obukhov P. A. Issledovanie effektivnosti raboty setevykh serveroev v srede imitatsionnogo modelirovaniya AnyLogic[Study of the effectiveness of the network servers in the simulation environment AnyLogic] [Electronic resource] / P. A. Obukhov, A. B. Nikolaev. A. V Ostroukhov // Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimetalnogo obrazovaniya [International Journal of Experimental Education]. – 2015 – № 3 (part 3) – pp. 338–342. – URL: https://www.expeducation.ru/ru/article/view?id=7142 (accessed: 27.10.18). [in Russian

3. Skachat' AnyLogic [Download AnyLogic] [Electronic resource]. – URL: https://www.anylogic.ru/downloads/ (accessed: 27.10.18). [in Russian]

4. AnyLogic. Mnogopodkhodnoe imitatsionnoe modelirovanie [Multi-Approach Simulation] [Electronic resource] / XJ Technologies Company Ltd, 2004. – URL: http://www.anylogic.ru (accessed: 27.10.18). [in Russian]

5. Offitsialnyy sayt RZHD: Rossiyskie zheleznye dorogi [Russian Railways official website: Russian Railways] [Electronic resource] / OAO « RZHD ». – M., 2003. – URL: http://www.rzd.ru/ (accessed: 27.10.18). [in Russian

6. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF «O Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda (vmeste s «Planom meropriyatiy po realizatsii v 2008 – 2015 godakh Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda»)» [Order of the Government of the Russian Federation «On the Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 (together with the «Plan of measures for the implementation in 2008–2015 of the Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 «)»] [Electronic resource] / Rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 17.06.2008 N 877–p // KonsultantPlus: sprav. pravovaya sistema. Versiya Prof. M., 2005. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92060/ (accessed: 27.10.18). [in Russian

7. Lantsev E. A. Poluchenie agentnoy imitatsionnoy modeli iz diskretno-sobytiynogo opisaniya biznes-protsessa [Obtaining agent-based simulation model from a discrete-event description of a business process] [Electronic resource] / E. A. Lantsev, M. G. Dorrer // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPY [Scientific and technical statements SPbGPU]. – 2013. – № 3 (174) – Pp. 44–52. – URL: https://www.anylogic.ru/upload/iblock/91e/91ed57d465f905d422e7a86c7e601267.pdf (accessed: 28.10.18). [in Russian]

8. Borshchyev A. Kak stroit prostye, krasivye I poleznye modeli slozhnykh system [How to build simple, beautiful and useful models of complex systems] [Electronic resource] / A. Borshchyev // Imitatsionnoye Modelirovaniye. Teoriya i Praktika: materialy Shestoy nauch.- prakt. konf. po imitatsionnomu modelirovaniyu i yego primeneniyu v nauke i promyshlennosti IMMOD 2013 g. [Imitation Modeling. Theory and Practice: materials of the Sixth Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry IMMOD 2013], Kazan / Izdatel'stvo "FEN" Akademii nauk RT [FEN Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan]. – Kazan, 2013. – T.1. – Pp. 21 – 34. – URL: https://www.anylogic.ru/upload/iblock/e93/e93d42155672af376502dc4022515a22.pdf (accessed: 28.10.18). [in Russian

9. Karpov Yu. G. Imitatsionnoe modelirovanie system. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5 [Simulation modeling systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5] [Text] / Yu. G. Karpov. – SPb.: BKHV– Peterburg, 2006. – 400 p. [in Russian]

10. Rossiyskaya Federatsiya. Federal'nyy zakon «O zheleznodorozhnom transporte Rossiyskoy Federatsii» [Russian Federation. Federal Law «About railway transport of the Russian Federation»] : federal law: [accepted by State Duma on December 24, 2002: approved by the Federation Council on December 27, 2002] ot 10.01.2003 g. № 17–FZ : (red. ot 20.12.2017) // Sobranie zakonodatelstva PF. – 2003, № 2, (13 yanvarya). – St. 169. [in Russian]

11. Modelirovanie transportnoy sistemy gorodskikh elektrichek: vzglyad so storony passazhira [Modeling urban trains transport system: a view from the passenger's side] [Electronic resource]. — URL: https://www.anylogic.ru/blog/modelirovanie-transportnoy-sistemy-gorodskikh-elektrichek-vzglyad-so-storony-passazhira/ (accessed: 28.10.18) [in Russian]

12. CSX reshayet problemy zheleznodorozhnykh perevozok s AnyLogic [CSX solves the problems of rail traffic with AnyLogic] [Electronic resource]. – URL: https://www.anylogic.ru/csx-solves-railroad-operation-challenges-with-and-without-anylogic-rail-library/ (accessed: 28.10.18). [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.022

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ Р110

Научная статья

Путилова Е.А. *
ORCID: 0000-0002-8508-8413,
ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

Аннотация

Задачи создания оперативных и достоверных методов неразрушающего контроля структуры и уровня механических свойств термически упрочненных труб из широко используемых в нефтегазовой отрасли марок сталей, является весьма актуальной. В данной работе исследованы структура, механические и магнитные свойства трубной стали класса прочности Р110 после различных режимов термической обработки. Установлены магнитные параметры, которые могут быть использованы для контроля качества таких операций термической обработки, как недогрев под закалку, а также качество отпуска исследованной стали.

Ключевые слова: трубная сталь, закалка, отпуск, коэрцитивная сила, твердость.

STUDY OF THE MAIN FEATURES OF THE STRUCTURE, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE TUBE STEEL OF DURABILITY CLASS P110

Research article

Putilova E.A. *
ORCID: 0000-0002-8508-8413,
Institute of Machines Science UrB RAS, Yekaterinburg, Russia

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

Abstract

The task of creating operational and reliable methods of non-destructive testing of the structure and level of mechanical properties of thermally hardened tubes from steel widely used in the oil and gas industry is highly relevant. In this paper, the structure, mechanical and magnetic properties of tube steel of durability class P110 after various heat treatment modes are considered. Magnetic parameters that can be used to control the quality of heat treatment operations such as underheating under hardening, as well as the quality of tempering of the steel under study are established.

Keywords: tube steel, quenching, tempering, coercive force, hardness.

Тяжелые условия эксплуатации труб нефтяного и газового сортамента (широкий интервал климатических температур, коррозионно-активная среда, внешние нагрузки и др.) [1] приводят к тому, что требования по обеспечению уровня механических свойств, а также к качеству и надежности постоянно повышаются [2-6]. Для достижения необходимого уровня прочностных свойств, соответствующих повышенным классам прочности, трубы нефтегазового сортамента подвергают строго определенным режимам термической обработки (ТО) с образованием достаточно сложной микроструктуры. Качественную оценку труб после ТО в производственных условиях обычно осуществляют с помощью измерения твердости. Но в таком случае возможности сплошного контроля всех изделий уменьшаются. В связи с этим задача создания высоко оперативных и точных методов неразрушающего контроля качества термического упрочнения труб нефтегазового сортамента из стали класса прочности Р110 является достаточно актуальной.

Магнитный метод неразрушающего контроля механических свойств и микроструктуры стальных изделий, широко распространенные и регламентированный ГОСТ 30415-96, имеет ряд преимуществ [7]: во-первых, этот метод является неразрушающим; измерения информативных параметров можно проводить с достаточной точностью и оперативностью; приборы контроля просты и удобны в использовании, и требуют лишь минимальных знаний оператора. Однако, хорошо известно, что взаимосвязь механических и традиционно используемых в неразрушающем контроле магнитных параметров далеко не всегда однозначна, а характер этой взаимосвязи определяется как химическим составом стали, так и ее микроструктурой [8].

Материалы и методика

Исследования проводили на образцах, вырезанных из бесшовной трубы стали 22ХГ2А (диаметр труб 178 мм, толщина стенки 10,7 мм). Образцы прямоугольного сечения 7×10 мм и длиной 160 мм вырезали вдоль оси трубы. Полученные образцы подвергали термической обработке (ТО) по различным режимам. Закалку в воду проводили с четырех температур: 765 ºС – несколько выше температуры начала аустенитизации стали (недогрев); 840 ºС – ниже температуры полной аустенитизации (небольшой недогрев); 880 ºС (оптимальная температура); 980 ºС (перегрев). Варьирование температур отпуска проводили только на образцах, закаленных с оптимальной температуры. Их подвергали отпуску при следующих температурах: 520, 550, 570, 590, 610, 630, 650, 670, 700, 720 ºС.

На готовых образцах проводилось измерение твердости по методу Роквелла, коэрцитивной силы при помощи структуроскопа-коэрцитиметра КРМ-Ц с приставным датчиком-электромагнитом (размер полюса 32×15 мм, расстояние между полюсами 50 мм). С его помощью можно осуществлять контроль качества объемной термической обработки труб с толщиной стенки до 13 мм.

Также проводили измерение магнитных характеристик в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеаметра на магнитно-измерительном комплексе Remagraph C-500. Магнитное поле напряженностью до 50 кА/м прикладывали вдоль оси образца. Регистрировали петли магнитного гистерезиса, из которых определяли значения коэрцитивной силы H_c, остаточной индукции B_r и намагниченности в максимальном приложенном поле $\mu_0 M_{макс}$ ($\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная). Погрешность измерения поля и индукции не превышала 3 %. Из основной кривой намагничивания определяли максимальную магнитную проницаемость $\mu_{макс}$. Перед началом каждого измерения магнитных свойств и по его окончании образец размагничивали.

Для проведения металлографических исследований образцов на них были подготовлены поперечные шлифы. При травлении шлифов использовался 3% спиртовой раствор HNO_3. Фотографирование структуры проводили на оптическом микроскопе при 1000-кратном увеличении.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены изменения магнитных характеристик исследованной стали в зависимости от температуры закалки.

Недогрев под закалку является недопустимым для доэвтектоидных сталей, поскольку в результате такой термической обработки в структуре стали содержится мягкая составляющая (феррит), которая снижает прочность стали. Это подтверждается измерениями твердости исследованных сталей - из рис. 1 видно, что значения твердости стали при температуре закалки $T_{зак}$ = 765 ºС ниже, чем при более высоких $T_{зак}$. Помимо феррита в сталях после закалки в воду обнаружены мартенсит и остаточный аустенит.

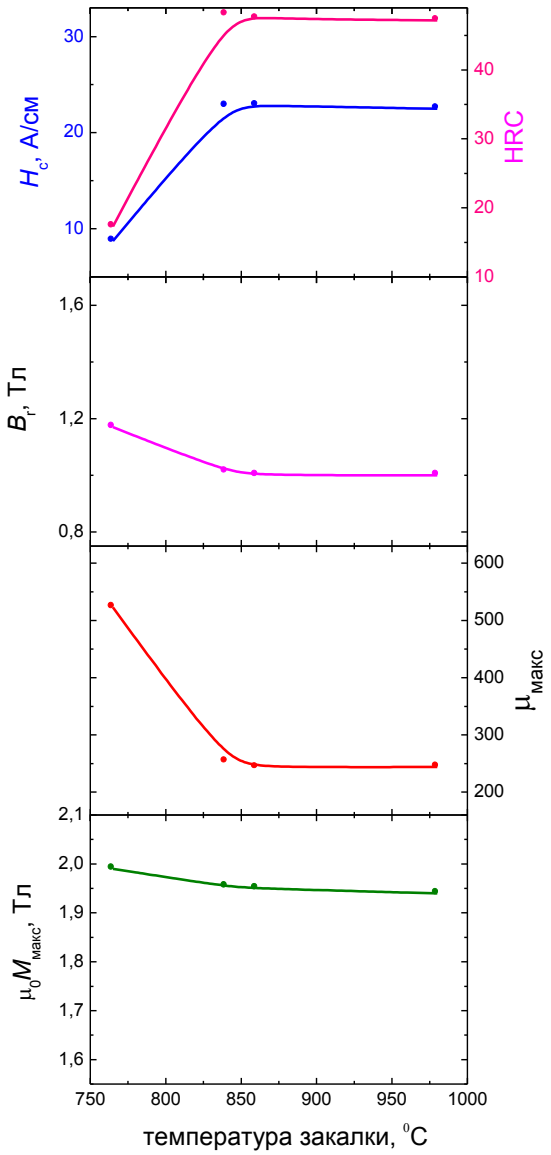


Рис. 1 – Зависимость магнитных характеристик стали класса прочности Р110 от температуры закалки

При закалке с 840, 880 и 980 ºС в воду структура исследованного материала содержит реечный мартенсит и остаточный аустенит, различие состоит только в дисперсности структуры и размере мартенситных пакетов и реек, их образующих (рис. 2).

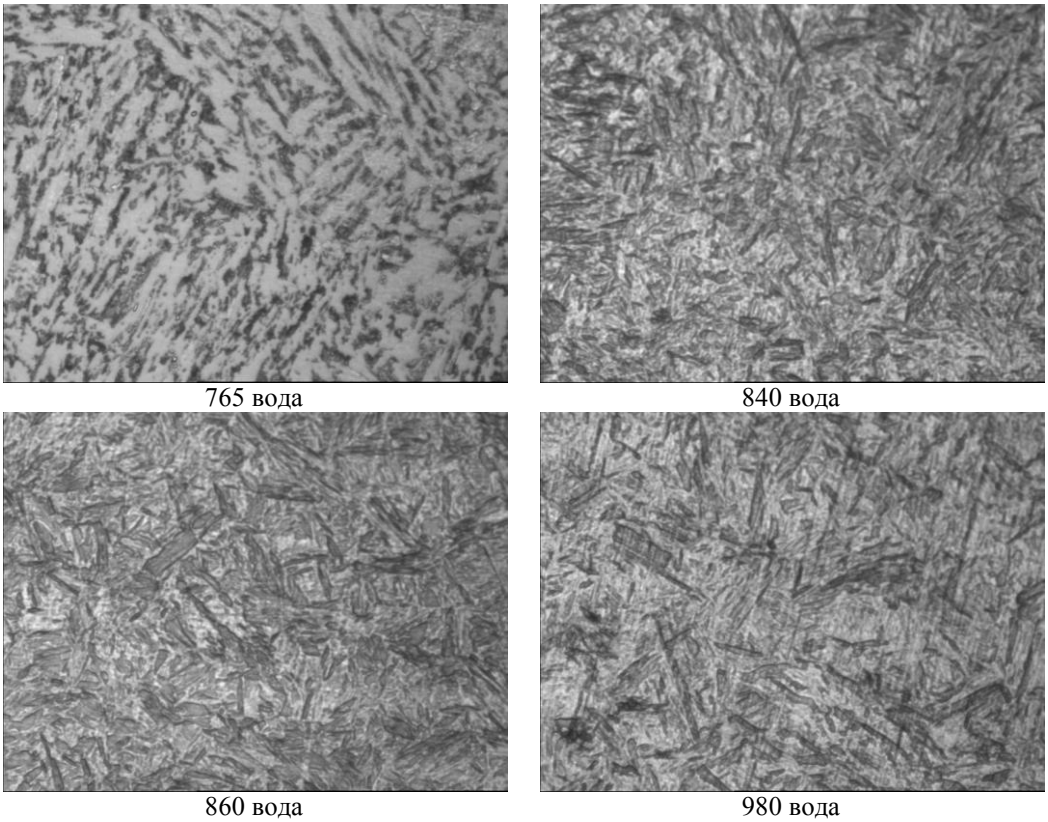


Рис. 2 – Микроструктура исследованной стали после закалки, увеличение 1500

Как видно из рис. 1, все магнитные характеристики стали изменяются однозначно с изменением $T_{зак}$. Коэрцитивная сила с увеличением температуры закалки до 840 ºС возрастает, дальнейшее увеличение $T_{зак}$ практически не сказывается на значениях H_c. Максимальная магнитная проницаемость ведет себя противоположным образом. Значения остаточной индукции образцов, охлажденных воду, остаются, в пределах погрешности, без изменений. Небольшой недогрев под закалку (840 ºС) и перегрев (980 ºС) слабо влияет на структуру, твердость и магнитные характеристики образцов стали класса прочности Р110, они имеют похожую структуру, твердость и магнитные параметры, что и образцы, закаленные с оптимальной температуры. Отсюда следует, что для изделий из этих сталей важнее контролировать недогрев под закалку, поскольку это приводит к ухудшению механических свойств материала.

Образцы, закаленные с 880 ºС в воду, подвергали отпуску при температурах от 520 ºС до 720 ºС. Подобная операция ТО (закалка + высокотемпературный отпуск) называется улучшением [9]. В результате в структуре стали получается сорбит отпуска, который характеризуется равномерным распределением карбидных фаз и мелким размером частиц. При увеличении температуры отпуска выше 670 ºС структурные элементы начинают коагулировать и начинается укрупнение структурных составляющих сталей.

На рис. 3 приведены корреляционные зависимости твердости и коэрцитивной силы стали класса прочности Р110 после закалки и отпуска (линии построены только для температур отпуска 500, 540, 570, 600, 630 ºС), измеренные на образцах и на патрубках, причем измерения на патрубках проводили как на зачищенной поверхности, так и на поверхности с окалиной. Кривые аппроксимировали полиномом третьей степени. Коэффициенты корреляции между множеством значений твердости и коэрцитивной силы составляют: для модельных образцов – 0,970; для шлифованной поверхности патрубка – 0,987; для нешлифованной поверхности патрубка – 0,989.

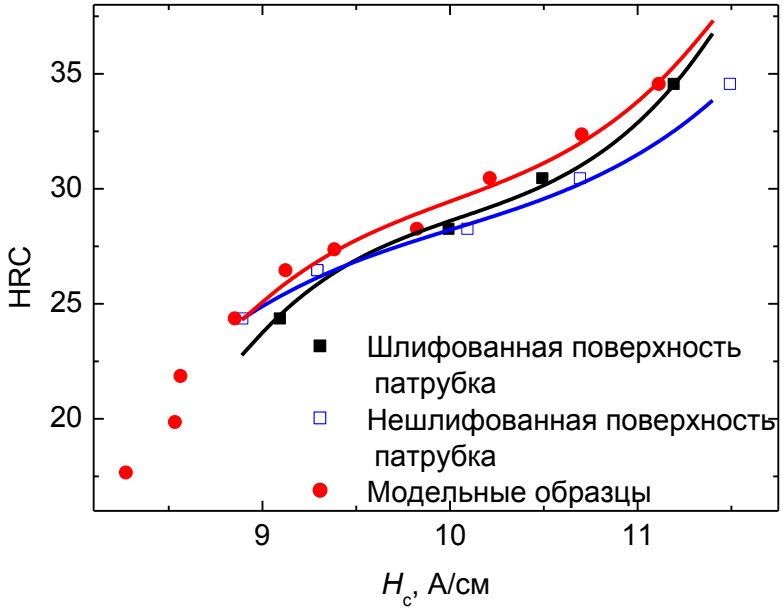


Рис. 3 – Корреляционная зависимость твердости и коэрцитивной силы для стали 22ХГ2А

Для оценки отклонения измерений, сделанных на патрубках (шлифованной и нешлифованной поверхностях) от измерений на модельных образцах был введен такой показатель как среднее относительное отклонение, рассчитываемый по формуле [10]: $\delta = \frac{\int_{x1}^{x2} \left| P_{обр}(x) - P_{п}(x) \right| dx}{\int_{x1}^{x2} P_{обр}(x)} \times 100$, где $P_{обр}$ – значение твердости, измеренное на образцах, $P_{п}$ – значение твердости, измеренное на патрубках. Смысл состоит в том, что оценивалась площадь под кривой, соответствующей измерениям на патрубках, и сравнивалось полученное значение с площадью под кривой, полученной на модельных образцах. Отклонение кривой, соответствующей шлифованной поверхности патрубка, от кривой для модельных образцов составило 3,19%, а для нешлифованной – 4,87%. Совпадение достаточно хорошее.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что коэрцитиметрический метод неразрушающего контроля с применением накладных преобразователей может быть использован для оценки качества такой операции ТО, как отпуск для трубной стали класса прочности Р110.

Недогрев под закалку достаточно четко определяется всеми измеренными магнитными параметрами. А для контроля качества такой операции ТО как отпуск может быть использован коэрцетиметрический метод, поскольку коэрцитивная сила монотонно изменяется во всем диапазоне температур отпуска. Максимальная магнитная проницаемость может быть использована для оценки в диапазоне температур отпуска до 600 ºС.

Финансирование

Работа выполнена в раках исследований по проекту СП-150.2018.1 Стипендий Президента РФ молодым ученым и аспирантам. При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Пластометрия»

Funding

The work was carried out within the framework of studies on the project SP-150.2018.1 of Scholarships of the President of the Russian Federation to young scientists and postgraduate students. The equipment of the Plastometry CUC was used when performing the work.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Rybin V. V. High-strength steels for trunk pipelines / Rybin V. V., Malyshevsky V. A., E. I. Hlusova // Voporosy materialovedenia 3(59), 127-137 (2009).
2. Pyshmintsev I. Y. New development of high-strength corrosion-resistant pipes for environments, product hydrogen sulfide / I. Y. Pyshmintsev, I. N. Veselov, B. A. Erehinskij. // Pipeline transport: theory and practice 5, 26-31 (2016).
3. Omura T. Super-high strength low alloy steel OCTG with improved sour resistance /T. Omura, M. Numata, M. Ueda // Ferrum Bulletin of the Iron and Steel Institute of Japan 9, 575-579 (2009)
4. Fujii Y. Oil and gas pipes of high corrosion resistance, ensuring the development of natural gas fields /Y. Fujii // Ferrum Bulletin of the Iron and Steel Institute of Japan 9, 568-572 (2009)
5. Liu M. Effect of microstructure and crystallography on sulfide stress cracking in API-5CT-C110 casing steel / M. Liu, C. D. Yang // Material science and Engineering A 671, 244-253 (2016)
6. Efron L. I. “Material science in “large” metallurgy. Pipe steels” / L. I. Efron, Moscow, Metallurgizdat, 2012.
7. Kluev V. V. “Nondestructive testing and diagnostic. Handbook” / V. V. Kluev, Moscow, Mashinostroenie, 1995

8. Bida G.V. “Magnetic properties of heat treated steels” / G. V. Bida, A. P. Nichipuruk, Ekaterinburg, UrO RAN, 2005
9. B.N. Arzamasov, I.I. Sidorin, G.F. Kosolapov “Materialsciense: Textbook for higher technical educational institutions”, Moscow, Mashinostroenie, 1986
10. Smirnov A. S. Identification of the deformation resistance model of metallic materials, taking into account the volume fraction of dynamically recrystallized grains / A. S. Smirnov, A. V. Konovalov, O. Y. Muisemnek // Deformation and fracture of materials 9, 7-13 (2013).

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.023

ЗАЩИТА СКВАЖИННЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ СЕЛЬСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Научная статья

Супроненко Н.Н.[1, *], Щеголева А.Б.[2]

[1, 2] Смоленский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Смоленск, Россия.

* Корреспондирующий автор (supr49.10.02[at]yandex.ru)

Аннотация

Для централизованного водоснабжения животноводческих ферм и сельских поселков применяют скважинные электронасосные агрегаты. Бесперебойное водоснабжение зависит от надежной безаварийной работы электродвигателя скважинного насоса.

В Смоленском НИИСХ разработано устройство автоматического управления скважинными насосами с новыми защитами погружного электродвигателя от аварийного выхода из строя. Устройство содержит защиты от опасных режимов работы: часто повторяющихся изменений напряжения питания электродвигателя скважинного насоса, одновременного замыкания контактов манометра и цепей управления.

Применение разработанного устройства автоматического управления скважинными насосами с защитой погружного электродвигателя позволяет снизить аварийный выход из строя электронасосных агрегатов сельского водоснабжения.

Ключевые слова: устройство автоматического управления, защита электродвигателя скважинного насоса.

PROTECTION OF SUBMERSIBLE ELECTRIC PUMPS FOR RURAL WATER SUPPLY FROM EMERGENCY OPERATION MODES

Research article

Supronenko N.N.[1, *], Schegoleva A.B.[2]

[1, 2] Smolensk Research Institute of Agriculture, Smolensk, Russia.

* Corresponding author (supr49.10.02[at]yandex.ru)

Abstract

Electric pump units are used for the centralized water supply of livestock farms and rural settlements. Uninterrupted water supply depends on the reliable, trouble-free operation of the submersible pump motor.

In Smolensk Agricultural Research Institute they developed a device for automatic control of submersible pumps with new submersible motor protection against emergency failure. The device contains protection from hazardous operation modes: frequently repeated changes in the supply voltage of the electric motor of the submersible pump, simultaneous closure of the manometer contacts and control circuits.

The use of the developed device for automatic control of simultaneous pumps with the protection of a submersible electric motor allows reducing the emergency failure of electric pump units of rural water supply.

Keywords: an automatic control device, protection of a submersible pump motor.

В настоящее время, централизованное водоснабжение животноводческих ферм и сельских поселений осуществляется из артезианских скважин погружными электронасосами. Повышенные требования к бытовым условиям сельского населения, применение прогрессивных технологий содержания животных предполагает бесперебойное обеспечение артезианской водой сельхозпотребителей.

Погружные электронасосные агрегаты являются основным узлом систем водоснабжения, от надежной работы которых зависит бесперебойная подача воды потребителям. Поэтому главной задачей эксплуатационных служб является обеспечение безаварийной работы погружных электродвигателей скважинных насосов [1]. Выход из строя электродвигателя скважинного насоса приводит к значительным перерывам в водоснабжении из-за трудоемкости и сложности замены всего насосного агрегата, а также к значительным экономическим затратам в связи с приобретением нового насоса и выполнением дорогостоящих работ по его замене.

Методы и результаты исследований

Погружные асинхронные водозаполненные электродвигатели предназначены для привода скважинного насоса, подающего воду из подземного источника в водопроводную сеть или в накопительную емкость [2]. При работе скважинного насоса могут возникать разнообразные аварийные ситуации: асимметричное электропитание, механические повреждения, неисправности в системах управления. Основной причиной аварийного выхода из строя погружных электродвигателей скважинных насосов является перегрев статорной обмотки током, превышающим номинальный рабочий, с последующими межвитковыми замыканиями из-за несвоевременного отключения от сети.

Анализ аварийных выходов из строя скважинных насосов выявил в применяемых станциях управления отсутствие защит: от часто повторяющихся скачков фазных напряжений, от одновременных замыканий контактов манометра, от гидравлических ударов при отключении насоса.

В сельских сетях часто возникают кратковременные глубокие (до 140 – 160 В) многократно повторяющиеся провалы напряжения в любой из фаз [3, С. 40-51]. Это может происходить из - за кратковременных перегрузок в одной из фаз, особенно при работе однофазного сварочного трансформатора, или из - за кратковременных коротких замыканий проводов воздушной линии и несрабатывании защиты на трансформаторной подстанции. Поэтому защита

от несимметричного питания (пропажи фазы) должна иметь либо самоблокировку, либо задержку времени на включение после восстановления симметричного питания.

При включении и отключении погружного электронасоса в трубопроводе возникают резкие скачки давления, а в электроконтактном манометре (ЭКМ) - резкие колебания стрелки ЭКМ, при которых возможно длительное замыкание контактов верхнего и нижнего уровней с контактом стрелки ЭКМ. Также в процессе эксплуатации возможны замыкания в проводах управления и присоединительных зажимах ЭКМ и устройства управления. В этих случаях возникает аварийный режим работы электродвигателя, характеризующийся частыми включениями и отключениями электродвигателя, что приводит к перегреву статорной обмотки пусковыми токами и к межвитковым замыканиям.

В Смоленском НИИСХ разработано и прошло Государственные приемочные испытания устройство автоматического управления скважинными насосами с защитой погружного электродвигателя от аварийного выхода из строя (рис.1) [4, С. 25], [5, С. 68-70].

Устройство управления предназначено для автоматизации процесса подъема питьевой воды из артезианской скважины в водонапорную башню или гидроаккумулятор [6]. Управление электронасосом осуществляется по сигналам, поступающим от электроконтактного манометра.

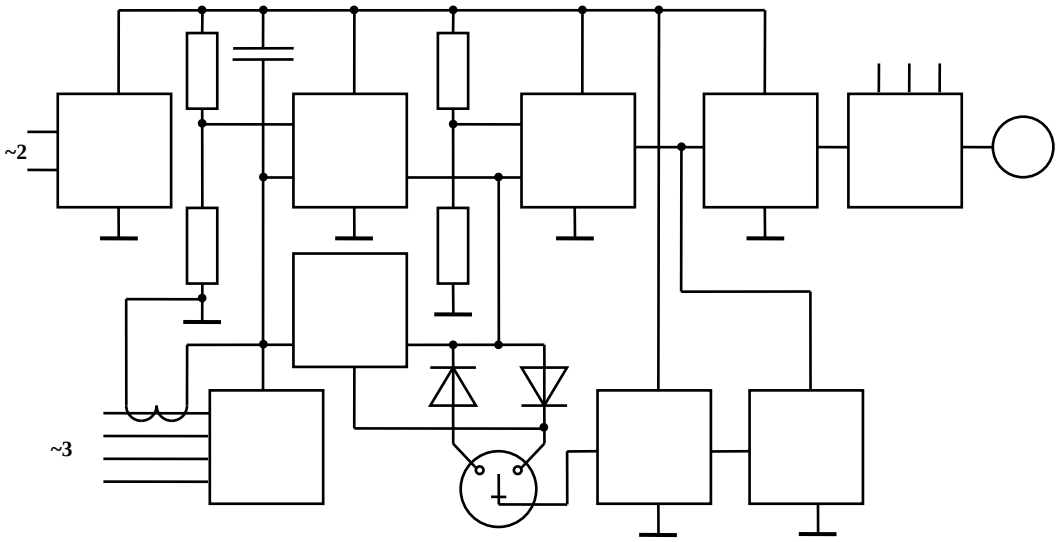


Рис.1 – Блок-схема устройства автоматического управления скважинным насосом с защитой электродвигателя от аварийных режимов работы

1 – блок питания; 2 – блок защиты; 3 – блок управления; 4 – выходное реле; 5 – электромагнитный пускатель; 6 – логический элемент И; 7 – фильтр напряжений нулевой последовательности; 8 – эмиттерный повторитель; 9 – блок формирования задержек времени на обратную коммутацию; М – двигатель; ТТ – трансформатор тока.

Блок питания 1 состоит из понижающего трансформатора, двухполупериодного выпрямителя и сглаживающего фильтра. Полученное постоянное напряжение осуществляет питание блока управления 3, блока защиты 2 и выходного реле 4.

Блок управления 3 получает сигналы от датчика давления ЭКМ и с выхода блока защиты 2. В зависимости от величины этих сигналов срабатывает пороговый элемент блока управления, который включает или выключает выходное реле 4. При включении и выключении насоса в трубопроводе возникают значительные резкие изменения давления воды, что приводит к колебаниям стрелки электроконтактного манометра, установленного на трубе трубопровода, что в свою очередь приводит к ложным переключениям блока управления.

Для исключения ложных переключений необходимо блокировать пороговый элемент системы управления на время протекания переходного процесса как после включения, так и после выключения электродвигателя насоса. Эту задачу решает блок формирования задержек времени 9 на включение после отключения и на отключение после включения (обратная коммутация выходного реле). Принцип работы формирователя задержек времени на обратную коммутацию основан на заряде и разряде конденсатора, напряжение с которого поступает на вход эмиттерного повторителя 8. С выхода эмиттерного повторителя изменяющееся напряжение подается на общий контакт датчика давления ЭКМ, который при изменении давления своими контактами переключает пороговый элемент блока управления 3 с соответствующими задержками времени. В результате, выходное реле 4, электромагнитный пускатель 5 и электродвигатель М скважинного насоса включаются и выключаются с соответствующими задержками времени на обратную коммутацию, что исключает ложные переключения блока управления.

На вход блока защиты 2 поступают сигналы от фильтра напряжений нулевой последовательности 7 и от вторичной обмотки трансформатора тока ТТ. Контроль симметрии напряжений осуществляет фильтр напряжений нулевой последовательности 7. При исчезновении одной из фаз или появлении опасной асимметрии напряжений на выходе фильтра образуется напряжение относительно нулевого провода сети, которое выпрямляется и усиливается, и, воздействуя на вход блока защиты, переключает его пороговый элемент в открытое состояние. Сигнал с выхода блока защиты 2 поступает на вход блока управления 3 и переключает его в закрытое состояние, тем самым отключает выходное реле 4 и, следовательно, электромагнитный пускатель, который отключает электродвигатель насоса от сети.

Защита от несимметричного питания имеет задержку времени на отключение 1,5 – 2 сек и регулируемую задержку времени на включение после восстановления симметричного питания 40 – 60 сек, формируемую конденсатором на входе блока защиты [7].

Защита от несимметричного питания работает следующим образом. Когда в сети существует несимметрия, электродвигатель отключен защитой. При восстановлении симметричного питания начинает действовать задержка времени на включение. Если во время действия задержки на включение появится несимметрия, то вновь срабатывает защита и действие задержки начнется с момента восстановления симметрии. Такой алгоритм действия защиты не позволяет электродвигателю с автоматическим управлением работать в повторно-пусковом режиме.

Для защиты статорной обмотки погружного электродвигателя скважинного насоса от перегрева, вызванного перегрузками, незапуском или заклиниванием ротора осуществляется контроль величины потребляемого тока в одной из фаз питания электродвигателя. Токовая защита отключает электродвигатель от сети при трехкратной перегрузке за 10 сек, при заклинивании ротора – за 3 сек, при незапуске – за 4 – 5 сек [8].

В процессе эксплуатации возможны замыкания проводов управления между собой на присоединительных клеммах этих проводов. При гидроударах возможно сцепление контактов верхнего и нижнего уровней с контактом стрелки манометра ЭКМ. При этом блок управления будет работать в режиме часто повторяющихся включений и отключений, что приведет к выходу из строя электродвигателя пусковыми токами [9]. В Смоленском НИИСХ разработана защита электродвигателя от одновременного замыкания цепей управления [10]. При одновременном замыкании контактов ЭКМ напряжение с эмиттерного повторителя через контакты верхнего и нижнего уровней ЭКМ поступает на вход логического элемента 6. При этом на выходе логического элемента появится положительный сигнал, поступающий на вход блока защиты 2. При этом происходит заряд конденсатора на входе блока защиты. Соотношение напряжений на входах блока защиты изменится. На его выходе появится сигнал, отключающий блок управления 3 и выходное реле 4. В результате электронасос отключится от сети.

Выводы

Разработанное устройство автоматического управления скважинным насосом с защитами погружного электродвигателя от аварийной работы успешно эксплуатируется на артезианских скважинах в хозяйствах и сельских поселениях Смоленской области. Аварийный выход из строя погружных скважинных насосов водоподъема сократился на 35 – 40 %.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Грундулис А. О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А. О. Грундулис. – М.: Агропромиздат, 1988. - 111с.
2. Усаковский В. М. Водоснабжение и водоотведение в сельском хозяйстве / В. М. Усаковский. – М.: Колос, 2002. – 328 с.
3. Мусин А. М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты / А. М. Мусин. – М.: Колос, 1979. – С. 40-51.
4. Протокол № 09-05-15 приемочных испытаний устройства управления скважинным насосом с защитой погружного электродвигателя от аварийных режимов работы. Климовск.- 2015. - С. 25.
5. Супроненко Н. Н. Универсальная станция управления и защиты электронасосов водоподачи. / Н. Н. Супроненко, Б. Н. Муханов, О. В. Критченкова и др. // Достижения науки и техники АПК. - 2011. - № 3. - С. 68-70.
6. Патент на полезную модель 151016 Российская Федерация, МПК F04D 15/00. Устройство для автоматического управления электронасосным агрегатом по уровню и давлению воды в водонапорной башне. / Супроненко Н. Н., Критченкова О. В., Щеголева А. Б.; заявитель и патентообладатель ГНУ Смоленский НИИСХ; № 2014116529, заявл. 23.04.2014; опубл. 20.03. 2015. Бюл. № 8.
7. Патент на полезную модель 121403 Российская Федерация, МПК H02H 7/08. Устройство автоматического управления электродвигателем погружного насоса. / Супроненко Н. Н., Критченкова О. В., Муханов Б.Н.; Щеголева А. Б.; заявитель и патентообладатель ГНУ Смоленский НИИСХ; № 2012120999/07, заявл. 22.05.2012; опубл. 20.10. 2012. Бюл. № 29.
8. Патент на полезную модель 138388 Российская Федерация, МПК H02H 7/08, H02H 7/00. Устройство автоматического управления электродвигателем погружного насоса. / Супроненко Н. Н., Критченкова О. В., Щеголева А. Б.; заявитель и патентообладатель ГНУ Смоленский НИИСХ; № 2013145111/07, заявл. 08.10.2013; опубл. 10.03. 2014. Бюл. № 7.
9. Правила технической эксплуатации электроустановок: утверждены Приказом Минэнерго России № 6 от 13.01.2003. Глава 2.5., пункт 2.5.12. [Электронный ресурс] - URL: http://птээп. рф/.(дата обращения 15.11.2018).
10. Патент на полезную модель 169223 Российская Федерация, МПК H02H 7/08. Устройство автоматического управления электродвигателем погружного насоса. / Новиков В. М, Супроненко Н. Н., Критченкова О. В., Щеголева А. Б.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ Смоленский НИИСХ; № 2016135124 заявл. 29.08.2016; опубл. 13.03.2017. Бюл. № 8.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Grundulis A. O. Zashchita ehlektrodvigatelej v sel'skom hozyajstve. [Protection of electric motors in agriculture] / A. O. Grundulis. – M.: Agropromizdat, 1988. – 111 p. [In Russian
2. Usakovsky V. M. Vodosnabzhenie i vodootvedenie v sel'skom hozyajstve [Water supply and sanitation in agriculture] / V. M. Usakovsky. – M.: Kolos, 2002. – 328 p. [In Russian]

3. Musin A. M. Avarijnye rezhimy asinhronnyh ehlektrodvigatelej i sposoby ih zashchity / A. M. Musin. [Emergency regimes of asynchronous electrical motors and methods of their protection]. M: Kolos, 1979. – P. 40-51. [In Russian

4. Protokol № 09-05-15 priemochnyh ispytanij ustrojstva upravleniya skvazhinnym nasosom s zashchitoj pogruzhnogo ehlektrodvigatelya ot avarijnyh rezhimov raboty. [Protocol № 09-05-15 of the acceptance tests of the control device of the downhole pump with protection of the submersible electric motor from emergency modes of operation]. Klimovsk. - 2015. P. 25. [In Russian

5. Supronenko N. N. Universal'naya stanciya upravleniya i zashchity ehlektronasosov vodopodachi. [Universal operate system of electrical water pump]. / N. N. Supronenko, B. N. Muhanov, O. V. Kritchenkova and others// Dostizheniya nauki i tekhniki APK. [Achievements of science and technology of agroindustrial complex]. Moscow. – 2011. - № 3. - P. 68-70. [In Russian

6. Patent 151016 Russian Federation, MPK F04D 15/00. Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo upravleniya ehlektronasosnym agregatom po urovnyu i davleniyu vody v vodonapornoj bashne. [Device for automatic control of the electric pump unit on the level and pressure of water in the water tower]. / Supronenko N.N., Kritchenkova O.V., Shchegoleva A.B.; applicant and patentee SSI Smolensk Scientific Research Institute of Agriculture; - № 2014116529, appl. 23.04.2014; publ. 20.03.2015. Bul. № 8. [In Russian]

7. Patent 121403 Russian Federation, MPK H02H 7/08. Ustrojstvo avtomaticheskogo upravleniya ehlektrodvigatelem pogruzhnogo nasosa. [Automatic control device for electric motor of the submersible pump]. / Supronenko N.N., Kritchenkova O.V., Muhanov B.N., Shchegoleva A.B; applicant and patentee SSI Smolensk Scientific Research Institute of Agriculture; - № 2012120999/07, appl. 22.05.2012; publ. 20.10.2012. Bul. № 29. [In Russian]

8. Patent 138388 Russian Federation, MPK H02H 7/00, H02H 7/08. Ustrojstvo avtomaticheskogo upravleniya ehlektrodvigatelem pogruzhnogo nasosa. [Automatic control device for electric motor of the submersible pump]. / Supronenko N.N., Kritchenkova O. V., Shchegoleva A. B; applicant and patentee SSI Smolensk Scientific Research Institute of Agriculture; - № 2013145111, appl. 08.10.2013; publ. 10.03.2014. Bul. № 7. [In Russian]

9. Pravila tekhnicheskoj ehkspluatacii ehlektroustanovok: utverzhdeny Prikazom Minehnergo Rossii № 6 ot 13.01.2003. [The rules of technical operation of electrical equipment: approved by Order of the Ministry of energy of Russia № 187 от 13.01.2003]. - Part 2.5, Paragraph 2.5.12. URL: http://птээп.рф/. (accessed 15.11.2018). [In Russian]

10. Patent 169223 Russian Federation, MPK H02H 7/08. Ustrojstvo avtomaticheskogo upravleniya ehlektrodvigatelem pogruzhnogo nasosa. [Automatic control device for electric motor of the submersible pump]. / Novikov V. M., Supronenko N. N., Kritchenkova O. V. and others, applicant and patentee FSBSI Smolensk Scientific Research Institute of Agriculture; - № 2016135124 appl. 29.08.2016; publ. 13.03.2017. Bul. № 8. [In Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.024

ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО КОМПОНОВОЧНЫМ РЕШЕНИЯМ БЛОКА ИСПАРИТЕЛЯ-КОНДЕНСАТОРА ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Научная статья

Лысенко Ю.Д.[1], Звягинцев В.А.[2], Лукачев С.В.[3,] *, Шиманова А.Б.[4], Захаров М.О.[5]

[1, 2, 3, 4, 5] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

* Корреспондирующий автор (viktor.urlapkin[at]gmail.com)

Аннотация

Дистилляционные опреснительные установки с механической компрессией пара состоят из нескольких основных блоков, которые включают в себя блок испарителей-конденсаторов, блок парокомпрессора, блок теплообменников предварительного подогрева и блок вакуумирования. Кроме этого в габариты установки должны быть вписаны шкафы системы управления и электропитания, блоки водоподготовки. Все это приводит к увеличению габаритов установки, что отрицательно сказывается на её мобильности и технологичности. В данной статье рассматриваются варианты уменьшения габаритов установки за счет пересмотра компоновочных решений, применяемых в классических установках.

Ключевые слова: Дистилляционная опреснительная установка, блок испарителей-конденсаторов, парокомпрессор.

DEVELOPING RECOMMENDATIONS ON LAYOUT SOLUTIONS OF EVAPORATOR-CONDENSER UNIT OF DESALINATION PLANT

Research article

Lysenko Y.D.[1], Zvyagintsev V.A.[2], Lukachev S.V.[3,] *, Shimanova A.B.[4], Zakharov M.O.[5]

[1, 2, 3, 4, 5] Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia

* Corresponding author (viktor.urlapkin[at]gmail.com)

Abstract

Distillation desalination plants with mechanical vapor compression consist of several units including evaporators-condensers, a steam compressor, a preheating heat exchangers and a vacuum unit. In addition, the control system and power supply cabinets, water treatment units must be also included into the dimensions of the plant. All this leads to an increase in the size of the plant, which affects its mobility and manufacturability adversely. This article discusses the options for reducing the size of the plant by revising the layout solutions used in classic plants.

Keywords: Distillation desalination plant, evaporator-condenser unit, steam compressor.

Дистилляционная опреснительная установка с механической компрессией пара (рис. 1) представляет собой комплекс устройств, совместная работа которых позволяет вырабатывать дистиллят, выпаривая морскую воду. Эти устройства включают в себя парокомпрессор (ПК), испаритель-конденсатор (ИК), теплообменники предварительного подогрева, блоки вакуумирования, вводов антинакипина и биоцида [1].

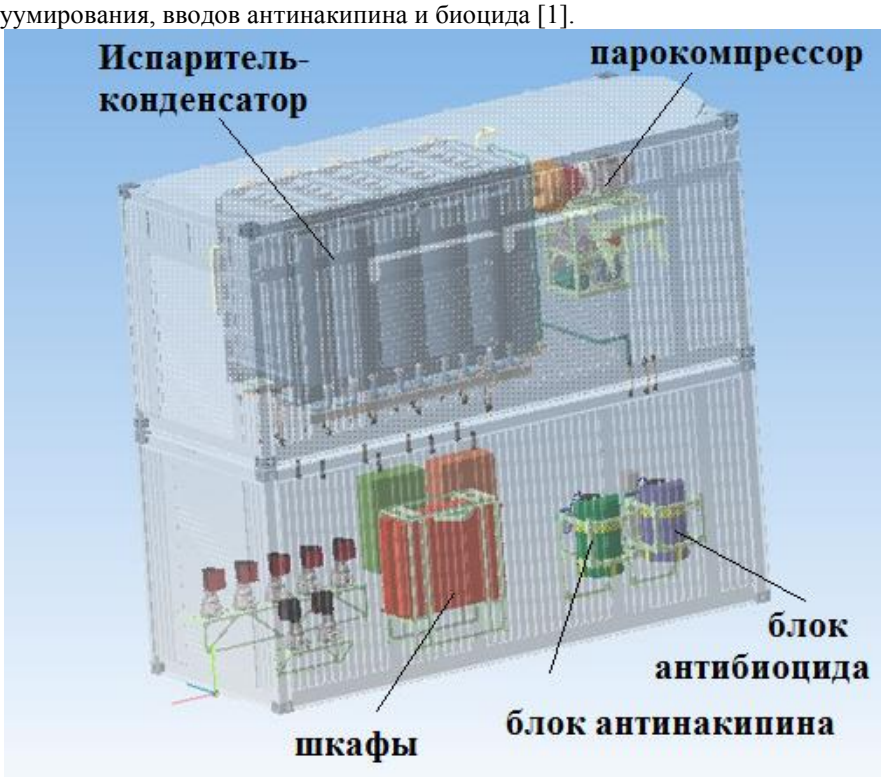


Рис.1 – Классическая компоновка дистилляционной опреснительной установки

Классическая компоновка установки предполагает двухблочное расположение установки, при котором в верхнем блоке располагается испаритель-конденсатор и парокомпрессор, в блоке под ним – гидро- и пневмосистемы, насосное оборудование, шкафы управления и электропитания, блоки вакуумирования, ввода антинакипина и биоцида (рис. 1). Подобная компоновка приводит к значительным продольным размерам установки, что отрицательно сказывается на мобильности установки, которая является одним из основных требований, предъявляемых к установками подобного класса [2].

Одним из путей повышения мобильности установки является уменьшение продольного размера установки за счет более рационального использования пространства имеющихся двух модулей.

В соответствии с предложениями [3], изложенными ранее, предлагается на рассмотрение конструктивная схема установки, отличающаяся в рабочем процессе тем, что имеется только одна секция ИК и парокомпрессор на основе вентилятора высокого давления.

Компоновочное решение предполагает использование проекта дистилляционной опреснительной установки, то есть 2 блока установленные один на другой. Верхний блок на весь свой объем включает испаритель-конденсатор, состоящий из каркаса с расположенными на нем панелями и комплекта труб. На верхнюю часть набора труб сливается вода, подогретая до температуры порядка 68 градусов, из теплообменника и блока подогрева. Нижняя часть выполнена в виде поддона, который примыкает к плоскостям стыка верхнего и нижнего блоков. Внутри поддона располагается сепаратор, через который производится отсос пара в парокомпрессор, расположенный в нижнем блоке. Выход парокомпрессора обеспечивается через патрубок в зону подачи пара на трубные решетки. Элементы, обеспечивающие функционирование установки, такие как насосы, фильтры и другие, располагаются в нижнем блоке по возможности в два-три уровня.

В качестве теплоизоляции ИК и ПК, а также трубопроводов и иных нагретых элементов может использоваться пенопласт, поролон и другие теплоизоляторы.

В предлагаемом варианте каркас верхнего блока предполагается выполнить в объеме и габаритах контейнера с учетом воздействия внешнего давления. При этом каркас ИК одновременно является силовым каркасом верхнего блока, что позволило максимально увеличить рабочую поверхность испарителя, которая, по предварительной оценке [4], превышает 2000 кв. метров. На этом основании с учетом возможностей соответствующего ПК может быть достигнута производительность до 12-15 метров кубических в час.

Размещение сепаратора в средней части поддона обеспечивает максимальное использование объемов блоков и позволяет сократить до минимума протяженность каналов хода пара до ПК. Из ПК пар подается в полость подачи пара, совмещенную с трубными решетками, и далее через трубки выходит в полость дистиллята, совмещенную с секцией обратного хода, которая открывается в объем, связанный с отсасывающей отработанный пар и воздух системой (эжектором или вакуум-насосом). Устройство теплорегулирования – теплообменник на входе и подогреватель в линии перекачки рассола работает аналогично стандартной схеме [5]. Отличием устройства подогрева является то, что нагреватели размещены в емкости, связанной с поддоном и перекачивающим насосом.

В предлагаемой конструкции используются решения из предыдущих в части выполнения соединений труб и трубных решеток ИК. Трубные решетки выполнены из листа толщиной в несколько миллиметров, вследствие чего может быть существенно снижена масса решеток. В отверстиях трубки установлены по свободной посадке, что позволяет существенно снизить трудоемкость сборочных работ. Позиционирование трубок может быть обеспечено с помощью, например, стопорных колец или применение уплотнительных колец, одетых на трубу и поджатых к трубной решетке посредством пружины со стопорными витками. Выбор варианта может быть определен по требованию герметичности [6].

Предлагается вместо оросительных трубок с отверстиями поставить рабочие трубки с вкладышами между ними, которые обеспечивают формирование пленки рассола на трубах второго-третьего ряда. Таким образом, может быть сформирована ванна приема и распределения рассола, в которую подается рассол по трубам большого сечения, чем и обеспечивается равномерное распределение рассола по поверхности верхнего ряда труб. Данное решение [7] позволяет увеличить количество труб за счет отказа от стабилизирующего течение рассола блока труб, применяющегося в стандартной конструкции. Ванны сверху герметично закрываются съемными панелями, воспринимающими внешнее давление и обеспечивающими необходимый тепловой режим за счет теплоизоляции.

Полости дистиллята и подачи пара с внешней стороны закрываются герметично съемными панелями, на которых снаружи закрепляется теплоизоляция. Конструкция панелей должна обеспечивать восприятие внешнего давления.

Торцевые стенки крепятся на сварке или герметично на механическом крепеже и также должны обеспечивать восприятие внешнего давления и соответствующий тепловой режим за счет теплоизоляции.

Каркас верхнего блока в совокупности должен обеспечивать возможность использования универсальных подъемно-транспортных средств (трейлеры, краны) [8].

Дно верхнего блока герметично соединяется по каркасу с поддоном, связанным с нижним блоком. Поддон, имеющий фланцевый разъем с дном каркаса верхнего блок, используется для приема рассола и размещения сепаратора, во внутренней части которого размещается воронкообразный приемник пара, связанный с ПК через фланцевый разъем. Поддон должен обеспечивать восприятие внешнего давления и соответствующий тепловой режим за счет теплоизоляции. Крепление сепаратора предполагается осуществлять на каркасе поддона. Сепаратор сверху прикрыт отбойником для уменьшения контакта пара и рассола. Эта задача решается совместно с отводом сливающегося с нижнего ряда труб рассола через сливной коллектор в виде желобов, расположенных под трубами. Пар проходит между желобов, а рассол стекает к боковым стенкам поддона.

Конструкция поддона должна обеспечивать подачу пара от ПК в соответствующую полость через ввод, а также обеспечить проход трубопроводов отсоса отработанного пара и воздуха и прохождение водоводов подачи рассола из поддона в подогреватель и далее от циркуляционного насоса в ванны приема и распределения рассола по верхнему ряду труб ИК.

Необходимо также обеспечить отбор дистиллята из полости конденсата после выхода пара из труб основных секций и обратной.

В нижнем блоке располагается ПК в виде вентилятора с электродвигателем. Вход вентилятора через патрубки с компенсаторами тепловых и упругих деформаций соединяется по фланцевому разъему с разъемом поддона и приемника пара. Выход вентилятора связан через компенсатор с профилированным патрубком подачи пара в полость распределения пара по входам труб ИК. Конфигурация фланца поддона в зоне патрубка должна обеспечивать доступ к местам его крепления с сохранением герметичности поддона. Конструкция вентилятора - парокомпрессора должна обеспечивать работоспособность при внутреннем давлении 0,2-0,3 атмосферы и соответствующую герметичность в узле входа в улитку вала электродвигателя [9]. В нижнем блоке размещаются насосы для подачи исходной воды через фильтры и теплообменники в поддон и насосы циркуляционные, связанные с емкостью подогрева рассола. Также внизу размещаются установки по подготовке и подаче в рассол растворов антинакипина и биоцида. Там же размещаются и насосы откачки отработанного рассола и дистиллята. Откачка производится через также расположенные в нижнем блоке теплообменники подогрева исходной воды. В нижнем блоке размещаются также компоненты эжектора для откачки отработанного пара и воздуха [10].

В нижнем блоке размещается также системы электропитания и управления. В блок имеется доступ для персонала через входную дверь. При возможности там же можно выделить место для хранения документации инструмента и рабочих веществ (антинакипин, биоцид, масла и другие).

Рассмотренная компоновка может быть применена при создании УВВ производительностью 5 кубических метров дистиллята в час или менее, что может повлечь за собой сокращение площади ИК соответствующим уменьшением габаритов и переноса поддона в объем верхнего блока. Соответствующим образом потребуется пересмотр модели ПК, а также типажа всех используемых компонентов, размещенных в нижнем блоке в связи со снижением потребной мощности и производительности. При проектировании установки необходимо принимать решения с учетом возможности выполнения транспортных операций в первую очередь в части массово-габаритных характеристик. В связи с этим следует рассмотреть возможности использования тонкостенных труб для ИК со стенкой порядка 0,2 мм из соответствующих материалов, поскольку по массе трубы составляют большую часть от массы верхнего блока.

Внешний вид предлагаемой компоновки установки представлен на рис. 2.

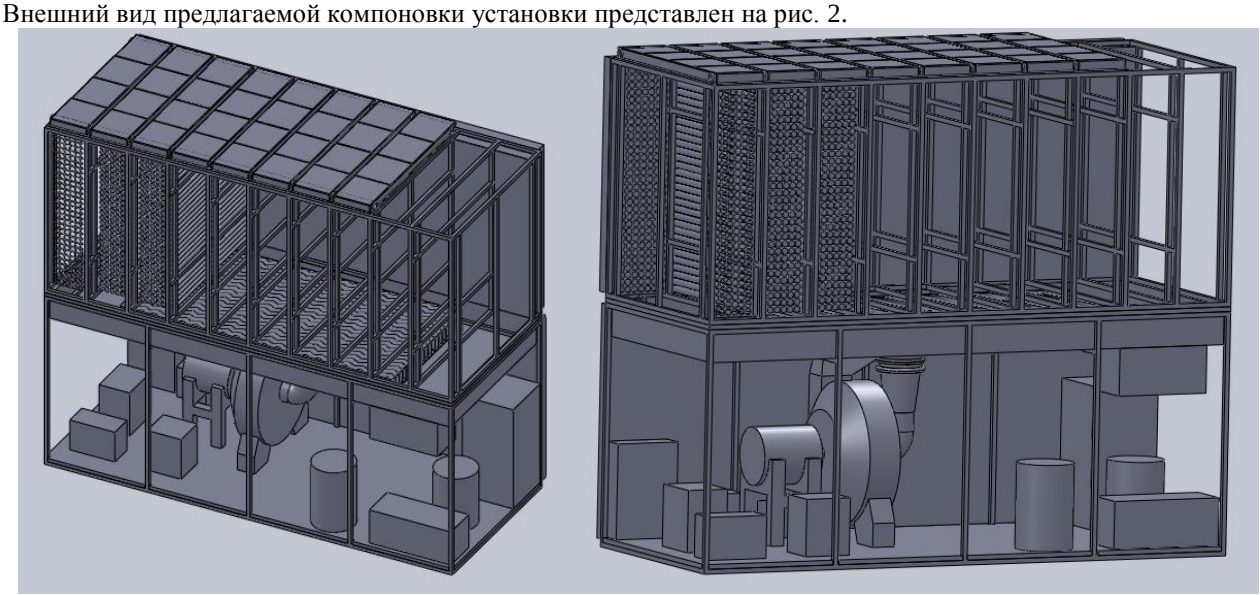


Рис. 2 – Внешний вид предлагаемой компоновки установки

Применение подобной схемы позволит значительно снизить продольные габариты установки, что положительно отразится на мобильности разрабатываемой установки.

Финансирование

Работа выполнена в организации Головного исполнителя НИОКТР при финансовой поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 по договору об условиях предоставления и использования субсидии от 01 декабря 2015 г. № 02.G25.31.0150.

Funding

The work was performed in the organization of the Chief Executive Officer of R & D with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the implementation of the Russian Federation Government Resolution No. 218 of April 9, 2010 under the agreement on the conditions for granting and using subsidies of December 01, 2015 No. 02.G25.31.0150.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список используемых источников / References

1. Бирюк В. В Проектирование стенда для испытания блока парокомпрессора опреснительной установки / В. В. Бирюк, А. А. Горшкалев, С. С. Корнеев и др. // Успехи современной науки, 2017 — Т. 1. № 12. — с. 176-179

2. Komarov O. V. Application of Optimization Techniques for New High-Turning Axial Compressor Profile Topology Design / O. V. Komarov, V. A. Sedunin, V. L. Blinov // ASME. – 2003. – Paper No. GT2014-25379

3. Белоусов А. Н. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / А. Н. Белоусов, Н. Ф. Мусаткин, В. М. Радько // - Самара: ФГУП “Издательство Самарский Дом печати”, 2003. – 336 с.

4. Ваняшов А. Д. Теория, расчет и конструирование компрессорных машин динамического действия: конспект лекций / А. Д. Ваняшов // – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 288 с.

5. Галеркин Ю. Б. Теория, расчет и конструирование компрессорных машин динамического действия / Ю. Б. Галеркин, К. В. Солдатова, В. И. Титенский // Санкт-Петербург - СПбГПУ, 2007. – 254 с.

6. Шнепп В. Б. Конструкция и расчет центробежных компрессорных машин / В. Б. Шнепп // –М.: Машиностроение, 1991 – 154 с.

7. Селезнев К. П. Центробежные компрессоры / К. П. Селезнев, Ю. Б. Галеркин // – Л.: Машиностроение,1982 – 183 с.

8. Министерство транспорта Российской федерации. Правила перевозки грузов в контейнерах морским транспортом // - Санкт-Петербург.: ЦНИИМФ, 1999

9. Батурин О. В. Численное исследование рабочего процесса в ступени центробежного компрессора: электрон. учеб. пособие / О. В. Батурин, Д. А. Колмакова, Л. С. Шаблий // М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

10. Dennis B. H. Parallel Thermoelasticity Optimization of 3-D Serpentine Cooling Passages in Turbine Blades / B. H. Dennis, I. N. Egorov, H. Sobieczky, G. S. Dulikravich, S. Yoshimura // ASME. – 2003. – Paper No. GT2003-38180

Список литературы на английском языке / References in English

1. Biryuk V. V Proektirovanie stenda dlya ispytaniya bloka parokompressora opresnitel'noj ustanovki [Design of a test bench for the desalination unit of a steam compressor unit] / V. V. Biryuk, A. A. Gorshkalev, S. S. Korneev and others// Uspekhi sovremennoj nauki [The successes of modern science], 2017 — T. 1. № 12. — P. 176-179 [in Russian]

2. Komarov, O. V. Application of Optimization Techniques for New High-Turning Axial Compressor Profile Topology Design / O. V. Komarov, V. A. Sedunin, V. L. Blinov // ASME. – 2003. – Paper No. GT2014-2537

3. Belousov A. N. Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin [Theory and calculation of aircraft scapular machines] / A. N. Belousov, N. F. Musatkin, V. M. Rad'ko // - Samara: FGUP “Izdatel'stvo Samarskij Dom pechati” [Publishing House of the Samara House of Printing], 2003. – 336 P. [in Russian]

4. Vanyashov A. D. Teoriya, raschet i konstruirovanie kompressornykh mashin dinamicheskogo dejstviya: konspekt lektsij [Theory, calculation and design of dynamic machines of compressor action: a summary of lectures] / A. D. Vanyashov // – Omsk: Izd-vo OmGTU [OmSTU Publishing House],2006. – 288 P. [in Russian]

5. Galerkin Yu.B. Teoriya, raschet i konstruirovanie kompressornykh mashin dinamicheskogo dejstviya [Theory, calculation and design of dynamic machine compressors] / Yu. B. Galerkin, K. V. Soldatova, V. I. Titenskij // Sankt-Peterburg - SPbGPU, 2007. – 254 P. [in Russian]

6. SHnepp V. B. Konstruktsiya i raschet tsentrobezhnykh kompressornykh mashin [Design and calculation of centrifugal compressor machines] / V. B. SHnepp // –M.: Mashinostroenie [M .: Mechanical engineering], 1991 – 154 P. [in Russian]

7. Seleznev K. P. TSentrobezhnye kompressory [Centrifugal Compressors] / K. P. Seleznev, Yu. B. Galerkin // – L.: Mashinostroenie [M .: Mechanical engineering],1982 – 183 P [in Russian]

8. Ministerstvo transporta rossijskoj federacii. Pravila perevozki gruzov v kontejnerah morskim transportom [Rules for the carriage of goods in containers by sea], Sankt-Peterburg, CNIIMF, 1999 [in Russian]

9. Baturin O. V. CHislennoe issledovanie rabochego protsessa v stupeni tsentrobezhnogo kompressora: ehlektron. ucheb. posobie [Numerical study of the working process in the stage of a centrifugal compressor: an electronic textbook] / O. V. Baturin, D. A. Kolmakova, L. S. SHablij // M-vo obrazovaniya i nauki RF, Samar. gos. aehrokosm. un-t im. S. P. Koroleva (nats. issled. un-t) [Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Samar. state. aerospace. un-t them. SP Koroleva (National Research University]. – EHlektron. tekstovye i graf. dan. [Electronic text and graphic data] - Samara, 2013. – 1 ehl. opt. disk [electronic optical disk] (CD-ROM) [in Russian]

10. Dennis B. H. Parallel Thermoelasticity Optimization of 3-D Serpentine Cooling Passages in Turbine Blades / B. H. Dennis, I. N. Egorov, H. Sobieczky and others // ASME. – 2003. – Paper No. GT2003-38180

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.025

ИЗМЕРИТЕЛЬ ФЛУКТУАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Научная статья

Яковенко С.В.[1,] *, Будрин С.С.[2], Швец В.А.[3]
[1] ORCID: 0000-0003-3784-9449,
[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский Океанологический институт им. В.И. Ильичева;
[2] ORCID: 0000-0001-7462-9459,
[2] Дальневосточного отделения Российской академии наук;
[3] ORCID: 0000-0002-4752-6865,
[3] Школа естественных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет»

* Корреспондирующий автор (ser_mail[at]poi.dvo.ru)

Аннотация

Описан погружной измеритель флуктуаций давления с возможностью автономной работы. Применение современных методов интерферометрических измерений, оптимизация конструкции прибора позволили получить высокую точность измерения колебаний давления в широком диапазоне частот. Наличие датчиков снаружи и внутри прибора позволяет проводить коррекцию графиков записи вариаций давления в зависимости от изменения температуры интерферометра и забортной воды. Измеритель может использоваться в вариантах с кабельным либо автономным питанием. Для обеспечения автономной работы разработан подключаемый к прибору контейнер, снабженный элементами питания, системами сбора и накопления информации.

Ключевые слова: измеритель флуктуаций давления, автономный интерферометр, подводная измерительная система, гидросфера, мониторинг гидродинамических процессов.

PRESSURE FLUCTUATION METER

Research article

Yakovenko S.V.[1,] *, Budrin S.S.[2], Shvets V.A.[3]
[1] ORCID: 0000-0003-3784-9449,
[1] Federal State Budgetary Institution of Science, Pacific Oceanological Institute named after V.I. Ilyichev;
[2]ORCID: 0000-0001-7462-9459,
[2] Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences;
[3] ORCID: 0000-0002-4752-6865,
[2] School of Natural Sciences of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "Far Eastern Federal University"

* Corresponding author (ser_mail[at]poi.dvo.ru)

Abstract

An immersion pressure fluctuation meter with autonomous operation is described in the paper. The use of modern methods of interferometric measurements, optimization of the device design made it possible to obtain a high accuracy of measuring pressure fluctuations in a wide frequency range. The presence of sensors outside and inside the device allows for the correction of graphs for recording pressure variations depending on changes in the temperature of the interferometer and outboard water. The meter can be used in versions with cable or autonomous power. In order to provide autonomous work, a container connected to the device, supplied with batteries, systems for collecting and accumulating information, has been developed.

Keywords: pressure fluctuation meter, autonomous interferometer, underwater measuring system, hydrosphere, monitoring of hydrodynamic processes.

При изучении различных гидрофизических процессов существенное значение имеют технические характеристики установок, применяемых для изучения природы их возникновения и развития. Стремление увеличить чувствительность, расширить рабочий частотный диапазон привело к тому, что интерферометры, ранее не использовавшиеся в подводных приборах из-за громоздкости и сложностей эксплуатации, появились в этой области измерительной техники. Современные достижения по созданию компактных моделей частотно-стабилизированных лазеров, электроники, трехмерного моделирования позволили создать приборы этого типа не выходя за рамки допустимых эксплуатационных характеристик по весу, габаритам и возможностям эксплуатации. В результате лазерно-интерференционный прибор для измерения вариаций давления получает широкие возможности по чувствительности, большому частотному диапазону присущие интерферометру, включенному в его конструкцию. Опыт создания приборов на основе лазерно-интерференционных методов получен нами ранее при работе над различными измерителями физических параметров геосфер [1]. Эти устройства измеряют в инфразвуковом и звуковом диапазонах с высокой точностью на уровне фоновых шумов. Это такие устройства, как лазерные деформографы [2], лазерные нанобарографы [3], лазерные измерители вариаций давления гидросферы [4], разработанные соответственно для измерения микросмещений верхнего слоя земной коры, вариаций атмосферного и подводного давления. При использовании этих приборов были получены новые данные о взаимодействии геосфер. Например, было установлено, что цуги волн давления в водной среде с периодами, лежащими в диапазоне 7÷13 мин, вызваны подобными же цугами волн в атмосферном давлении, а не короткопериодными внутренними морскими

волнами [5]. Комплексное использование этих уникальных приборов позволяет охватить большой спектр научных задач, связанных с изучением процессов взаимодействия геосфер. Для этого приборы объединяются в измерительные полигоны [6].

Применение лазерно-интерференционных измерителей вариаций давления [7] в научных исследованиях позволило накопить большой опыт работы с такими устройствами. Были даже созданы модификации с использованием разных источников излучения и компоновки прибора [8]. При этом было получено значительное количество интересных фундаментальных результатов [9]. Но также был выявлен ряд негативных особенностей этих приборов и их эксплуатации. Среди них следует отметить: 1) большие геометрические размеры и массу, что кроме неудобства эксплуатации приводит к неустойчивости интерференционной картины, 2) влияние изменения забортной температуры на показания интерферометра, 3) невозможность автономной работы, 5) невозможность подключения внешнего оборудования.

В связи с указанными недостатками, на основе конструкции лазерного измерителя вариаций давления гидросферы был создан новый прибор – измеритель флуктуаций давления (ИФД), рис. 1.

Рис. 1 – Фото ИФД в сборе (слева) и без герметичного корпуса (справа)

Конструкция существенно модернизирована, что позволило заметно повысить эксплуатационные характеристики прибора. Неизменным остался принцип действия, основанный на интерферометре Майкельсона, построенном по модифицированной схеме неравноплечего типа. Конструкция прибора схематически показана на рис. 2.

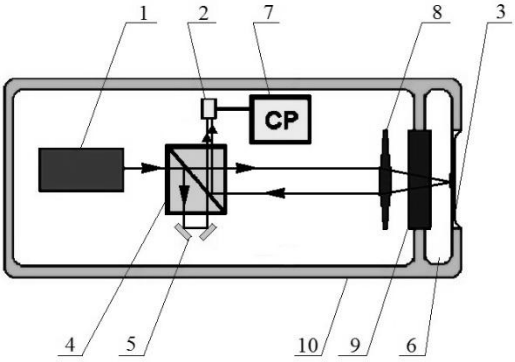


Рис. 2 – Оптико-механическая схема прибора:
1 – источник излучения; *2* – фотоприемник; *3* – мембрана с закрепленным на ней зеркалом; *4* – делительный кубик; *5* – пьезокерамические цилиндры компенсации и пробного сигнала; *6* – камера компенсации гидростатического давления; *7* – система регистрации; *8* – собирающая линза; *9* – гермоокно; *10* – герметичный корпус

В качестве источника излучения используется гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер MellesGriot, компактная модель.

Одно «плечо» интерферометра является эталонным. Луч, который распространяется по другому «плечу», проходит через зеркало, установленное на мембране в крышке прибора. Согласно оптико-механической схеме интерферометра, внешняя сторона мембраны 3 соприкасается с водой. Этот луч является, таким образом, измерительным. Сведение попадающих на делительную пластину 6 обоих лучей позволяет получить на пластине интерференционную картину переменной яркости, обусловленную изменением разности хода лучей. Изменение яркости регистрируется фотоприемником 2 системы регистрации 7, которая формирует управляющий сигнал на компенсацию разности хода лучей. Этот же сигнал является выходным и он же подается на один из пьезокерамических элементов 5 для возврата интерференции на экстремум. На второй элемент подается «пробный» (или поисковый) сигнал, который представляет собой гармонические колебания, обеспечивающие правильную системы экстремального регулирования.

В приборе применяется система компенсации гидростатического давления. Она необходима для выравнивания давления по обе стороны от мембраны, чтобы привести ее перед измерениями в нейтральное положение. При погружении прибора по команде открывается электромагнитный клапан, который пропускает воздух из специальной емкости в камеру небольшого объема между мембраной и основным пространством корпуса, отделенную от него прозрачным гермоокном 9. По окончании погружения клапан закрывается перед началом измерений. При подъеме прибора давление из компенсационной камеры стравливают обратно.

Оптимальное положение деталей прибора было получено в процессе трехмерного моделирования. Схема расположения компонентов измерительного комплекса приведена на рис. 3.

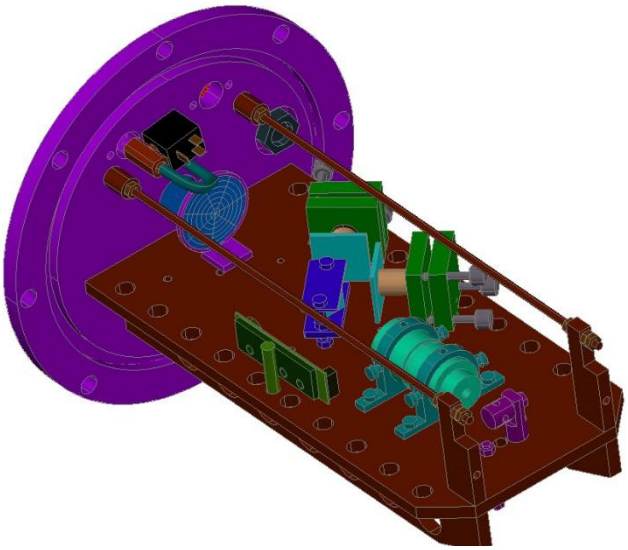


Рис. 3 – Трехмерная модель расположения оптико-механических компонентов

Оптическая скамья выполнена из нержавеющей стали, что в совокупности с расположенными по обеим сторонам ребрами усиления и стальными растяжками с верхней стороны увеличило жесткость этого элемента. Источник излучения располагается под оптической скамьей, откуда луч через отверстие выводится с помощью системы зеркал. Блоки питания прибора располагаются в отдельном объеме от оптико-механической части внутри корпуса прибора.

Среди дополнительного оборудования аппаратурной части следует упомянуть наличие измерителей температуры. На оптической скамье интерферометра, и снаружи прибора (в тонкостенном щупе-стержне, расположенном в районе мембраны) установлены датчики температуры на основе цифрового термометра DS18B20. Измерение температуры внутри прибора необходимо, поскольку вариации температуры могут вносить существенную погрешность в показания неравноплечего интерферометра. Разрешающая способность датчика при использовании 12-битной платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) составляет 0,0625°С.

Для грубого измерения забортного давления (например, для определения глубины установки прибора) предусмотрена возможность установки датчика давления. Для этого в крышке прибора имеется гермо-штуцер для установки тензопреобразователя избыточного давления D0.4-T. Предельно измеряемое давление датчика равно 0,8 МПа, что соответствует глубине погружения ~80 м, разрешающая способность составляет 90 Па, т.е. 0,01% от диапазона измеряемого давления. При необходимости работы на глубине более 80 м предусмотрена возможность быстрой замены датчика давления. Для согласования датчика с измерительной и регистрирующей частями оборудования используется измерительный усилитель с переменным коэффициентом усиления в диапазоне 5÷4001.

На крышке прибора установлен герметичный разъем, предназначенный для дополнительного оборудования. Это универсальный интерфейс, на который выделено отдельное питание и линия передачи данных. В частности, измеритель может работать совместно с флуориметром ECO FL, предназначенным для определения биологических характеристик воды, в частности содержания хлорофилла-а. Этот датчик позволяет проводить измерения в диапазоне 0÷125 мкг/л с разрешением 0,02 мкг/л.

В работе интерферометра используется система регистрации интерференционного измерителя вариаций давления [10] с некоторыми модификациями. Изменения коснулись улучшения характеристик цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), теперь установлена модель 14 бит. В системе регистрации используется принцип удержания интерференции на уровне максимальной яркости. Это обеспечивается рабочим органом системы регистрации – компенсирующей пьезокерамикой, которая перемещает свой незакрепленный конец с установленным на нем зеркалом, с постоянной скоростью, удерживая интерференцию на экстремуме. Для определения направления смещения от положения экстремума вторая пьезокерамика вводит в оптический сигнал искусственное гармоническое возмущение с частотой 100 кГц – сигнал «раскачки», являющийся пробным или поисковым. Для рассматриваемой системы с постоянной скоростью перемещения рабочего органа обратной связи (компенсирующей пьезокерамики) связь между максимальной скоростью v перемещения рабочего органа системы регистрации, частотой f пробного (поискового) сигнала, длиной волны λ излучения лазера и разрядностью N ЦАП, можно описать выражением:

$$v = \frac{\lambda f}{2^N} \tag{1}$$

Из (1) следует, что с повышением разрядности необходимо повышать и частоту поискового сигнала. В разработанном приборе частота поискового сигнала составляет 100 кГц, что в четыре раза выше, чем в ранее созданных системах. При условии, что динамический диапазон усилителя, управляющего рабочим органом системы регистрации, не уже, чем у ЦАП, максимальная точность измерения перемещений мембраны измерителей давления составляет $0.75\lambda / (2^{N-1})$ или 0,06 нм.

Давление, которое регистрирует измеритель вариаций давления гидросферы, оборудованный описанной регистрирующей системой, можно рассчитать по формуле, описывающей поведение закрепленной по краям плоской мембраны [11]:

$$P = \frac{\Delta l \cdot 16h^3 E}{3\left(1-\sigma^2\right)R^4} \qquad (2)$$

Здесь Δl – смещение мембраны; h – толщина мембраны; E – модуль Юнга; σ – коэффициент Пуассона; R – радиус мембраны. В измерителе могут быть использованы мембраны, изготовленные из листа нержавеющей стали толщиной 0,1; 0,5; 1; 2 мм. В испытаниях использована мембрана толщиной 1 мм. Подставляя в (2) следующие значения: R = 5 см, h = 1 мм, E = 2,1·1011 Н/м2, σ = 0,25 и Δl = 0.06 нм, получим, что разрешение измерителя по давлению составляет P = 11,5 мПа. При этом, с точки зрения частотных характеристик, система способна регистрировать вариации давления в диапазоне частот от самых низких (близких к нулевым) до 1000 Гц.

Передача показаний прибора на береговую станцию по кабельной линии удобно лишь при небольших дистанциях от берега, подготовленной инфраструктуре, береговой черте без крутых склонов и скал. Все это сильно усложняет установку и эксплуатацию системы, а проведение измерений на дистанциях более 500 м от береговой черты так и вовсе становится практически невозможным. Поэтому обеспечение возможности автономной работы лазерно-интерференционного комплекса – необходимость. Однако, как показал анализ, переход на полностью автономную работу с размещением в корпусе прибора средств регистрации и источников питания (которые ранее располагались на берегу) оказался не целесообразным. Хотелось сохранить достигнутые характеристики веса и размера прибора. Кроме того, при проведении измерений вблизи береговой черты, использование кабельных линий вполне оправданно отсутствием ограничений по энергопотреблению, продолжительности времени работы, возможности мгновенного получения любого объема информации, регистрируемой датчиками, упрощением телеметрии.

Чтобы сохранить все эти преимущества и обеспечить возможность работы как с использованием кабельной линии, так и без нее, был разработан универсальный контейнер автономизации гидрофизических приборов. В состав контейнера входят батареи питания (литий-ионные элементы питания 4S мощностью до 7965 Вт·ч), блоки согласования и стабилизации параметров электрических цепей, а также микрокомпьютер с твердотельным накопителем для записи информации, поступающей из прибора. Контейнер подключается к герметичному разъему прибора, который используется для берегового кабеля. Расчетное время автономной работы прибора составляет более 6 суток, что с учетом значительности потребления энергии газовым лазером, системы регистрации, измерителями давления и температуры и системами связи, работающими на высоких частотах, является очень хорошим показателем. Испытания работы контейнера автономизации гидрофизических приборов в течение 145 ч продемонстрировали работоспособность данного устройства. На рис. 4 приведен участок записи, демонстрирующий колебания давления при ветровом волнении. По оси ординат – напряжение на выходе системы регистрации, пропорциональное измеряемому давлению. Коэффициент пересчета 0,25В/Па. По оси абсцисс – время. Глубина установки прибора 12 м.

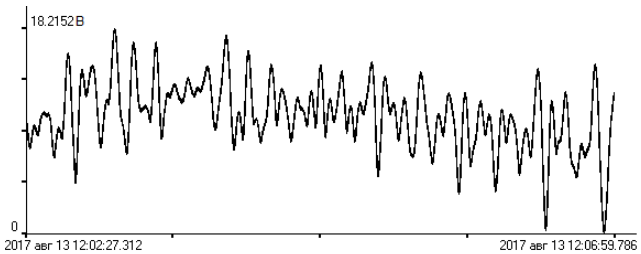


Рис. 4 – Пример записи ИФД

Напомним, что установленные в приборе цифровые датчики температуры позволяют проводить корректировку показаний интерферометра с учетом вариаций температуры. Это очень важно, поскольку изменение температуры внутри прибора приводит к изменению длины эталонного «плеча» вследствие теплового расширения деталей интерферометра. Внешний датчик дает информацию о поле температуры снаружи прибора. В данной модели прибора требуется корректировка выходного сигнала системы регистрации интерферометра на -3,305 В на каждый шаг измерения термодатчика, т.е. на 0,0625°С. Значение напряжения было подобрано эмпирическим путем при проведении тестов. Функция коррекции показаний интерферометра была включена в программное обеспечение обработки измерений.

Испытания разработанного ИФД прошли успешно и прибор может быть использован для научных исследований. Использование данного оборудования позволяет решать задачи по изучению амплитудно-фазовых вариаций колебаний давления, температуры и других параметров в гидросфере в широком частотном диапазоне.

Финансирование

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ, грант № 14-50-00034.

Funding

This work was carried out with partial financial support from the Russian Science Foundation, grant number 14-50-00034.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Долгих Г. И. Лазеры. Лазерные системы / Г. И. Долгих, В. Е. Привалов. Владивосток: Дальнаука, 2009.
2. Долгих Г. И. Лазерный деформограф с точностью на уровне пикометров / Г. И. Долгих, С. Г. Долгих, В. В. Овчаренко и др. // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 2. С. 138-139.
3. Долгих Г. И. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении баро-деформационного взаимодействия / Г. И. Долгих, С. Г. Долгих, С. Н. Ковалев и др. // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82.
4. Долгих Г. И. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы / Г. И. Долгих, С. Г. Долгих, С. Н. Ковалев и др. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 56137.
5. Долгих Г. И. Морские внутренние волны и атмосферные депрессии / Г. И. Долгих, С. С. Будрин, С. Г. Долгих и др. // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. №5. С. 601.
6. Долгих Г. И. Комплексный пространственно-разнесённый полигон на Дальнем Востоке для геонаблюдений / Г. И. Долгих, С. С. Будрин, С. Г. Долгих и др. // Измерительная техника. 2016. №3, с. 34-36.
7. Долгих Г. И. Лазерно-интерференционные системы измерения распределения гидростатического давления / Г. И. Долгих, С. С. Будрин, С. Г. Долгих и др. // Подводные исследования и робототехника. 2011. №1(11). С. 49-58.
8. Долгих Г. И. Лазерный гидрофон на основе зеленого лазера LCM-S111 / Г. И. Долгих, С. Г. Долгих, В. А. Чупин и др. // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 140-141.
9. Долгих Г. И. Связь сверхнизкочастотных и низкочастотных вариаций гидросферного давления с уровнем микродеформаций земной коры / Г. И. Долгих, С. Г. Долгих, В. А. Чупин и др. // Сборник трудов XX сессии РАО. М.: ГЕОС. 2008. Т. 2. С. 435-437.
10. Долгих Г. И. Цифровая система регистрации лазерно-интерференционных установок / Г. .И. Долгих, С. Н. Ковалев, В. А. Швец и др. // Приборы и техника эксперимента. 2008. №5. С.158-159.
11. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука. 1987. 246 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dolgikh G. I. Lazery. Lazernyye sistemy [Lasers. Laser Systems] / G. I. Dolgikh, V. E. Privalov. Vladivostok: Dal'nauka, 2009. [In Russian]
2. Dolgikh G. I. Lazernyy deformograf s tochnost'yu na urovne pikometrov [Laser Deformograph with Accuracy at Level of Picometers] / G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh, V. V. Ovcharenko, etc. // Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and Experimental Technique] 2013. No. 2. P. 138-139. [In Russian]
3. Dolgikh G. I. Lazernyy nanobarograf i yego primeneniye pri izuchenii baro-deformatsionnogo vzaimodeystviya [Laser Nanobarograph and Its Application in Study of Baro-deformation Interaction] / G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh, S. N. Kovalev, etc. // Fizika Zemli [Fizika Zemli] 2004. No. 8. P. 82. [In Russian]
4. Dolgikh G. I. Lazernyy izmeritel' variatsiy davleniya gidrosfery [Laser Gauge for Variations in Pressure of Hydrosphere] / G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh, S. N. Kovalev et al. // PTE. 2005. No. 6. P. 56137. [In Russian]
5. Dolgikh G. I. Morskiye vnutrenniye volny i atmosfernyye depressii [Sea Internal Waves and Atmospheric Depressions] / G. I. Dolgikh, S. S. Budrin, S. G. Dolgikh, etc. // Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]. 2015. V. 462. No.5. P. 601. [In Russian]
6. Dolgikh G. I. Kompleksnyy prostranstvenno-raznesonnyy poligon na Dal'nem Vostoke dlya geonablyudeniy [Complex of Spatially Separated Polygon in Far East for Geoobservations] / G. I. Dolgikh, S. S. Budrin, S. G. Dolgikh, etc. // Izmeritel'naya tekhnika [Measuring equipment]. 2016. No.3, P. 34-36. [In Russian]
7. Dolgikh G. I. Lazerno-interferentsionnyye sistemy izmereniya raspredeleniya gidrostaticheskogo davleniya [Laser-Interference Systems for Measuring Distribution of Hydrostatic Pressure] / G. I. Dolgikh, S. S. Budrin, S. G. Dolgikh, etc. // Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika [Underwater Studies and Robotics]. 2011. No. 1 (11). P. 49-58. [In Russian]
8. Dolgikh G. I. Lazernyy gidrofon na osnove zelenogo lazera LCM-S111 [Laser Hydrophone Based on a Green Laser LCM-S111] / G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh, V. A. Chupin et al. // Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and experimental techniques]. 2013. No. 5. P. 140-141. [In Russian]
9. Dolgikh G. I. Svyaz' sverkhnizkochastotnykh i nizkochastotnykh variatsiy gidrosfernogo davleniya s urovnem mikrodeformatsiy zemnoy kory [Connection of Ultralow-Frequency and Low-Frequency Variations of Hydrospheric Pressure with Level of Microdeformations of Earth's Crust] / G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh, V. A. Chupin, etc. // Sbornik trudov XKH sessii RAO. [Collected Works of the XX session of the RAS] M.: GEOS. 2008. V. 2. S. 435-437. [In Russian]
10. Dolgikh G. I. Tsifrovaya sistema registratsii lazerno-interferentsionnykh ustanovok [Digital Registration System of Laser-Interference Installations] / G. I. Dolgikh, S. N. Kovalev, V .A. Shvets, et al. // Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]. 2008. No. 5. P.158-159. [In Russian]
11. Landau L. D. Teoreticheskaya fizika. T. VII. Teoriya uprugosti [Theoretical Physics. V. VII. Theory of Elasticity] / L. D. Landau, E. M. Lifshits. M.: Science. 1987. 246 p. [In Russian]

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / CHEMISTRY

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.026

СТЕРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ В ТРЕХСТАДИЙНОМ СИНТЕЗЕ ПОЛОВОГО ФЕРОМОНА КОМНАТНОЙ МУХИ (*MUSCA DOMESTICA* L.) ЦИС-9-ТРИКОЗЕНА

Научная статья

Падалка С.Д.[1, *], Фотина Н.С.[2], Подварко А.Т.[3], Беседина Е.Н.[4], Балахнина И.В.[5], Савва А.П.[6], Есипенко Л.П.[7]

[1] ORCID: 0000-0001-8478-5332;
[2] ORCID: 0000-0001-9253-8999;
[3] ORCID: 0000-0002-2709-3425;
[4] ORCID: 0000-0002-9976-5614;
[5] ORCID: 0000-0002-2326-221x;
[6] ORCID: 0000-0003-1159-9197;
[7] ORCID: 0000-0002-9457-2223,

[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений, Краснодар, Россия

[*] Корреспондирующий автор (scientistchem[at]inbox.ru)

Аннотация

Комнатная муха Musca domestica L относится к синантропным насекомым и представляет большую опасность для здоровья человека и домашних животных. Половые феромоны насекомых активно используются для разработки и создания эффективных средств защиты. Изучен нетривиальные подходы тонкого органического синтеза, позволяющий сократить количество стадий при получении феромонов. Опробован трехстадийный подход к синтезу цис-9-трикозена, полового феромона комнатной мухи Musca domestica L [1, С. 2792]. Осуществлен синтез (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата и изучены его физико-химические свойства. Проведен анализ стерических препятствий при получении кетонов из сложных эфиров и реактивов Гриньяра.

Ключевые слова: цис-9-трикозен, половой феромон комнатной мухи, *Musca Domestica* L., мускалюр, реактив Гриньяра, (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоат, цис-14-трикозен-6-он.

STERIC ASPECT IN THREE-STAGE SYNTHESIS OF SEX PHEROMONE OF HOUSEFLY (*MUSCA DOMESTICA* L.) CIS-9-TRICOZENE

Research article

Padalka S.D.[1, *], Fotina N.S.[2], Podvarko A.T.[3], Besedina E.N.[4], Balakhnina I.V.[5], Savva A.P.[6], Yesipenko L.P.[7]

[1] ORCID: 0000-0001-8478-5332;
[2] ORCID: 0000-0001-9253-8999;
[3] ORCID: 0000-0002-2709-3425;
[4] ORCID: 0000-0002-9976-5614;
[5] ORCID: 0000-0002-2326-221x;
[6] ORCID: 0000-0003-1159-9197;
[7] ORCID: 0000-0002-9457-2223.

[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] FSBU All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

* Corresponding author (scientistchem[at]inbox.ru)

Abstract

The housefly Musca domestica L is a synanthropic insect and is very dangerous to human health and pets. Sex pheromones of insects are actively used to develop and create effective means of protection. The article studies non-trivial approaches of fine organic synthesis, which allows reducing the number of stages in the preparation of pheromones. A three-stage approach to the synthesis of cis-9-tricozenes, the sex pheromone of the housefly Musca domestica L, was tested [1, P. 2792]. Synthesis of (quinolin-8-yl) -cis-9-octadecenoate is carried out and its physicochemical properties are studied. The analysis of steric hindrances in the preparation of ketones from esters and Grignard reagents was conducted.

Keywords: cis-9-tricozenes, sex pheromone of the housefly, *Musca Domestica* L., muscular, Grignard reagent, (quinolin-8-yl) -cis-9-octadecenoate, cis-14-tricozene-6-on.

Половые феромоны насекомых являются видоспецифичными биологически активными веществами, вызывающими у воспринимающих их особей этого же вида специфическую ответную реакцию. У большинства насекомых зрительная информация гораздо меньше влияет на поведение, чем химическая коммуникация. Это открывает возможности управления поведением насекомых с помощью химических соединений определенной структуры, половых феромонов. Актуально разрабатывать методы получения и осуществлять синтез этих соединений [2, С. 5], [3, С. 63]. Как правило, феромоны насекомых представляют собой достаточно летучие не токсичные органические соединения, действующие на расстоянии до нескольких сотен метров от источника запаха. Поэтому половые феромоны используются как эффективные аттрактанты в феромонных ловушках против фредных насекомых.

В 1971 г. Карлсоном был выделен и идентифицирован половой феромон комнатной мухи *Musca domestica* L., цис-9-трикозен (мускалюр) [4, С. 77]. Испытания мускалюра показали его аттрактивную способность [5, С. 555]. В настоящее время это вещество широко используется как инсектицид в средствах дезинсекции.

В литературе описаны различные подходы к синтезу мускалюра [8, С. 2049], [9, С. 1723], [10, С. 628], [11, С. 718], [12, С. 3971]. Мы изучали описанную японскими учеными трехстадийную схему синтеза [1, С. 2792], которая заключалась в синтезе сложного эфира (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоат, получении пентилмагнийбромида и их сочетании с последующим восстановлением в цис-9-трикозен гидразингидратом (рис. 1). Была проведена методика низкотемпературного синтеза цис-14-трикозен-6-она и исследованы продукты этой реакции.

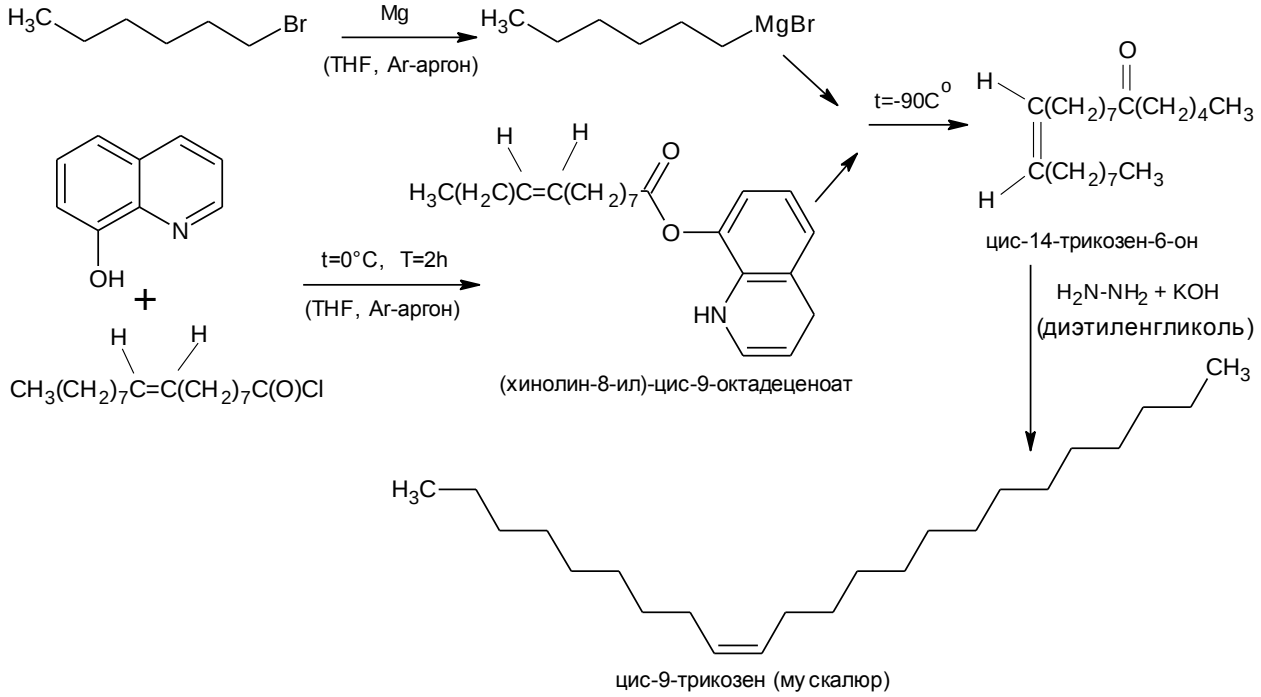


Рис. 1 – Трехстадийная схема синтеза цис-9-трикозена (мускалюра)

С помощью вакуумной перегонки было выделено 7.2 г бесцветной жидкости. Идентичность вещества по ИК спектру, записанному в жидкой пленке, соответствует олеиновой кислоте. Кубовый остаток, представляющий собой третичный спирт, перегнать при 1.2 мм рт. ст. не удалось.

В ИК спектре валентному колебанию карбонильной группы олеиновой кислоты соответствует интенсивное поглощение при 1709 см$^{-1}$ без расщепления полосы; около 3000 см$^{-1}$ наблюдаются колебания алифатического углеродного скелета, а выше 3000 см$^{-1}$ колебания двойной цис-связи. В сложном эфире (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоате поглощение карбонильной группы смещается до 1763 см$^{-1}$ (рис. 2). В 1Н ЯМР спектре (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата наблюдаются полосы поглощения алифатических и ароматических ядер. В области 5-6 м.д. имеются пики, относящиеся к этиленовой системе. Значение константы спин-спинового взаимодействия $^{3}J_{HH}$, которой составило 10,16 Гц, что подтверждает цис-геометрию двойной связи.

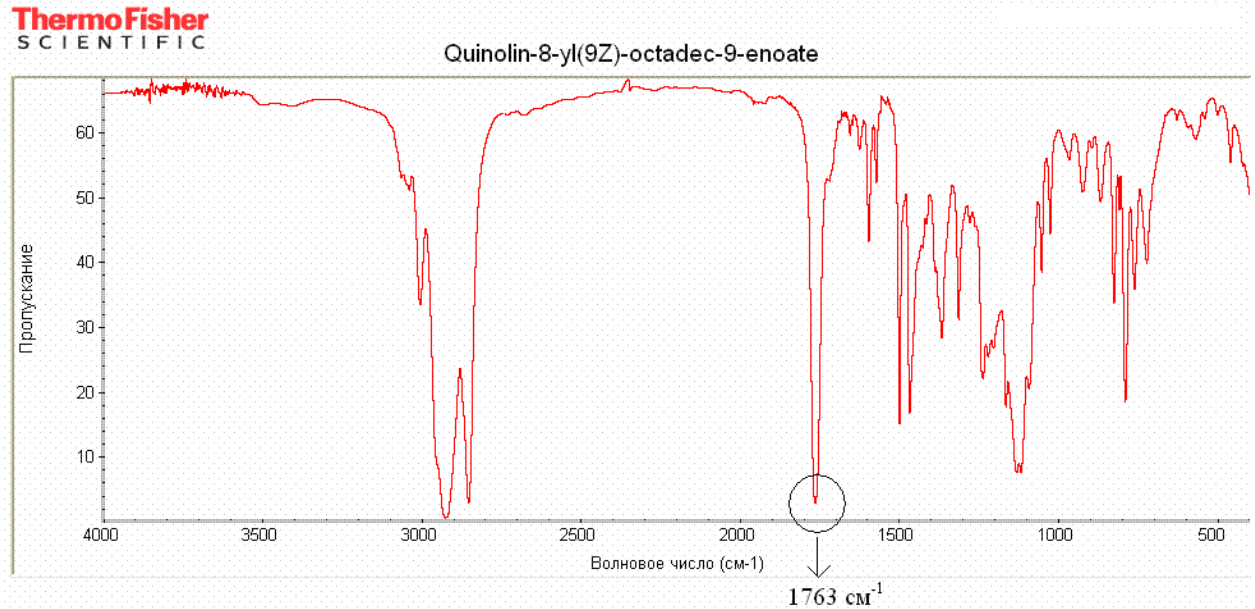


Рис. 2 – ИК спектр (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата

Таким образом, низкотемпературной реакцией взаимодействия (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата с пентилмагнийбромидом были получены: олеиновая кислота, 8-пентилхинолин и соответствующий третичный спирт. Эти данные соотносятся с открытой Шлоссером реакцией аллильных ацетатов с реактивом Гриньяра.

Действительно, нормальная реакция сложных эфиров с реактивами Гриньяра приводит к получению третичных спиртов и является синтетическим методом. Для завершения реакции на 1 моль сложного эфира требуется 2 моль магнийорганического соединения. Использование реактивов Гриньяра для синтеза кетонов из сложных эфиров сильно ограничено из-за высокой электрофильности углерода в кетоне и доступности этого реакционного центра в реакции. Все это, как правило, приводит к образованию третичных спиртов [13, С. 750]. Поэтому в реакцию вводят стерически затрудненные сложные эфиры. Под стерическим затруднением следует понимать доступность карбонильного центра для соответствующего нуклеофильного реагента. Сложный эфир, (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоат, по мнению японских авторов, является стерически затрудненным [1, С. 2792]. Способы создания стерического затруднения в сложных эфирах были детально изучены нами в нашей работе. Собранный литературный материал позволил выявить, что под стерическим затруднением чаще всего понимают наличие заместителей в сложном эфире со стороны кислотного остатка [14, С. 5], [15, С. 450], [16, С. 2875], [17, С. 3444], [18, С. 804], [19, С. 1162], [20, С. 2362]. Отличие стерически затрудненных сложных эфиров от нормальных сложных эфиров заключается в том, что они могут останавливать реакцию взаимодействия реактива Гриньяра на стадии образования кетона.

В литературе описаны способы получения ароматических, алициклических и разветвленных алифатических кетонов. Выходы кетонов находятся в районе 30-70%. Порядок добавления реагентов и понижение температуры до -15°С незначительное влияние на выходы кетонов [30, С. 1137], [31, С.3368], [32, С. 1749], [33, С. 608], [34, С. 255]. Не имеет большого значения, где находится стерическое затруднение: в реактиве Гриньяра или со стороны карбонильной группы. В нашем случае, для получения неразветвленной алифатической цепи стерическое затруднение должно было находиться в сложном эфире со стороны спиртового, или феноксильного остатка.

Таким образом, для изучения возможности синтеза цис-9-трикозен-6-она был синтезирован (хинолин-8)-ил-цис-9-октадеценоат; доказано его строение; осуществлено низкотемпературное взаимодействие с реактивом Гриньяра. Реакция идет по схеме (рис. 3):

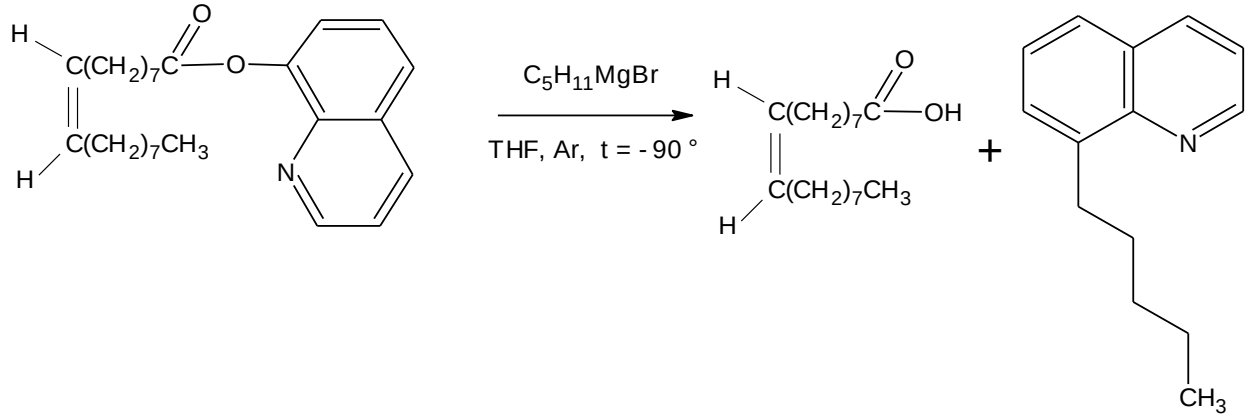


Рис. 3 – Низкотемпературное взаимодействие (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата с пентилмагнийбромидом

Синтез (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата

В трехгорлую колбу на 500 мл, оборудованную механической мешалкой, капельной воронкой с байпасной трубкой, подводом сухого аргона и гидравлическим затвором на вазелиновом масле поместили 200 мл абсолютного тетрагидрофурана, в котором при перемешивании было растворено 23,9 г (0,2 моль) 8-оксихинолина. Полученный желтый раствор охладили внешней баней до 0 °С; одной порцией добавили 9,6 г (0,2 моль) мелкогранулированного гидроксида натрия. В посветлевший раствор, поддерживая температуру около 0 °С, прикапали 66,2 мл (60,2 г, 0,2 моль) хлорангидрида олеиновой кислоты. Реакционная масса на некоторое время загустевает так, что ее становится трудно размешивать; при дальнейшем добавлении хлорангидрида происходит однородное смешивание; перемешивают 1 час при 0 °С и, не убирая баню, оставляют стоять на ночь. На следующий день реакционную массу вылили в воду со льдом и трижды экстрагировали диэтиловым эфиром. Органические фазы объединили, промыли 1 %-ным водным раствором гидроксида натрия и 100 мл насыщенного раствора хлорида натрия. Высушили над безводным Na_2SO_4. Растворитель был отогнан на роторном испарителе, повышая вакуум до 1 мм рт. ст., что привело к 59,3 г жидкости цвета заваренного чая. Выход сырого вещества составил 72 %. Наличие сложноэфирной связи было доказано по ИК, а присутствие ароматического и алифатического остатков - по ^{1}Н ЯМР спектрам. Отдельно записаны ^{1}Н и ^{13}С ЯМР спектры в областях δ для непредельной цис-связи.

Низкотемпературное взаимодействие (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата с пентилмагнийбромидом.

В трехгорлую колбу, оборудованную механической мешалкой с затвором, капельной воронкой с байпасом, подводом аргона и охлаждающей баней с гексаном, поместили 19,9 г (0,048 моль) (хинолин-8-ил)-цис-9-октадеценоата в 80 мл абсолютного дихлорметана. При интенсивном перемешивании охладили до -90°С и по каплям прибавили раствор пентилмагнийбромида, полученный из 8,13 мл (9,9 г, 0,066 моль), 1,76 г (10%-ый избыток по молям) в 66 мл абсолютного диэтилового эфира. Реакционную массу оставили на ночь нагреваться до комнатной температуры. Прозрачный раствор слили с желтоватых твердей, промыли 1 М раствором соляной кислоты и высушили над безводным сульфатом натрия. Удаление растворителя на роторном испарителе и разгонка в вакууме позволила получить масло m=7,2 г с $T_{кип.}$=171-177°С при 0,8 мм рт. ст. ИК спектр синтезированного вещества полностью соответствует олеиновой кислоте.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Abe K. The Studies of the Activated Compound. III. A Synthesis of Muscalure:(Z)-9-Tricosene / K. Abe, T. Yamasaki, N. Nakamura, T. Sakan // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 1977. – V. 50. – №. 10. – P. 2792.

2. Одиноков В. Н. Синтез феромонов насекомых / В. Н. Одиноков, Э. П., Серебряков // Уфа: Гилем. – 2001. –372 с.

3. Падалка С. Д. Синтез геранилбутирата и применение его для борьбы с проволочником на посевах пропашных, овощных и бахчевых культур / С. Д. Падалка, Н. С. Фотина, В. Я. Исмаилов // Национальная ассоциация ученых (НАУ): ежемесячный научный журнал. - 2015. - № 9. - Ч. 4. - С. 61-64.

4. Carlson D. A. Sex attractant pheromone of the house fly: isolation, identification and synthesis / D. A. Carlson et al. // Science. – 1971. – V. 174. – №. 4004. – P. 76-78.

5. Carlson D. A. evaluations of (Z)-9-tricosene, a sex attractant pheromone of the house fly / D. A. Carlson, M. Beroza // Environmental Entomology. – 1973. – V. 2. – № 4. – P. 555-560.

6. Odinokov V. N. Insect pheromones and their analogues. XIV. The synthesis of muscalure as a sex pheromone of *Musca domestica*. / V. N. Odinokov, G. Y. Ishmuratov, G. G. Balezina and others // Khim. Prir. Soed. - 1985. - V. 21. - № 3. - P.401-403.

7. Verba G. G. Synthesis of muscalure – the pheromone of *Musca Domestica*. / G. G. Verba, V. S. Abdukakharov, A. A. Abdukakhabov // Khim. Prir. Soed. - 1975. - V. 21. - № 5. - P. 698-700.

8. Kovalev B. G. Synthetic studies of attracting substances (sexual attractants) of insects. III. Convenient method of preparing higher dialkylacetylenes. Synthesis of muscalure, the attractant of the housefly *Musca Domestica* L. / B. G. Kovalev, V. V. Stan, T. K. Antoch, V. P. Konyukhov, S. F. Nedopekina // Zh. Org. Khim. - 1977. - V. 13. - № 10. - P. 2049-2052.

9. Naoshima Y. Convenient synthesis of muscalure, the housefly sex pheromone. / Y. Naoshima, H. Ozawa, Y. Takenami and others // Agril. Biol. Chem. - 1981. - V. 45. - № 7. - P. 1723-1724.

10. Kim M. Practical and scalable synthesis of (Z)-9-tricosene, the housefly sex pheromone. / M. Kim, A. Pitchaiah, N-J. Park and others // Letters in Org. Chem. - 2012. - V. 9. - № 9. - P. 628-631.

11. Dhillon R. S. Pheromones via organoboranes. IV. Synthesis of (Z)-9-tricosene (muscalure). / R. S. Dhillon, R. P. Singh // Ind. J. Chem. - 1995. - V. 34B. - P. 718-721.

12. Cargill R. L. Synthesis of the housefly sex attractant. / R. L. Cargill, M. G. Rosenblum // J. Org. Chem. - 1972. - V. 37. - № 24. - P. 3971.

13. Gilman H. The reaction between carboxylic acid halides and organomagnesium halides / H. Gilman, R. E. Fothergill, H. H. Parker // Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas. - 1929. - V. 48. - № 7. - P. 748-751.

14. Бартон С. Д. Общая органическая химия: в 12-ти т. Карбоновые кислоты и их производные. Соединения фосфора / С. Д. Бартон, В. Д. Оллис. - М.: Химия, 1983. - 728 с. – 4 т.

15. Huet F. Formation d'enolates cetoniques par action d'organomagnesiens mixtes dans l'hexamehylphosphorotriamide sur des esters / F. Huet, G. Emptoz, A. Jubier // Terahedron. - 1973. - V. 29. P. 479-485.

16. Arnold R. T. Mechanism of the reaction between hindered carbonyl compounds and the Grignard reagent / R. T. Arnold, R. W. Liggett // J. Am. Chem. Soc. - 1942. - V. 64. - № 12. - P. 2875-2877.

17. Arnold R. T. Resonance and the hindered carbonyl-Grignard reaction / R. T. Arnold, H. Bank, R. W. Liggett // J. Am. Chem. Soc. - 1941. - V. 63. - № 252. - P. 3444-3446.

18. Smith L. I. The enolizing action of methylmagnesium iodide upon hindered ketones / L. I. Smith, C. Guss // J. Am. Chem. Soc. - 1937. - V. 59. - № 5. - P. 804-806.

19. Gilman H. Metallic derivatives of acetomesitylene / H. Gilman, R. G. Jones // J. Am. Chem. Soc. - 1941. - V. 63. - № 4. - P. 1162-1163.

20. Fuson R. C. Reactions of bromomagnesium enolates of mesityl ketones. II. Condensation / R. C. Fuson, W. O. Fugate, C. H. Fisher // J. Am. Chem. Soc. - 1939. - V. 61. - № 9. - P. 2362-2365.

21. Fuson R. C. The reduction of mixed hindered benzils / R. C. Fuson, P. E. Hoch // J. Am. Chem. Soc - 1949. - V. 71. - № 5. - P. 1585-1586.

22. Ross W. E. The action of methylmagnesium bromide on 2,4,6-trichlorobenzoyl chloride / W. E. Ross, R. C. Fuson // J. Am. Chem. Soc. - 1937. - V. 59. - № 8. - P. 1508-1510.

23. Лапкин И. И. Пространственные препятствия при магнийорганических реакциях. 9. О получении кетонов взаимодействием галоидангидридов кислот с магнийорганическими соединениями / И. И. Лапкин, А. В. Любимова // Журнал Органической Химии. – 1949. - Ч. 19. - № 4. - С. 707-716.

24. Gilman H. The preparation of ketones from acid halides and the Grignard reagent / H. Gilman, M. L. Mayhue // Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas. - 1932. - V. 51. - № 1. - P. 47-50.

25. Cole W. A study of the 22-ketosteroids / W. Cole, P. L. Julian // J. Am. Chem. Soc. - 1945. - V. 67. - № 8. - P. 1369-1375.

26. Helferich B. Synthese und eigenschaften eines δ-oxy-aldehyds / B. Helferich, T. Malkomes // Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series). - 1922. - V. 55. - № 3. - P. 702-708.

27. Rupe H. Untersuchungen über den einfluβ der constitution auf das drehungsvermögen optisch aktiver substanzen. Ketoderivate des 1,2,2-trimethylcyclopentan-3-carbonsäure / H. Rupe // Eur. J. Org. Chem. - 1922. - V. 428. - № 2-3. - P. 164-188.

28. Cook N. C. Grignard reactions. XX. 1 effect of cuprous chloride on the reaction of t-butylmagnesium chloride and trimethylacetyl chloride / N. C. Cook, W.C. Percival // J. Am. Chem. Soc. - 1949. - V. 71. - № 12. - P. 4141-4142.

29. Stehman C. J. Grignard reactions. XIX. 1 preparation of 2,4,4-trimethyl-3-pentanone / C. J. Stehman, N. C. Cook, F. C. Whitmore // J. Am. Chem. Soc. - 1949. - V. 71. - № 4. - P. 1509-1510.

30. Schmidlin J. Triphenylmethyl, triphenylacetaldehyd und triphenylacetanhydrid / J. Schmidlin // Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft. - 1910. - V. 43. - № 1. - P. 1137-1144.

31. Fordyce C. R. Branched chain aliphatic acids. Isomyristic, isopalmitic and isostearic acids / C. R. Fordyce, J. R. Johnson // J. Am. Chem. Soc. - 1933. - V. 55. - № 8. - P. 3368-3372.

32. Davies L. A. The structures of convolvulinolic and jalapinolic acids. Synthesis of 11-hydroxypentadecanoic and 11-hydroxyhexadecanoic acids / L. A. Davies, R. Adams // J. Am. Chem. Soc. - 1928. - V. 50. - № 6. - P. 1749-1755.

33. Darzens G. Sur quelques délvés du butilcyclohexane / G. Darzens, H. Rost // CR Acad. Sci., Paris. – 1911. - V. 152. - P. 608.

34. Meerwein H. Über ringveränderungen bei der wasserabspaltung aus alicyclischen alkoholen / H. Meerwein // Justus liebigs annalen der chemie. - 1918. - V. 417. - № 2-3. - P. 255-277.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Abe K. The Studies of the Activated Compound. III. A Synthesis of Muscalure:(Z)-9-Tricosene / K. Abe, T. Yamasaki, N. Nakamura, Sakan T. // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 1977. – V. 50. – №. 10. – P. 2792

2. Odinokov V. N. Sintez feromonov nasekomykh [Synthesis of Insect Pheromones] / V. N. Odinokov, E. P. Serebryakov // Ufa: Gilem. - 2001. –372 p. [in Russian]

3. Padalka S. D. Sintez geranilbutirata i primenenie ego dlia borby s provolochnikom na posevakh propashnykh, ovoshchnykh i bakhchevykh kultur [Synthesis of Geranyl Butyrate and its Use for the Control of Wireworm on Crops of Tilled Crops, Vegetables and Melons] / S. D. Padalka, N. S. Fotina, V. Ya. Ismailov // Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh (NAU): yezhemesyachnyy nauchnyy zhurnal [National Association of Scientists (NAU): Monthly Scientific Journal]. - 2015. - No. 9. - Part 4. - P. 61-64. [in Russian]

4. Carlson D. A. Sex attractant pheromone of the house fly: isolation, identification and synthesis / D. A. Carlson et al. // Science. – 1971. – V. 174. – №. 4004. – P. 76-78.

5. Carlson D. A. evaluations of (Z)-9-tricosene, a sex attractant pheromone of the house fly / D. A. Carlson, M. Beroza // Environmental Entomology. – 1973. – V. 2. – № 4. – P. 555-560.

6. Odinokov V. N. Insect pheromones and their analogues. XIV. The synthesis of muscalure as a sex pheromone of *Musca domestica*. / V. N. Odinokov, G. Y. Ishmuratov, G. G. Balezina and others // Khim. Prir. Soed. - 1985. - V. 21. - № 3. - P.401-403.

7. Verba G. G. Synthesis of muscalure – the pheromone of *Musca Domestica*. / G. G. Verba, V. S. Abdukakharov, A. A. Abdukakhabov // Khim. Prir. Soed. - 1975. - V. 21. - № 5. - P. 698-700.

8. Kovalev B. G. Synthetic studies of attracting substances (sexual attractants) of insects. III. Convenient method of preparing higher dialkylacetylenes. Synthesis of muscalure, the attractant of the housefly *Musca Domestica* L. / B. G. Kovalev, V. V. Stan, T. K. Antoch and others // Zh. Org. Khim. - 1977. - V. 13. - № 10. - P. 2049-2052.

9. Naoshima Y. Convenient synthesis of muscalure, the housefly sex pheromone. / Y. Naoshima, H. Ozawa, Y. Takenami and others // Agril. Biol. Chem. - 1981. - V. 45. - № 7. - P. 1723-1724.

10. Kim M. Practical and scalable synthesis of (Z)-9-tricosene, the housefly sex pheromone. / M. Kim, A. Pitchaiah, N-J. Park and others // Letters in Org. Chem. - 2012. - V. 9. - № 9. - P. 628-631.

11. Dhillon R. S. Pheromones via organoboranes. IV. Synthesis of (Z)-9-tricosene (muscalure). / R. S. Dhillon, R. P. Singh // Ind. J. Chem. - 1995. - V. 34B. - P. 718-721.

12. Cargill R. L. Synthesis of the housefly sex attractant. / R. L. Cargill, M. G. Rosenblum // J. Org. Chem. - 1972. - V. 37. - № 24. - P. 3971.

13. Gilman H. The reaction between carboxylic acid halides and organomagnesium halides / H. Gilman, R. E. Fothergill, H. H. Parker // Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas. - 1929. - V. 48. - № 7. - P. 748-751.

14. Barton S. D. Obshchaya organicheskaya khimiya: v 12-ti t. Karbonovye kisloty i ikh proizvodnye. Soedinenija fosfora [General Organic Chemistry: in 12 Volumes. Carboxylic Acids and their Derivatives. Phosphorus Compounds] / S. D. Barton, V. D. Ollis. - M.: Chemistry, 1983. - 728 p. - 4 v. [in Russian]

15. Huet F. Formation d'enolates cetoniques par action d'organomagnesiens mixtes dans l'hexamehylphosphorotriamide sur des esters / F. Huet, G. Emptoz, A. Jubier // Terahedron. - 1973. - V. 29. P. 479-485.

16. Arnold R. T. Mechanism of the reaction between hindered carbonyl compounds and the Grignard reagent / R. T. Arnold, R. W. Liggett // J. Am. Chem. Soc. - 1942. - V. 64. - № 12. - P. 2875-2877.

17. Arnold R. T. Resonance and the hindered carbonyl-Grignard reaction / R. T. Arnold, H. Bank, R. W. Liggett // J. Am. Chem. Soc. - 1941. - V. 63. - № 252. - P. 3444-3446.

18. Smith L. I. The enolizing action of methylmagnesium iodide upon hindered ketones / L. I. Smith, C. Guss // J. Am. Chem. Soc. - 1937. - V. 59. - № 5. - P. 804-806.

19. Gilman H. Metallic derivatives of acetomesitylene / H. Gilman, R. G. Jones // J. Am. Chem. Soc. - 1941. - V. 63. - № 4. - P. 1162-1163.

20. Fuson R. C. Reactions of bromomagnesium enolates of mesityl ketones. II. Condensation / R. C. Fuson, W. O. Fugate, C. H. Fisher // J. Am. Chem. Soc. - 1939. - V. 61. - № 9. - P. 2362-2365.

21. Fuson R. C. The reduction of mixed hindered benzils / R. C. Fuson, P. E. Hoch // J. Am. Chem. Soc - 1949. - V. 71. - № 5. - P. 1585-1586.

22. Ross W. E. The action of methylmagnesium bromide on 2,4,6-trichlorobenzoyl chloride / W. E. Ross, R. C. Fuson // J. Am. Chem. Soc. - 1937. - V. 59. - № 8. - P. 1508-1510.

23. Lapkin I. I. Prostranstvennye prepyatstviya pri magniyorganicheskikh reaktsiyakh. 9. O poluchenii ketonov vzaimodeistviem galoidangidridov kislot s magniyorganicheskimi soedineniyami [Spatial Obstacles in Organomagnesium Reactions. 9. On the Production of Ketones by the Interaction of Acid Halides with Organomagnesium Compounds] / I. I. Lapkin, A. V. Lyubimov // Zhurnal Organicheskoy Khimii [Journal of Organic Chemistry]. – 1949. – P. 19. – No. 4. – P. 707-716. [in Russian]

24. Gilman H. The preparation of ketones from acid halides and the Grignard reagent / H. Gilman, M. L. Mayhue // Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas. - 1932. - V. 51. - № 1. - P. 47-50.

25. Cole W. A study of the 22-ketosteroids / W. Cole, P. L. Julian // J. Am. Chem. Soc. - 1945. - V. 67. - № 8. - P. 1369-1375.

26. Helferich B. Synthese und eigenschaften eines δ-oxy-aldehyds / B. Helferich, T. Malkomes // Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series). - 1922. - V. 55. - № 3. - P. 702-708.

27. Rupe H. Untersuchungen über den einfluβ der constitution auf das drehungsvermögen optisch aktiver substanzen. Ketoderivate des 1,2,2-trimethylcyclopentan-3-carbonsäure / H. Rupe // Eur. J. Org. Chem. - 1922. - V. 428. - № 2-3. - P. 164-188.

28. Cook N. C. Grignard reactions. XX. 1 effect of cuprous chloride on the reaction of t-butylmagnesium chloride and trimethylacetyl chloride / N. C. Cook, W.C. Percival // J. Am. Chem. Soc. - 1949. - V. 71. - № 12. - P. 4141-4142.

29. Stehman C. J. Grignard reactions. XIX. 1 preparation of 2,4,4-trimethyl-3-pentanone / C. J. Stehman, N. C. Cook, F. C. Whitmore // J. Am. Chem. Soc. - 1949. - V. 71. - № 4. - P. 1509-1510.

30. Schmidlin J. Triphenylmethyl, triphenylacetaldehyd und triphenylacetanhydrid / J. Schmidlin // Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft. - 1910. - V. 43. - № 1. - P. 1137-1144.

31. Fordyce C. R. Branched chain aliphatic acids. Isomyristic, isopalmitic and isostearic acids / C. R. Fordyce, J. R. Johnson // J. Am. Chem. Soc. - 1933. - V. 55. - № 8. - P. 3368-3372.

32. Davies L. A. The structures of convolvulinolic and jalapinolic acids. Synthesis of 11-hydroxypentadecanoic and 11-hydroxyhexadecanoic acids / L. A. Davies, R. Adams // J. Am. Chem. Soc. - 1928. - V. 50. - № 6. - P. 1749-1755.

33. Darzens G. Sur quelques délvés du butilcyclohexane / G. Darzens, H. Rost // CR Acad. Sci., Paris. – 1911. - V. 152. - P. 608.

34. Meerwein H. Über ringveränderungen bei der wasserabspaltung aus alicyclischen alkoholen / H. Meerwein // Justus liebigs annalen der chemie. - 1918. - V. 417. - № 2-3. - P. 255-277.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.027

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОКИСЛЕНИЯ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА

Научная статья

Протопопов А.В.[1, *], Бобровская С.А.[2]
[1] ORCID: 0000-0003-2752-6726,
[1, 2] Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

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

Аннотация

Приведены данные по составу отходов масло-экстракционного производства. Исследован процесс окисления и полимеризации подсолнечного масла. Проведены серии опытов процесса окисления в химическом реакторе. Продукты проведенных исследований позволят получать композиционные материалы различного назначения: поверхностно-активных (-ые) веществ (-а), эмульгаторов (-ы), смягчающих веществ и смазочных материалов из опасных отходов маслоэкстракционного производства.

Ключевые слова: масло, оксидирование масла, полимеризация масла.

STUDY OF DIFFERENT SYSTEMS APPLICATION FOR SUNFLOWER OIL OXIDATION

Research article

Protopopov A.V.[1, *], Bobrovskaya S.A.[2]
[1] ORCID: 0000-0003-2752-6726,
[1, 2] Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

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

Abstract

The article contains data on the composition of waste of oil extraction production. The process of oxidation and polymerization of sunflower oil is considered. A series of experiments of the oxidation process in a chemical reactor is carried out. The products of the research allow obtaining composite materials for various purposes, surfactants, emulsifiers, emollients and lubricants from hazardous waste oil extraction production.

Keywords: oil, oil oxidation, oil polymerization.

Использование смазочных материалов, которые основаны на растительных маслах, быстро растет из-за их биоразлагаемости, низкой экотоксичности и отличных трибологических свойствах. Биологически активные вещества имеют более низкий коэффициент трения, улучшенные характеристики износа, более высокий индекс вязкости и более низкий летучесть и вспышки, чем масла на минеральной основе. Полимеризованные растительные масла нашли во многие промышленные применения, такие как чернила, полимеры и гидравлические жидкости [1, С. 45].

Биополимеры теперь можно использовать в качестве естественных, устойчивых альтернатив традиционным нефтехимическим производным, таких как фенолформальдегид, эпоксидная смола, ненасыщенная полиэфирная смола, полиуретан, фенольная смола, и изоцианатная смола, получаемых при изготовлении композитных материалов и покрытий. Вопросы, связанные со здоровьем, строгие природоохранные политики, поиск экономичных и альтернативных материалов, квотирование для технических приложений возобновили необходимость получения термореактивных полимеров из растительных масел и смены производства от нефтехимических полимеров. Биополимеры набирают огромный интерес и глобальное признание, связанное с обычными синтетическими полимерами. Эти биосодержащие полимеры являются возобновляемыми, биоразлагаемыми и экологически безопасными [2, С. 47].

Примерами биосодержащих полимеров являются термореактивные полимеры из семян растений, таких как соевое масло, подсолнечное масло, масло ореха кешью, рапсовое масло и льняное масло. Существуют также термопластичные аналоги, такие как полимолочной кислоты сополимеры из кукурузного масла, полигидроксибутилата поли-капролактона и так далее [3, С. 116].

Биологические материалы являются привлекательными альтернативами нефтепродуктам в связи с возрастанием экологических проблем и зависимости от нефти [1, С. 49]. Интерес к био-основанным материалам возрос в результате роста цен на сырую нефть. Для того, чтобы конкурировать с нефтепродуктами, необходима модификация растительного масла. Использование растительных масел является ведущей альтернативой для замены нефтепродуктов, но и имеет свои недостатки, которые необходимо принимать во внимание при разработке смазочных материалов, таких как моторные масла, гидравлические жидкости, обрабатывающие жидкости, трансмиссионные масла [4, С. 125]. Недостатки растительных масел могут быть смягчены путем химической модификации и надлежащего выбора добавок. Растительные масла имеют такие преимущества, как отличные смазывающие свойства и вязкостные свойства, показанные в исследованиях Трибологической группы в Университете штата Пенсильвания. Они исследовали использование растительных масел в качестве моторных масел [5, С. 21], [6, С. 28], гидравлических жидкостей [7, С. 22] и как улучшить некоторые из слабых мест растительных масел, таких как, например, устойчивость к окислению [2, С. 48].

Представленная работа посвящена изучению процессов окисления и полимеризации подсолнечного масла.

Окисление масел сопровождается повышением содержания различных функциональных групп в молекуле жирных кислот, в том числе и карбоксильных, возрастанием кислотного числа и числа омыления масла.

Эпоксидные соединения образуются в результате взаимодействия пероксидных радикалов по двойным связям:

Промежуточные эпоксидированные соединения подвергаются дальнейшим превращениям, в результате в реакционной массе проходят реакции переэтерификации и полимеризации.

В процессе окисления масла претерпевают изменения в структуре и строении триглицеридов, способствующее для последующего пленкообразования [8, С. 147].

В ходе работы были проведены исследования по изучению состава отхода отбельных земель и способов модификации подсолнечного масла содержащегося в них, с целью получения практически востребованных композиционных материалов, поверхностно-активных веществ, эмульгаторов, смягчающих веществ и смазочных материалов.

В таблице 1 приведены условия использованных окислительных систем и полученные результаты.

Таблица 1 – Значение йодного числа подсолнечного масла (ПМ) при различных способах окисления

Способ окисления	Состояние продукта	Йодное число
«ПМ-КОН -H_2O_2 - C_2H_5OH» t= 70°С, τ=2ч	Твердый, желтого цвета	384
«ПМ-КОН -H_2O_2 - H_2SO_4» t= 70°С, τ=2,5ч	Вязко-текучий, желтого цвета	134
«ПМ-$Mg(CLO_4)_2$» (5:1), t= 120°С, τ=2ч	Жидкий, красно-желтого цвета	250
«ПМ - $Mg(CLO_4)_2$»(10:2), t= 120°С, τ=3ч	Жидкий, темно-коричневого цвета	287
«ПМ- H_2O_2-$Mg(CLO_4)_2$ - C_2H_5OH», t= 70°С, τ=2,5ч	Жидкий, прозрачный	210,5
«ПМ-КОН -H_2O_2-C_2H_5OH - $Mg(CLO_4)_2$ », t= 70°С, τ=2ч	Твердый, желтого цвета	252,5
«ПМ-КОН -H_2O_2 - C_2H_5OH - PbO_2 » t= 70°С, τ = 1,2ч	Твердый, бледно-желтого цвета	308
«ПМ-КОН -H_2O_2- C_2H_5OH - PbO_2 » t= 70°С, t= 90°С, τ = 1,35ч	Твердый, бледно-желтого цвета	340
«ПМ-КОН -H_2O_2 - C_2H_5OH - мочевина» t= 70°С, τ = 2ч	Твердый, желтого цвета	253
«ПМ-КОН -H_2O_2 - C_2H_5OH» (5:0,5:2:20) t= 70°С, τ=3ч, барботаж	Твердый, белого цвета	202
«ПМ-КОН -H_2O_2 - C_2H_5OH» (5:1:2:20) t= 70°С, τ=3ч, барботаж	Твердый, светло-желтого цвета	340
«ПМ-$Mg(CLO_4)_2$ -H_2O_2- C_2H_5OH» (5:0,5:2:20) , t= 70°С, τ=3ч, барботаж	Жидкий, желтого цвета	142
«ПМ-$Mg(CLO_4)_2$ -H_2O_2- C_2H_5OH» (5:1:2:20), t= 70°С, τ=3ч, барботаж	Жидкий, желтого цвета	191

Как показывают полученные данные, можно отметить, что лучше всего процесс окисления проходит в системе «ПМ – КОН - C_2H_5OH-H_2O_2».

Анализ ИК-спектров (Рис. 1), полученных продуктов окисления масла, что окислительный агент – H_2O_2 взаимодействует с жирными кислотами подсолнечного масла с образованием эпоксидного цикла, которые в последствии распадаются с образованием двойной связи. Приведенные данные свидетельствуют о проходящем процессе разложения триглицеридов жирных кислот и последующем их окислении.

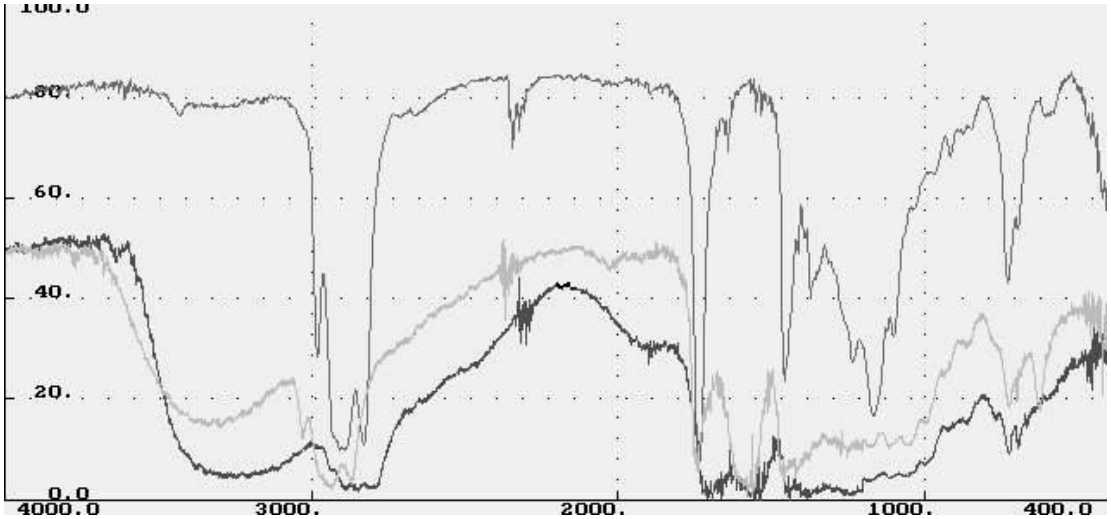


Рис. 1 – ИК-спектры подсолнечного масла и продуктов его окисления

Известные способы окисления предполагают использование окислителей, как например кислород или озон, с проведением процесса при высоких температурах, для достижения высоких степеней окисления. Нами рассмотрен процесс окисления оксидом кальция и пероксида водорода при 70^0С, с дальнейшей полимеризацией в диапазоне температур 150 ^{0}С, 165 ^{0}С, 180 ^{0}С, при непрерывном механическом перемешивании в течение трех часов. Йодное число полученных продуктов полимеризованного подсолнечного масла определяли по методу Кауфмана, (таблица 2).

Таблица 2 – Йодное число полимеризованного масла

Наименование системы	Температура процесса, ^{0}С	Йодное число
Масло – H_2O_2 - CaO	150	206
Масло – H_2O_2 - CaO	165	212
Масло – H_2O_2 - CaO	180	270

Полученные данные, показывают, что процесс полимеризации лучше всего проходит при 180 ^{0}С. Продукт стал вязкотекучим и приобрел коричневую окраску.

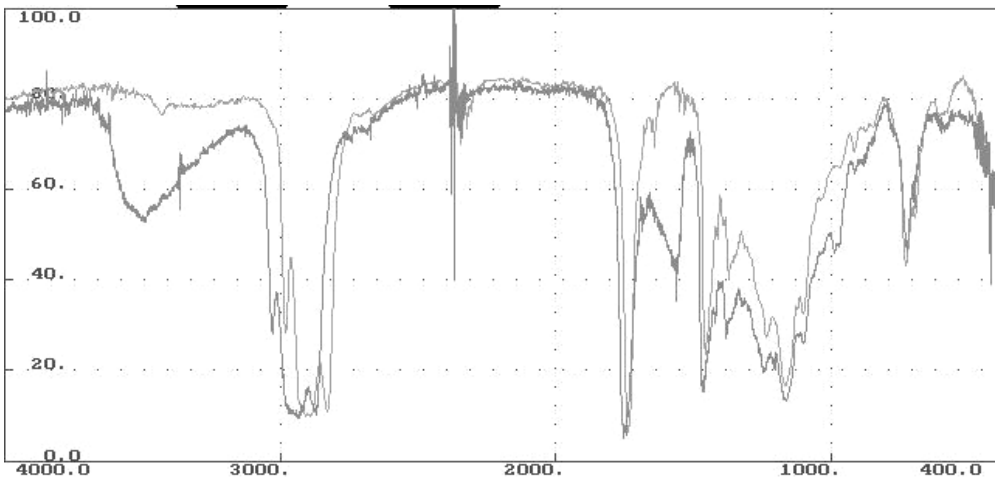


Рис. 2 – ИК-спектры исходного и модифицированного масла

Анализ ИК-спектров (Рис. 2), полученных продуктов окисления масла, показал, что окислительный агент взаимодействует с жирными кислотами подсолнечного масла с образованием эпоксидного цикла, которые в последствии распадаются с образованием двойной связи. Также, в ходе процесса наблюдается гидролиз тирглицеридов жирных кислот с образованием новых соединений жирных кислот растительного масла.

Полученные продукты модифицированного растительного масла показали хорошую совместимость с древесиной. Из полученных продуктов были приготовлены растворы в ацетоне и этилацетате, как наиболее распространенных растворителях. При нанесении таких растворов на древесину наблюдается ее пропитка модифицированным маслом после испарения растворителя. При этом, для продуктов с высоким значением йодного числа наблюдается пленкообразование.

Растительные масла и другие липиды образуют важный возобновляемый источник новых материалов. Модифицированные масла триацилглицерина могут быть использованы для получения полимеров с важными функциональными свойствами. Полученные полимеризованные масла, после удаления растворителя, характеризуются высокой вязкостью и по консистенции представляют собой пастообразный продукт. Такие окисленные масла можно

применять как лубрикаторы и смазочные материалы, а также они представляют интерес как пластификаторы для полимерных композитов и как компоненты для получения сополимеров.

Биологические масла являются прекрасным источником возобновляемых материалов для самых разных применений. Это перспективная область растет из-за экологических и экономических проблем [9, С. 185]. [10, С. 230].

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Erhan S. Vegetable oils as lubricants, hydraulic fluids, and inks / S. Erhan In: Shahidi F, editor. Bailey's Industrial Oil and Fats Products: Industrial and Nonedible Products from Oils and Fats. - Indianapolis: John Wiley & Sons; 2005

2. Castro W. A Study of the Oxidation and Wear Properties of Vegetable Oils: Soybean Oil Without Additives. / W. Castro, J. M. Perez, S. Z. Erhan and others. // Journal AOCS. - 2006. - P. 47–52

3. Mark M. Vegetable Oils in Paint and Coatings. / M. Mark, K. Sandefur. In: Erhan S, editor. Industrial Uses of Vegetable Oil. - AOCS Press; 2005.

4. Whitby D. Market share of bio-lubricants in Europe and USA. / D. Whitby - 2004; - P. 125-129.

5. Asadauskas S. Oxidative degradation of fluids based on synthetic and natural esters. Doctor of Philosophy Dissertation / S. Asadauskas. The Pennsylvania State University; - 1997.

6. Cheenkachorn K. A study of structural effects on oxidative stability of soybean oils / K. Cheenkachorn PhD Thesis. - 2003.

7. Erhan S. Statue of Liberty Goes Green With Soy-Based Elevator Fluid [Internet]. / S. Erhan. // Agricultural Research, - 2004, - Vol. 10, p. 22, Available from: http://www.ars.usda.gov/is/AR/archive/oct04/soy1004.pdf (accessed: 15.11.2018).

8. Holser R. Synthesis of Surfactants from Vegetable Oils Feedstocks. / R. Holser, S. Erhan, editor. Industrial Uses of Vegetable Oils. - AOCS Press; - 2005.

9. Rhoades W. F. Heat Polymerization of Safflower Oil / W. F. Rhoades, A. J. Da Valle // The journal of the american oil chemists' society, Pacific Paint and Varnish Co., Berkeley, California. - 1951. - № 11. - P. 185-196

10. Gamage P. K. Epoxidation of some vegetable oils and their hydrolysed products with peroxyformic acid – optimized to industrial scale / P. K. Gamage, M. O`Brien, L. Karunanayake // J. Natn. Sct. Foundation Sri Lanka. - 2009. -Vol. 37. - № 4. - P. 229−240.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.028

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ УЗКИХ ФРАКЦИЙ ИЗ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Научная статья

Фоменко Е.В.[1,] *, Акимочкина Г.В.[2], Аншиц А.Г.[3]
[1] ORCID: 0000-0003-0929-807X;
[2] ORCID: 0000-0002-3078-0269;
[3] ORCID: 0000-0002-5259-0319,
[1, 2, 3] Институт химии и химической технологии СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «ФИЦ КНЦ СО РАН», Красноярск, Россия;
[3] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

* Корреспондирующий автор (fom[at]icct.ru)

Аннотация

Методом аэродинамической классификации с последующей магнитной сепарацией из летучей золы от пылевидного сжигания каменного экибастузского угля выделены немагнитные узкие фракции дисперсных частиц со средним диаметром 2, 3, 6 и 10 мкм. Установлено, что с ростом размера фракций насыпная плотность монотонно возрастает от 0,90 до 1,07 г/см^3. Основными компонентами химического состава дисперсных узких фракций являются SiO_2 – 65-70 мас. % и Al_2O_3 – 23-28 мас. %. Фазовый состав включает 64-69 мас. % стеклофазы, 17-21 мас. % фазы муллита, 10-18 мас. % кварца. Распределения частиц по размеру характеризуются следующими значениями d_{50} – 1,9; 2,3; 5,1; 9,2 мкм и d_{90} – 4,5; 5,7; 11,4 и 16,7 мкм соответственно. Основные морфологические типами частиц являются микросферы с непористой гладкой поверхностью и микросферы с пористой оболочкой; с ростом размера фракций количество микросфер с пористой оболочкой увеличивается.

Ключевые слова: аэродинамическая классификация, летучая зола, узкая фракция.

AERODYNAMIC EXTRACTION OF ALUMINOSILICATE DISPERSED NARROW FRACTIONS FROM FLY ASH OF EKIBASTUZ COAL AND THEIR CHARACTERISTICS

Research article

Fomenko E.V.[1,] *, Akimochkina G.V.[2], Anshitz A.G.[3]
[1] ORCID: 0000-0003-0929-807X;
[2] ORCID: 0000-0002-3078-0269;
[3] ORCID: 0000-0002-5259-0319;
[1, 2, 3] Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences - Separate Division of the Federal Research Center of the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia;
[3] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

* Corresponding author (fom[at]icct.ru)

Abstract

A nonmagnetic narrow fraction of dispersed particles with an average diameter of 2, 3, 6 and 10 microns from the fly ash was isolated from dust-like combustion of Ekibastuz coal by the method of aerodynamic classification followed by magnetic separation. It is established that with an increase in the size of fractions the bulk density monotonously increases from 0.90 to 1.07 g/cm^3. The main components of the chemical composition of the dispersed narrow fractions are SiO_2 - 65-70 wt. % and Al_2O_3 - 23-28 wt. %. The phase composition includes 64-69 wt. % glass phase, 17-21 wt. % phase of mullite, 10-18 wt. % of quartz. The particle size distributions are characterized by the following values d_{50} - 1.9; 2.3; 5.1; 9.2 microns and d_{90} - 4.5; 5.7; 11.4 and 16.7 microns, respectively. The main morphological types of particles are microspheres with a non-porous smooth surface and microspheres with a porous shell; as the size of fractions increases, the amount of microspheres with a porous shell increases.

Keywords: aerodynamic classification, fly ash, narrow fraction.

В настоящее время угольные электростанции производят около 37% электроэнергии в мире [1]. Количество образующейся при сжигании угля летучей золы оценивается ~ в 1 млрд. т. в год [2], [3], а уровень утилизации составляет около 25% [2], [4]. Из-за широкой вариации размеров частиц, переменного химического и минерально-фазового состава и неконтролируемых свойств золы теплоэнергетики рассматриваются как техногенное сырье низкого технологического уровня. Основные направления утилизации зол в мире включают традиционное крупнотоннажное использование исходной золы без предварительной классификации в строительной индустрии, сельском хозяйстве, автодорожном строительстве [2], [3], [5].

Качественное разделение зол на фракции определенного размера и состава с прогнозируемыми свойствами позволяет превратить крупнотоннажные отходы теплоэнергетики в ценное минеральное сырье техногенного происхождения. В последние годы повышенный интерес вызывают разработки на основе отдельных компонентов летучих зол функциональных материалов – адсорбентов, катализаторов, носителей, керамических материалов, цеолитов [2], [3], [5]. Так, выделение из летучих зол узких фракций полых алюмосиликатных микросфер (ценосфер) определенного размера в интервале 50–250 мкм [6], [7], [8] позволило получить высокоселективные мембраны для

диффузионного выделения гелия и контейнеры для хранения водорода [9], [10], [11], сенсибилизаторы эмульсионных взрывчатых веществ [12], капсулированные pH-чувствительные спиновые зонды для исследования биологических объектов [13], композитные сорбенты для извлечения радионуклидов из жидких радиоактивных отходов [14], [15].

Наряду с крупными частицами, летучие золы в зависимости от типа угля и условий сжигания на 8-42 % представлены частицами размером менее 10 мкм [2], [16], [17], [18]. Такие дисперсные частицы относятся к классу взвешенных частиц PM_{10} (PM – particulate matter). Особую экологическую опасность представляют частицы $PM_{2.5}$ размером меньше 2,5 мкм, которые длительное время находятся в атмосфере во взвешенном состоянии и трудно выводятся из легких человека. Эмиссия этих частиц в атмосферу во многих странах законодательно ограничивается и строго контролируется [19], [20]. С другой стороны, дисперсные частицы золы потенциально пригодны для создания материалов различного назначения с улучшенными свойствами. В этом случае они должны соответствовать определенным требованиям к размеру частиц, химическому и фазовому составу. Так, применение летучей золы класса F (согласно стандарту ASTM C618) в качестве добавки в бетоны позволяет повысить их прочностные характеристики. Для этих целей успешно применяются золы, характеризующиеся $d_{ср}$ = 3 мкм, SiO_2 – 54, Al_2O_3 – 28 мас. % [21]; d_{50} = 7 мкм, SiO_2 – 50, Al_2O_3 – 19 мас. % [22]. В производстве однородных и прочных геополимеров показана перспективность использования высококальциевой золы SiO_2 – 29, Al_2O_3 – 13, CaO – 26 мас. %, $d_{ср}$ = 8,5 мкм [23]. Из золы состава SiO_2 – 47, Al_2O_3 – 41 мас. % с d_{50} = 2,53 мкм синтезированы керамические мембранные подложки [24]. При создании огнестойких панелей с высокими изолирующими свойствами использовалась зола с d_{50} = 4 мкм, содержащая SiO_2 и Al_2O_3 – 58 и 23 мас. % соответственно [25]. В качестве перспективного наполнителя в полимеры нашла применение зола с $d_{ср}$ = 4,6 мкм, содержащая SiO_2 – 49, Al_2O_3 – 34 мас. % [26].

В указанных случаях использовалась исходная летучая зола без предварительного разделения, но при этом отмечается, что именно наличие в ней мелких частиц <10 мкм положительно сказывается на свойствах получаемых материалов, таких как реологические, тепловые и реакционно-кинетические характеристики, прочность и твердость.

Необходимость контроля над выбросами PM_{10}, расширение сфер их утилизации за счет получения материалов с прогнозируемыми свойствами требует выделения дисперсных частиц в виде узких фракций постоянного состава и определения их основных физико-химических характеристик. Целью работы являлось аэродинамическое выделение дисперсных узких фракций алюмосиликатного состава со средним диаметром частиц < 10 мкм из летучей золы от пылевидного сжигания экибастузского угля, являющегося одним из самых высокозольных среди потребляемых углей России, и их характеристика, включающая определение насыпной плотности, распределения по размерам, химического и фазового составов. Охарактеризованные зольные фракции могут быть успешно использованы для получения материалов с прогнозируемыми и воспроизводимыми свойствами.

В качестве сырья для получения алюмосиликатных дисперсных узких фракций использовалась летучая зола от пылевидного сжигания каменного экибастузского угля марки СС на Рефтинской ГРЭС в топках котлов ПК-39-2, П-57-2 и П-57-3 со средней температурой по высоте топки 1520–1550°С (*серия R*). Отбор золы был осуществлен из первого поля четырехпольного электрофильтра типа ЭГА. Тип исходной золы в соответствии с стандартом ASTM C618 соответствует классу F. Насыпная плотность, содержание магнитной фракции, химический и фазовый составы исходной золы 1 поля электрофильтра приведены в таблице 1, обзорный SEM-снимок и кривые распределения частиц по размеру – на рисунке 1.

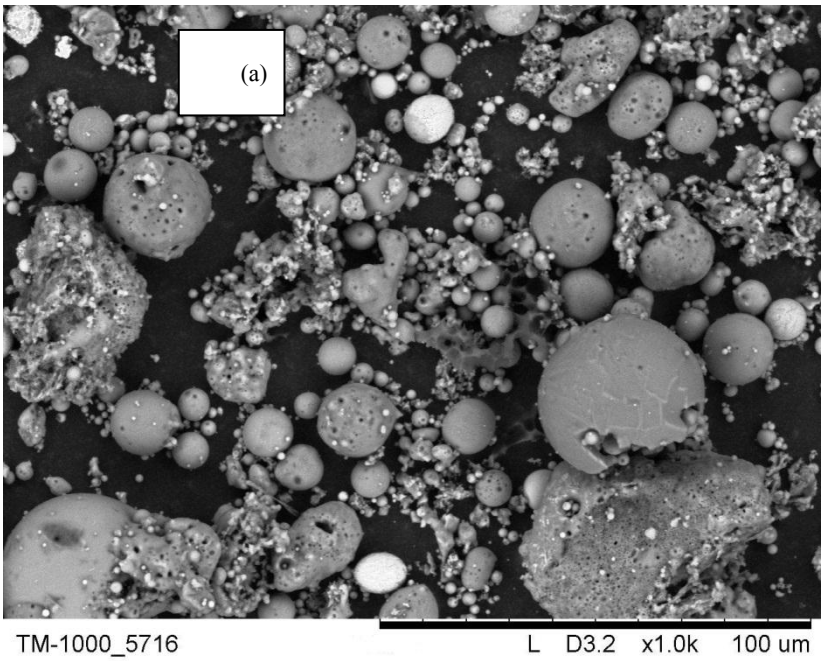
Таблица 1 – Насыпная плотность, содержание магнитной фракции, характеристики распределения частиц по размеру, химический и фазовый составы летучей золы 1 поля электрофильтра Рефтинской ГРЭС

насыпная плотность, г/см$_3$	содержание магнитной фракции, мас.%	распределение по размерам, мкм				фазовый состав, мас. %			
		$d_{ср}$	d_{10}	d_{50}	d_{90}	стеклофаза	муллит	кварц	Fe-шпинель
1,05	6,0	39	4,3	31,5	86,0	62,3	22,5	10,3	4,9

химический состав, мас. %								
п.п.п.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
1,45	63,10	28,06	6,45	0,94	0,55	0,30	0,51	0,09

Получение дисперсных узких фракций осуществлялось методом аэродинамического разделения с последующей магнитной сепарацией. Аэродинамическое разделение было выполнено на центробежном лабораторном классификаторе 50 ATP (*Hosokawa ALPINE, Германия*). Подробно схема классификатора и принцип его действия изложены в работе [27].

Насыпную плотность полученных узких фракций определяли на автоматизированном анализаторе Autotap (*Quantachrome Instruments, США*). Распределение частиц по размеру определяли на лазерном анализаторе MicroTec 22 (*Fritsch, Германия*) в мокром режиме с использованием дистиллированной воды и ультразвукового источника, позволяющего разрушать агломераты зольных частиц.



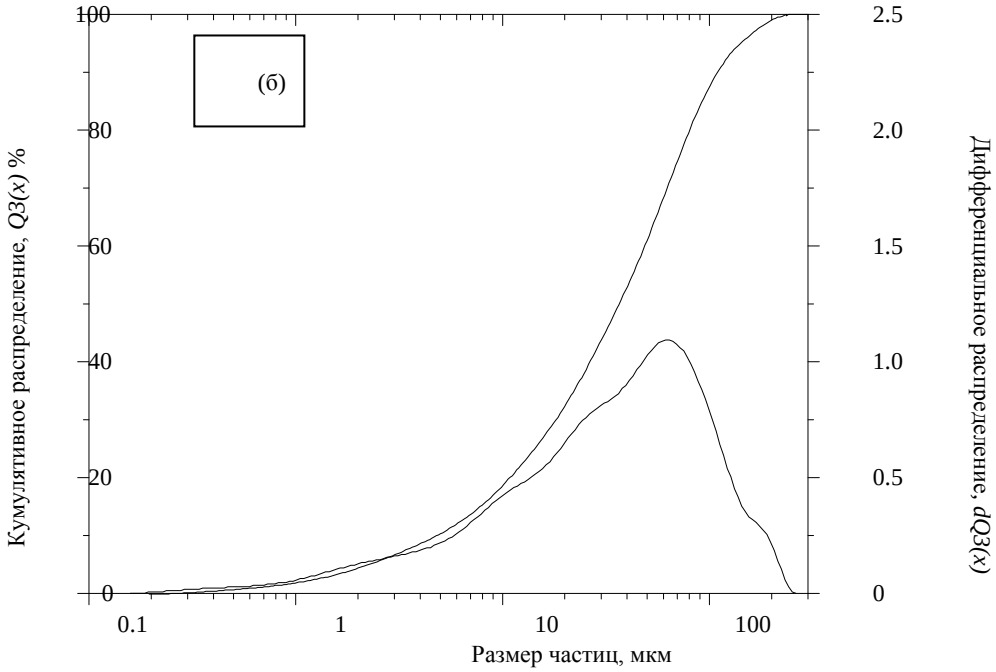


Рис. 1 – SEM-снимок *(а)* и распределение частиц по размеру в кумулятивной (интегральной) *Q3(x)* и дифференциальной *dQ3(x)* форме *(б)* для летучей золы 1 поля электрофильтра Рефтинской ГРЭС

Химический состав, включающий содержание оксидов кремния, алюминия, железа, кальция, магния, калия, натрия и серы, а также потери при прокаливании (ППП) определяли методами химического анализа согласно ГОСТ 5382-91 [28], устанавливающего методики определения компонентов и нормы точности выполнения анализов.

Рентгено-дифракционные данные были получены на порошковом дифрактометре X'Pert Pro MPD (*PANalytical, Нидерланды*) с твердотельным детектором PIXcel. Содержание основных кристаллических фаз определяли с применением полнопрофильного анализа по методу Ритвельда с минимизацией производной разности по методике, используемой ранее для алюмосиликатных ценосфер [7] летучих зол.

Исследование морфологии глобул выполняли на порошковых образцах, закрепленных углеродным скотчем (*Ted Pella Inc.*) на плоской подложке, с применением сканирующего электронного микроскопа ТМ-3 000 (*Hitachi*).

Аэродинамическое выделение дисперсных узких фракций

Технологическая схема выделения дисперсных узких фракций из летучей золы локального отбора 1 поля электрофильтра Рефтинской ГРЭС включала несколько этапов (схема 1), выбранных после проведения предварительных испытаний. На первом этапе аэродинамической классификации (Этап I, схема 1) исходная зола в количестве 14 кг была разделена на два продукта – мелкий и крупный, выход которых составил 40 и 60 мас. % соответственно. Загрузку золы в классификатор осуществляли партиями массой (*m*) 2 000 г; скорость воздушного потока (*V*) составляла 50 м^3/ч, скорость вращения ротора (*N*) – 8 000 мин$^{-1}$, скорость дозатора (*v*) – 22 мин$^{-1}$, длительность разделения (*t*) – 15 мин.

Схема 1 – Технологическая схема выделения дисперсных узких фракций из летучей золы 1 поля электрофильтра Рефтинской ГРЭС

Полученные за одну стадию с минимальными затратами мелкий и крупный продукт существенно отличаются размером частиц: $d_{ср}$ – 7 и 37 мкм соответственно. Каждый из них успешно может быть использован самостоятельно, сокращая количество исходной золы практически вдвое, например летучая зола класса F с d_{50} = 7 мкм может использоваться при получении высоконаполненных бетонов [22], а с $d_{ср}$ = 32 мкм – огнестойких геополимеров [29]. Варьируя режимы классификатора можно за одну стадию аэродинамического разделения выделить из летучей золы однородные продукты с определенным распределением частиц, например, с d_{50} в диапазоне от 2 до 111 мкм [27]. Для получения узких фракций определенного размера каждый из продуктов одностадийного разделения летучей золы может быть подвернут повторной классификации.

В данной работе мелкий продукт (Этап I, схема 1) был подвергнут классификации, включающей несколько последовательных циклов разделения при различных режимах классификатора (Этап II, схема 1). Вначале при следующих параметрах разделения: V составляла 40 м^3/ч, N – 22 000 мин$^{-1}$, ν – 22 мин$^{-1}$, t – 8 мин, была выделена самая мелкая по размеру узкая фракция. Далее для выделения каждой последующей по размеру мелкой фракции с бóльшим средним диаметром был использован крупный продукт от предыдущего цикла: V была увеличена до 50 м^3/ч, а N последовательно уменьшалась при переходе от одного цикла к другому в интервале от 22 000 до 8 000 мин$^{-1}$ при неизменных параметрах ν и t. В результате на Этапе II были выделены шесть дисперсных узких фракций с $d_{ср}$ – 2, 3, 5, 6, 8 и 10 мкм.

Заключительным этапом технологической схемы 1 являлась мокрая магнитная сепарация (Этап III), выполненная в дистиллированной воде с использованием неодимового магнита (NdFeB, F – 24 lb). Магнитной сепарации были подвергнуты четыре дисперсных узких фракции с $d_{ср}$ – 2, 3, 6 и 10 мкм, выделенные на Этапе II. Было установлено, что с ростом размера фракции содержание в ней магнитной составляющей увеличивается и составляет 0,2; 0,3; 1,3 и 3,0 мас. % соответственно. После извлечения магнитных фракций были получены немагнитные фракции дисперсных частиц с узким распределением по размеру и определенным $d_{ср}$: МФ136НМ – $d_{ср}$ = 2 мкм, МФ137НМ – $d_{ср}$ = 3 мкм, МФ141НМ – $d_{ср}$ = 6 мкм, МФ140НМ – $d_{ср}$ = 10 мкм. Немагнитные узкие фракции были охарактеризованы, включая

определение насыпной плотности (табл. 2), распределения по размерам (рис. 3, табл. 2), химического и фазового составов (табл. 3).

Таблица 2 – Насыпная плотность и характеристики распределения частиц по размеру дисперсных узких фракций

образец	насыпная плотность, г/см^3	распределение по размерам, мкм			
		$d_{ср}$	d_{10}	d_{50}	d_{90}
МФ136НМ	0,90	2,4	0,8	1,9	4,5
МФ137НМ	0,91	2,9	0,9	2,3	5,7
МФ141НМ	1,05	5,6	1,3	5,1	11,4
МФ140НМ	1,07	9,7	3,4	9,2	16,7

Таблица 3 – Химический и фазовый состав дисперсных узких фракций

образец	химический состав, мас. %									фазовый состав, мас. %			
	п.п.п.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	стеклофаза	муллит	кварц	Fe-шпинель
МФ136НМ	6,30	70,33	24,52	3,31	0,83	0,24	0,32	0,45	0	66,2	16,9	16,7	0,2
МФ137НМ	5,35	70,62	23,32	2,51	1,47	1,25	0,30	0,45	0,06	64,8	16,8	18,1	0,3
МФ141НМ	3,25	65,20	23,34	4,02	3,48	2,88	0,39	0,62	0,07	63,5	21,4	15,0	0,1
МФ140НМ	1,35	67,24	28,13	1,95	1,43	0,34	0,40	0,47	0,04	68,8	21,4	9,8	0

Характеристика дисперсных узких фракций

Значения насыпной плотности для немагнитных дисперсных узких фракций МФ136НМ, МФ137НМ, МФ141НМ и МФ140НМ с ростом d_{cp} от 2 до 10 мкм увеличиваются, находясь в интервале 0,90-1,07 г/см^3 (табл. 2). Основными компонентами их химического состава являются оксиды кремния и алюминия: содержания SiO_2 и Al_2O_3 изменяются в интервале 65-70 и 23-28 мас. % соответственно (табл. 2). Содержание Fe_2O_3 не велико и составляет 2-4 мас. %. В фазовом составе (табл. 3) основной составляющей является аморфная стеклофаза 64-69 мас. %, среди кристаллических фаз идентифицированы фазы муллита и кварца – 17-21 и 10-18 мас. % соответственно, в виде примесей присутствует фаза феррошпинели в количестве не более 0,3 мас. %.

Высокое содержание аморфной составляющей (табл. 3) является следствием неравновесности процесса пылевидного сжигания угля, когда в условиях высоких температурных градиентов при малых временах контакта ~1 сек [30, 31] термохимические превращения минеральных форм протекают не до конца. Идентифицированная фаза муллита в количестве 17-21 мас. % (табл. 3) является продуктом термохимического превращения алюмосиликатных минералов, причем теоретически возможный выход муллита при обжиге в одних и тех же условиях больше у каолинитовых глин (64%), чем у гидрослюдистых минералов типа иллита (35-46%) или монтмориллонита (15-31%) [30]. Фаза кварца в количестве 10-18 мас.% (табл. 3) представляет собой термостабильный минерал исходного угля, который в условиях промышленного сжигания не подвергается плавлению [30, 31], а лишь частично растворяется в расплавленной алюмосиликатной стеклофазе [7].

Кривые распределения частиц по размеру для выделенных фракций, представленные на рисунке 2 в кумулятивной и дифференциальной форме, демонстрируют узкие диапазоны размеров частиц, характеризующиеся d_{50} – 1,9; 2,3; 5,1; 9,2 мкм и d_{90} – 4,5; 5,7; 11,4 и 16,7 мкм соответственно (табл. 2).

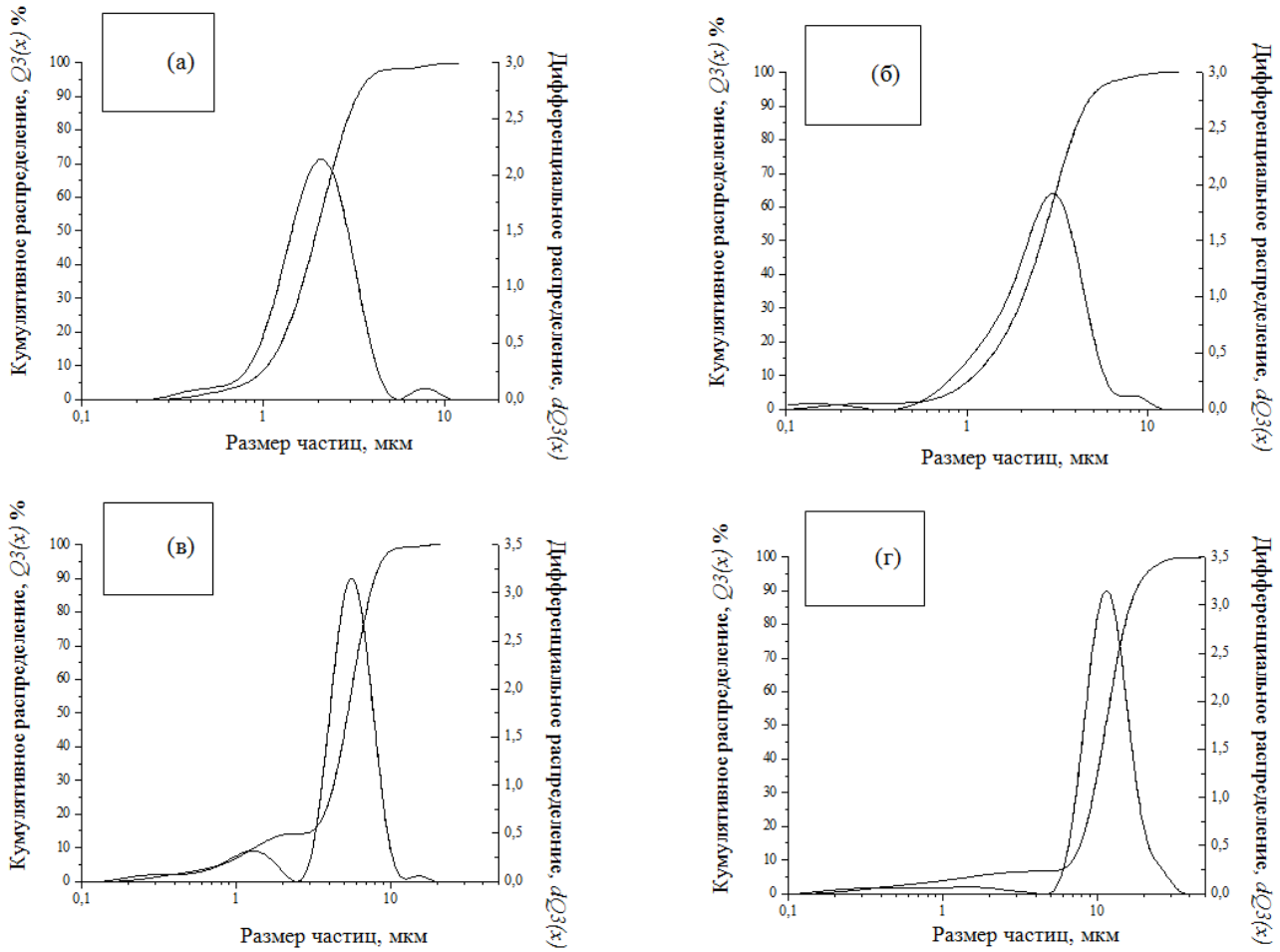


Рис. 2 – Распределение частиц по размеру в кумулятивной (интегральной) *Q3(x)* и дифференциальной *dQ3(x)* форме для дисперсных узких фракций, выделенных из летучей золы по технологической схеме (схема 1): а – МФ136НМ, б – МФ137НМ, в – МФ141НМ, г – МФ140НМ

Анализ СЭМ-снимков узких фракций показал (рис. 3), что они содержат микросферы с непористой гладкой поверхностью, микросферы с пористой оболочкой, фрагментарные непористые или пористые осколки, частицы сетчатой структуры. Изменение морфологии глобул внутри каждой фракции наблюдается в зависимости от их размера. Так, самая мелкая по размеру фракция МФ136НМ (рис. 3а) представлена сферическими частицами с гладкой непористой оболочкой и не содержит пористых микросфер.

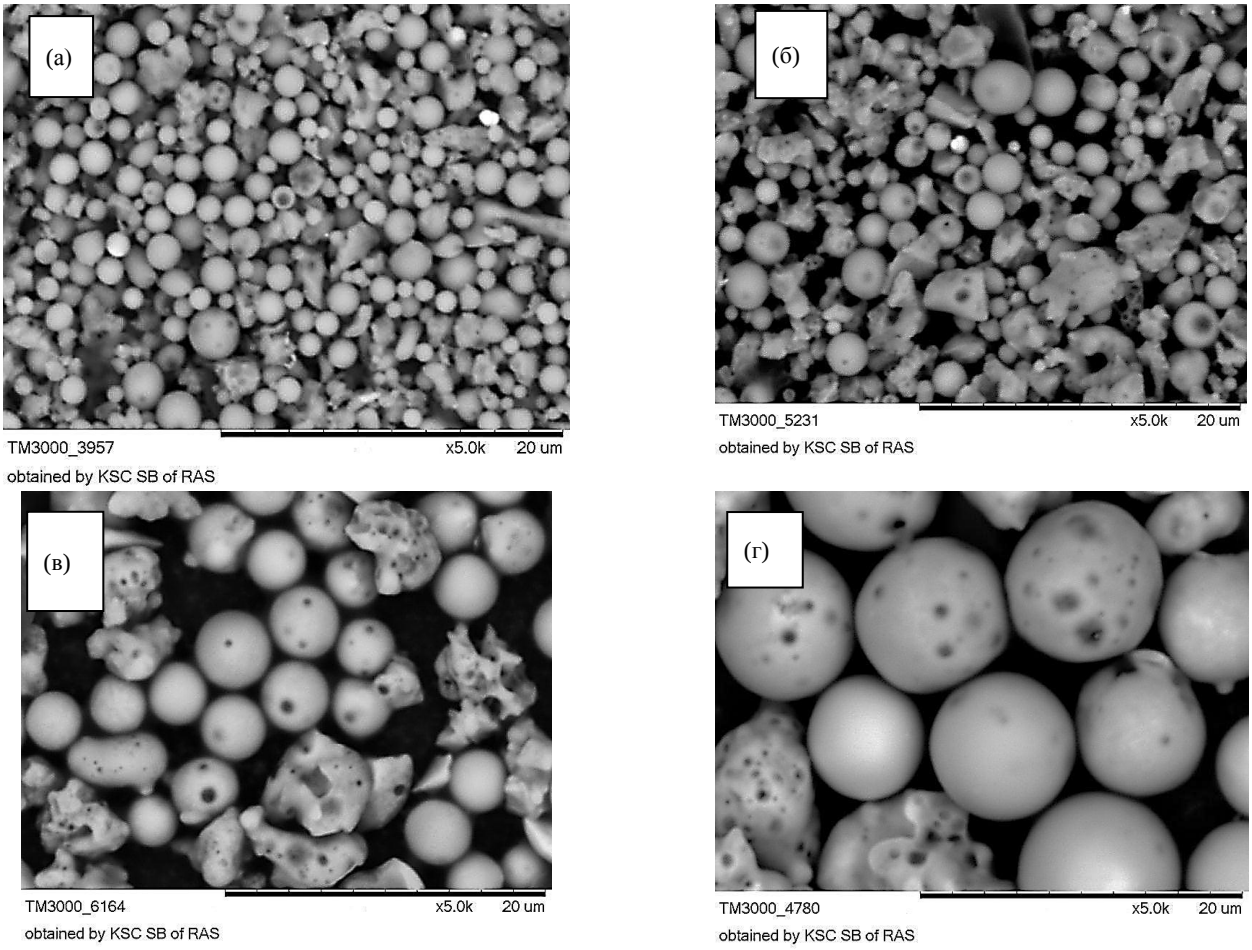


Рис. 3 – СЭМ-снимки немагнитных дисперсных узких фракций: а – МФ136НМ, б – МФ137НМ, в – МФ141НМ, г – МФ140НМ

С ростом размера фракции количество микросфер с пористой оболочкой монотонно увеличивается, составляя во фракции МФ137НМ (рис. 3б) около 15%, во фракции МФ141НМ (рис. 3в) достигает 30%. Для самой крупной фракции МФ140НМ (рис. 3г) содержание пористых частиц становится преобладающим: количество микросфер с пористой оболочкой составляет уже более половины, дополнительно в количестве ~10% содержатся частицы сетчатой структуры. Осколки, представляющие собой фрагменты разрушенных крупных частиц, которые практически не подверглись плавлению, либо незначительно оплавлены, содержатся во всех фракциях.

Охарактеризованные дисперсные зольные фракции соответствуют определенным требованиям к размеру частиц, химическому и фазовому составу, могут быть успешно использованы для получения материалов с прогнозируемыми и воспроизводимыми свойствами, например, в качестве добавки в бетоны [21], для получения керамических мембранных подложек [24], огнестойких панелей [25], наполнителя в полимеры [26], что приведет к снижению общих объемов золошлаковых отходов.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-43-240002 «Разработка облегченных высокопрочных проппантов на основе узких фракций микросфер энергетических зол» и в рамках проекта фундаментальных исследований СО РАН V.45.3.3 «Формирование новых функциональных микросферических и композитных материалов с заданными свойствами».

Funding

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, the Government of the Krasnoyarsk Krai, the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the framework of the research project No. 18-43-240002 “Development of Lightweight High-strength Proppants Based on Narrow Fractions of Microspheres of Energy Ashes” and as part of the project of SB RAS V.45.3.3 “Formation of New Functional Microspherical and Composite Materials with Desired Properties.”

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИХХТ СО РАН (г. Красноярск) Л.А. Соловьеву за проведение и интерпретацию результатов количественного рентгенофазового анализа, Е.В. Мазуровой за выполнение работ на сканирующих электронных микроскопах ТМ-1000 и ТМ-3000.

Acknowledgement

The authors are grateful to the staff of L.A. Solovyev Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS (Krasnoyarsk) for conducting and interpreting the results of quantitative X-ray phase analysis, E.V. Mazurova for performing the work on TM-1000 and TM-3000 scanning electron microscopes.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. https://www.worldcoal.org/coal/uses–coal/coal–electricity [Electronic resource] (accessed:10.04.2018)
2. Blissett R. S. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash / R. S. Blissett, N. A. Rowson // Fuel. – 2012. – V. 97. – P. 1–23
3. Yao Z. T. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z. T. Yao, X. S. Ji, P. K.Sarker and others. // Earth–Sci. Rev. – 2015. – V. 141 – P. 105–121.
4. Belviso C. State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues // Prog. Energy Combust. Sci. – 2018. – V. 65. – P. 109–135.
5. Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash / M. Ahmaruzzaman // Prog. Energy Combust. Sci. – 2010. – V. 36. - I. 3. – P. 327–363.
6. Anshits N. N. Chemical composition and structure of the shell of fly ash non-perforated cenospheres produced from the combustion of the Kuznetsk coal (Russia) / N. N. Anshits, O. A. Mikhailova, A. N. Salanov and others// Fuel. – 2010. – V. 89. – I. 8. – P. 1849–1862
7. Fomenko E. V. Compositions and morphology of fly ash cenospheres produced from the combustion of Kuznetsk coal / E. V. Fomenko, N. N. Anshits, L. A. Solovyov and others // Energy Fuels. – 2013. – V. 2. – I. 9. – P. 5440–5448.
8. Fomenko E. V. Characterization of fly ash cenospheres produced from the combustion of Ekibastuz coal / E. V. Fomenko, N. N. Anshits, N. G. Vasilieva and others // Energy Fuels. – 2015 – V. 29. – I. 8. – P. 5390–5403.
9. Fomenko E. V. Gas permeation properties of hollow glass-crystalline microspheres / E. V. Fomenko, E. S. Rogovenko, L. A. Solovyov and others // RSC Adv. – 2014. – V. 4. – I. 20. – P. 9997–10000.
10. Fomenko E. V. Influence of the composition and structure of the glass-crystalline shell of cenospheres on helium permeability / E.V. Fomenko, N.N. Anshits, M.V. Pankova et al. // Glass Phys. Chem. – 2012. – V. 38. – I. 2. – P. 218–227.
11. Fomenko E.V. Helium permeability of microspherical membranes based on mullitized cenospheres / E. V. Fomenko, N. N. Anshits, L. A. Solovyov and others // Dokl. Phys. Chem. – 2010. – V. 435. – I. 2. – P. 202–204.
12. Anshits A. G. Detonation velocity of emulsion explosives containing cenospheres / A. G. Anshits, N. N. Anshits, A. A. Deribas and others // Combustion, Explosion, and Shock Waves – 2005. – V. 41. – I. 5. – P. 591–598.
13. Fomenko E. V. Perforated cenosphere-supported pH-sensitive spin probes / E. V. Fomenko, A. G. Anshits, A. A. Bobko and others // Russ. Chem. Bull. – 2008. – V. 57. – I. 3. – P. 493–498.
14. Vereshchagina T. A. One-step fabrication of hollow aluminosilicate microspheres with a composite zeolite/glass crystalline shell / T. A. Vereshchagina, S. N. Vereshchagin, N. N. Shishkina and others // Microporous Mesoporous Mater. – 2013. – V. 169. – P. 207–211
15. Vereshchagina T. A. Microsphere zeolite materials derived from coal fly ash cenospheres as precursors to mineral-like aluminosilicate hosts for 135,137Cs and 90Sr / T. A. Vereshchagina, S. N. Vereshchagin, N. N. Shishkina and others // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 437. – P. 11–18
16. Shaheen S. M. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – A review / S. M. Shaheen, P. S. Hooda, C. D. Tsadilas // J. Environ. Manage. – 2014. – V. 145. – P. 249–267
17. Martinez–Tarazona M. R. The fate of trace elements and bulk minerals in pulverized coal combustion in a power station / M. R. Martinez–Tarazona; D. A. Spears // Fuel Process. Technol. – 1996. – V. 47. – I. 1. – P. 79–92
18. Moreno N. Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes / N. Moreno, X. Querol, J. M. Andrés et al. // Fuel. – 2005. – V. 84. – I. 11. – P. 1351–1363.
19. Lighty J. S. Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health / J. S. Lighty, J.M. Veranth, A.F.J. Sarofim // Air Waste Manage. Assoc. – 2000. – V. 50. – I. 9. – P. 1565–1622.
20. Riffault V. Fine and ultrafine particles in the vicinity of industrial activities: A review / V. Riffault, J. Arndt, H. Marris et al. // Crit. Rev. Env. Sci. Tech. – 2015. – V. 45. – I. 21. – P. 2305–2356
21. Li Z. Drying shrinkage prediction of paste containing meta-kaolin and ultrafine fly ash for developing ultra-high

performance concrete // Mater. Today Commun. – 2016. – V. 6. – P. 74–80.

22. Yu J. Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash / J. Yu, C. Lu, C.K.Y. Leung, G. Li. // Constr. Build. Mater. – 2017. – V. 147. – P. 510–518

23. Phoo–ngernkham T. The effect of adding nano-SiO2 and nano-Al2O3 on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature / T. Phoo–ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata et al. // Mater. Des. – 2014. – V. 55. – P. 58–65

24. Wei Z. High-aluminum fly ash recycling for fabrication of cost-effective ceramic membrane supports / Z. Wei, J. Hou, Z. Zhu // J. Alloys and Compd. – 2016. – V. 683. – P. 474–480

25. Li J. Potential utilization of FGD gypsum and fly ash from a Chinese power plant for manufacturing fire-resistant panels // J. Li, X. Zhuang, C. Leiva, A. Cornejo et al. // Constr. Build. Mater. – 2015. – V. 95. – P. 910–921

26. van der Merwe E.M. Surface and bulk characterization of an ultrafine South African coal fly ash with reference to polymer applications // E.M. van der Merwe, L.C. Prinsloo, C.L. Mathebula et al. // Appl. Surf. Sci. – 2014. – V. 317. – P. 73–83.

27. Kushnerova O. A. Single-Stage Aerodynamic Separation of Fly Ash Produced after Pulverized Combustion of Coal from the Ekibastuz Basin / O.A. Kushnerova, G.V. Akimochkina, E.V. Fomenko et al. // Solid Fuel Chem. – 2018. – V. 52. – I. 3. – P. 188–200.

28. GOST 10538–87 «Solid fuel. Methods for determination of chemical composition of ash». – M.: Izd-vo standartov, 1987. – 14 p. [in Russian]

29. Zhang H. Fiber reinforced geopolymers for fire resistance applications / H. Zhang, V. Kodur, L. Cao, S. Qi // Procedia Eng. – 2014. – V. 71. – P. 153–158.

30. Kizil'shtein L.Ya. Komponenty zol i shlakov TES (Components of ash and slag of TPSs) / L.Ya. Kizil'shtein, I.V. Dubov, A.L. Shpitsgluz, S.G. Parada. – Moscow: Energoatomizdat, 1995. – 177 p. [in Russian]

31. Raask E. Cenosheres in pulverized-fuel ash // J. Inst. Fuel. – 1968. – V. 41. – I. 332. – P. 339–344.

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ / MEDICINE

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.029

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНАКТИВАЦИИ *BACILLUSATROPHAEUS* С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСТОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Научная статья

Газизов Р.А.[1],* Шамсетдинов Ф.Н.[2]
[1] ORCID: 0000-0003-1329-2842,
[1, 2] Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «Техно Крит», Казань, Россия

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

Аннотация

В работе рассматривается возможность использования сверхкритических флюидов в качестве стерилизующего агента изделий медицинского назначения. Проведены исследования по инактивации Bacillus atrophaeus с применением чистого и модифицированного сверхкритического диоксида углерода. Установлено, что при определенных термодинамических параметрах модифицированный CO_2 является эффективным стерилизующим агентом в отношении спор Bacillus atrophaeus. Определена длительность достижения полной инактивации.

Ключевые слова: Стерилизация, медицинские инструменты, сверхкритические флюидные среды, микроорганизмы.

STUDY OF *BACILLUS ATROPHAEUS* INACTIVATION WITH CLEAN AND MODIFIED CARBON DIOXIDE

Research article

Gazizov R.A.[1,] *, Shamsetdinov F.N.[2]
[1] ORCID: 0000-0003-1329-2842,
[1, 2] Limited Liability Company “Techno Crit” Research and Production Company, Kazan, Russia

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

Abstract

The authors consider the possibility of the use of supercritical fluids as sterilizing agents for medical devices. They conducted studies on the inactivation of Bacillus atrophaeus with pure and modified supercritical carbon dioxide. It has been found that under certain thermodynamic parameters, modified CO_2 is an effective sterilizing agent against Bacillus atrophaeus spores. The duration of achieving complete inactivation is also determined.

Keywords: Sterilization, medical instruments, supercritical fluids, microorganisms.

Введение

Стерилизация медицинских изделий является одной из актуальных проблем в современной медицине. Разнообразие медицинского инструментария, наличие деталей в их конструкции из полимерных и других материалов, труднодоступность отдельных узлов для обработки, создают определённые сложности при стерилизации, а также в выборе оптимального метода в каждом конкретном случае. Таким образом, разработка новых инновационных технологий в области стерилизации медицинских изделий является крайне востребованным.

К наиболее распространенным методам стерилизации относятся химический, термический и радиационный. Каждый из этих методов имеет определенные недостатки, особенно при стерилизации термолабильных и геометрически сложных изделий, могут содержать неудаленный остаток токсичного газа, возможна высокая огне- и взрывоопасность, большие энергозатраты и продолжительность процесса, разрушение стерилизуемого материала и т.д. [1].

С конца прошлого века ведется интенсивный поиск новых методов стерилизации медицинских изделий с минимумом недостатков присущих традиционным способам. К таким методам можно отнести стерилизацию с использованием сверхкритических флюидных сред [2], [3]. В настоящее время во многих странах мира (Италия, Испания, Бельгия, Япония, США, Тайвань, Корея и др.) ведутся исследования взаимодействия сверхкритического CO_2 с микроорганизмами. В работах [4], [5], [6] показана эффективность и возможность использования этого метода в пищевой и фармацевтической промышленностях, как альтернатива традиционным методам стерилизации.

Цель исследования

Изучить возможность использования сверхкритических флюидов в качестве стерилизующего агента изделий медицинского назначения, в частности, для инактивации Bacillus atrophaeus с применением чистого и модифицированного сверхкритического CO_2.

Материалы и методы исследования

Подбором сверхкритического растворителя с достаточно низкой критической температурой можно исключить термическое разложение компонентов материала, а также значительно снизить энергетические издержки в крупнотоннажных установках. Так широкому использованию сверхкритического CO_2 в качестве инактиватора способствуют следующие его свойства:

- относительно низкая критическая температура (исключается термическое разложение компонентов обрабатываемой смеси);
- высокая регенерируемость (обеспечивается многократное использование растворителя);
- низкая вязкость и высокий коэффициент диффузии;

- абсолютная нетоксичность (безопасность производства и охрана окружающей среды);
- невоспламеняем ость (безопасность производства).

В течение последних двух десятилетий была проведена большая фундаментальная работа по описанию взаимодействия между средами в сверхкритическом состоянии и микроорганизмами как в вегетативных, так и скрытых формах, чтобы понять эффект стерилизации и попытаться регулировать эффективность процесса стерилизации.

Существуют несколько объяснений механизмов инактивации вегетативных клеток при обработке CO_2 [7-10]. Механизмы включают разрушение клеток во время разгерметизации или повышение давления, извлечение жизненно важных внутриклеточных компонентов, снижение pH и инактивацию важных ферментов. Из-за различий в структурах и биохимических составах между вегетативными клетками и спорами механизмы стерилизации отличаются.

Отмеченные работы являются лишь частью многочисленных исследований в этой области. Зная, что инактивация бактерий «естественно загрязненного» материала иногда сильно отличается от того, что можно ожидать от опубликованных результатов лабораторных экспериментов, трудно сделать однозначные выводы об эффективности предлагаемых методов из этих доступных результатов, которые часто противоречат друг другу. Так, до сих пор нет однозначного мнения о характере влияния давления и температуры на эффективность стерилизации. Поэтому исследования в данной области остаются востребованными и актуальными.

Изученные работы подтверждают, что сверхкритическая флюидная стерилизация успешна в отношении широкого ряда микроорганизмов и что этот процесс не приводит к физической или химической деградации материала изделия. Для оптимизации данной процедуры в целях возможного крупномасштабного использования, необходимо выявить закономерности взаимодействия и фундаментальные механизмы сверхкритической флюидной CO_2-инактивации.

Результаты исследования и обсуждение

В настоящей работе проведен процесс стерилизации спор Bacillus atrophaeus с применением чистого и модифицированного сверхкритического CO_2 водой (H_2O), этанолом (C_2H_5OH) и перекисью водорода (H_2O_2). В качестве модификатора перекись водорода была выбрана по нескольким причинам – проверенный антимикробный агент, который имеет ограниченную растворимость в сверхкритическом CO_2, и, легко разлагается на H_2O и O_2 после стерилизации, не оставаясь в системе.

В качестве аппаратурного оформления для проведения данного исследования была использована оригинальная установка, схематично представленная на рис. 1. Основным элементом установки является ячейка высокого давления рабочим объемом 0,0005 м^3, выполненная из стали марки 12Х18Н10Т.

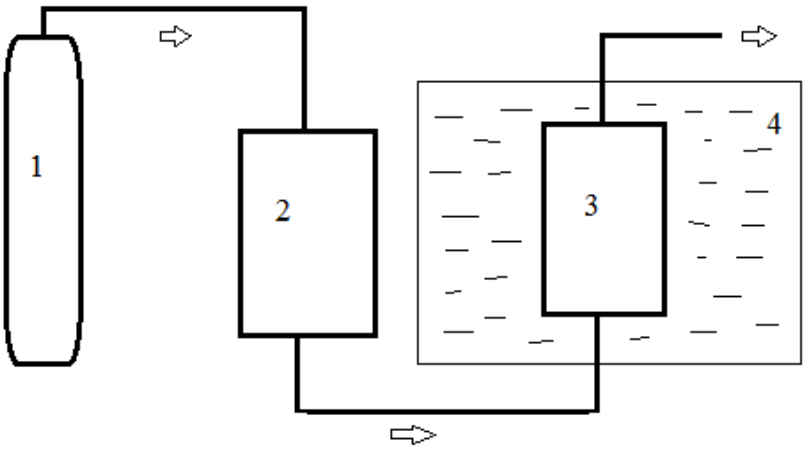


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки:
1 – баллон с CO_2; *2* – термокомпрессор; *3* – ячейка высокого давления (автоклав); *4* – термостат

При обработке образцов Bacillus atrophaeus чистым сверхкритическим CO_2 в диапазоне давлений 15÷30 МПа и температур 313÷373 К наблюдалось снижение их активности, но 100% уничтожение не зафиксировано (табл. 1). Добавление в диоксид углерода 3% массовых долей воды в качестве модификатора также каких-либо значимых результатов не дало. Подобная ситуация наблюдалась и при использовании этанола в качестве модификатора основного стерилизующего агента – CO_2. С увеличением доли C_2H_5OH в диоксиде углерода до 3% наблюдалась частичная инактивация.

Таблица 1 – Условия воздействия чистого и модифицированного сверхкритического CO_2 на споры Bacillus atrophaeus

№	Давление, МПа	Температура, К	Время обработки, мин	Модификатор (массовая доля в CO_2)	Степень стерилизации
1	15	323	240	--	--
2	30	323	240	--	--
3	30	373	240	--	частичная
4	30	333	240	H_2O (3%)	--
5	30	313	240	C_2H_5OH (1%)	--
6	30	313	120	C_2H_5OH (3%)	--
7	30	313	240	C_2H_5OH (3%)	частичная
8	30	333	240	C_2H_5OH (3%)	частичная
9	10	313	240	H_2O_2 (1%)	частичная
10	30	313	120	H_2O_2 (1%)	частичная
11	30	313	240	H_2O_2 (1%)	полная

Также, были проведены опыты по инактивации Bacillus atrophaeus путем воздействия сверхкритического CO_2, модифицированного перекисью водорода, в течение 2 и 4 часов при давлениях 10 МПа и 30 МПа на изотерме 313 К. Массовая доля перекиси водорода в сверхкритическом CO_2 составляла 1%. При воздействии в течение 2 часов (P = 10 МПа) и 4 часов (P = 30 МПа) наблюдалась неполная инактивация Bacillus atrophaeus. При давлении 30 МПа и четырехчасовой продолжительности обработки был достигнут 100 % эффект стерилизации.

Заключение

По результатам проведенной работы, можно резюмировать, что по сравнению с высокотемпературной стерилизацией, применение модифицированного перекисью водорода сверхкритического CO_2 снижает температуру инактивации и время обработки спор Bacillus atrophaeus. Так же, можно констатировать эффективность выбранного модификатора в качестве антимикробной добавки, оказавшего положительный синергетический эффект на инактивацию исследуемого материала. Полученные результаты являются отправными точками для дальнейших изысканий по данной тематике с целью выявления более точного вектора в поиске оптимальных модифицирующих веществ сверхкритического CO_2 в рамках его применения в качестве стерилизующего агента медицинских изделий.

Финансирование

Работа, по результатам которой выполнена статья, осуществлена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-48-160048.

Funding

The scientific research, the basis of this article, was carried out with the financial support of the RFBR (Russian Foundation for Basic Research) and the Government of the Republic of Tatarstan within the research project No. 18-48-160048.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Салманов А. Г.Стерилизация изделий медицинского назначения / А. Г.Салманов, О. М.Вернер.– Х.:ФОП Панов А.М., 2015. – 412 с.

2. Jiménez A.Compatibility of Medical-Grade Polymers with Dense CO_2 / A. Jiménez, G. L.Thompson, M. A.Matthewset al // Supercritical Fluids. – 2007. – № 42, – P. 366-372

3. Залепугин Д. Ю. Стерилизация пористого сверхмолекулярного полиэтилена в субкритических фреонах/ Д. Ю.Залепугин, А. В.Максимкин, М. В. Кисилевский и др.// Сверхкритические флюиды: Теория и практика. – 2016. – Т.11. – №1. –С. 84-90.

4. Lanzalaco S. Sterilization of macroscopic poly(l-lactic acid) porous scaffolds with dense carbon dioxide: Investigation of the spatial penetration of the treatment and of its effect on the properties of the matrix / S. Lanzalaco, S. Campora, V. Brucatoetal // J. of Supercritical Fluids. – 2016.–№ 111.–P. 83-90

5. Perrut M. Sterilization and virus inactivation by supercritical fluids (a review)/ M. Perrut// J. of Supercritical Fluids. – 2012.– V. 66. – P. 359-371.

6. Ellis J. L. Supercritical CO_2 sterilization of ultra-high molecular weight polyethylene. / J. L. Ellis, J. C. Titone, D. L. Tomaskoat al // J. Supercritical Fluids. – 2010. – V. 52. –P. 235-240.

7. Zhang J. Sterilization using high-pressure carbon dioxide – a review /J. Zhang, T. A.Davis, M. A.Matthews and others // J. of Supercritical Fluids.– 2006. –V. 38. – Is. 3. – P. 354-372

8. Spilimbergo S. Non-thermal bacteria inactivation with dense CO_2 /S. Spilimbergo, A. Bertucco// J. of Biotechnology and Bioengineering. – 2003.– № 84.– P. 627-638.

9. Hossain Md. S. Modeling the inactivation of Staphylococcus aureus and Serratiamarcescens in clinical solid waste using supercritical fluid carbon dioxide / Md. S. Hossain, V. Balakrishnan, N. AbRahman et al // J. of Supercritical Fluids.– 2013. – V. 83. – P. 47-56.

10. Silva M. A. Inactivation of Bacillus subtilis and Geobacillus stearothermophilus inoculated over metal surfaces using supercritical CO_2 process and nisin / M. A. Silva, A. P. Araujo, J. de S. Ferreira //J. of Supercritical Fluids. –2016. – V. 109. – P. 87-94.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Salmanov A .G. Sterilizacija izdelij medicinskogo naznachenija [Sterilization of products of medical appointment]/ A. G. Salmanov, O. M. Verner.–H.: FOP Panov A.M., 2015. – 412 P. [in Russian]

2. Jiménez A. Compatibility of Medical-Grade Polymers with Dense CO_2 / A. Jiménez, G. L. Thompson, M. A. Matthews et al // Supercritical Fluids. – 2007. – № 42, – P. 366-372

3. Zalepugin D. Ju. Sterilizacija poristogo sverhmolekuljarnogo polijetilena v subkriticheskih freonah [Sterilization of porous supermolecular polyethylene in subcritical freons] / D. Ju.Zalepugin, A. V. Maksimkin, M. V. Kisilevskij and others. // Sverhkriticheskie fljuidy: Teorija i praktika [Supercritical fluids: Theory and practice]. – 2016. – V.11. – №1. – P. 84-90. [in Russian]

4. Lanzalaco S. Sterilization of macroscopic poly(l-lactic acid) porous scaffolds with dense carbon dioxide: Investigation of the spatial penetration of the treatment and of its effect on the properties of the matrix / S. Lanzalaco, S. Campora, V. Brucato and others // J. of Supercritical Fluids. – 2016. –№ 111.–P. 83-90.

5. Perrut M. Sterilization and virus inactivation by supercritical fluids (a review) / M. Perrut // J. of Supercritical Fluids. – 2012. – V. 66. – P. 359-371.

6. Ellis J. L. Supercritical CO_2 sterilization of ultra-high molecular weight polyethylene. / J. L. Ellis, J. C. Titone, D. L. Tomasko and others // J. Supercritical Fluids. – 2010. – V. 52. –P. 235-240.

7. Zhang J. Sterilization using high-pressure carbon dioxide – a review / J. Zhang, T. A. Davis, M. A. Matthews and others // J. of Supercritical Fluids. – 2006. – V. 38. – Is. 3. – P. 354-372.

8. Spilimbergo S. Non-thermal bacteria inactivation with dense CO_2 / S. Spilimbergo, A. Bertucco // J. of Biotechnology and Bioengineering. – 2003. – № 84. – P. 627-638.

9. Hossain Md. S. Modeling the inactivation of Staphylococcus aureus and Serratiamarcescens in clinical solid waste using supercritical fluid carbon dioxide / Md. S. Hossain, V. Balakrishnan, N. AbRahman et al // J. of Supercritical Fluids. – 2013. – V. 83. – P. 47-56

10. Silva M. A. Inactivation of Bacillus subtilis and Geobacillus stearothermophilus inoculated over metal surfaces using supercritical CO_2 process and nisin / M. A. Silva, A. P. Araujo, J. de S. Ferreira // J. of Supercritical Fluids. – 2016. – V. 109. – P. 87-94.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.030

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ЭРИТРОЦИТОВ У ЛИЦ УМЕРШИХ ОТ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ

Научная статья

Алексеев Р.З.[1], Гольдерова А.С.[2], Мамаева С.Н.[3], Платонова В.А.[4], Саввинова Л.Н.[5,] *, Афанасьева С.С.[6], Кычкина Т.В.[7]

[1] ORCID: 0000-0002-6451-2852,

[1] Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Якутский научный центр комплексных медицинских проблем», Якутск, Росиия;

[2] ORCID: 0000-0002-6739-9453;

[3] ORCID: 0000-0003-3676-5630,

[2, 3, 4, 5, 5, 7] Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия

* Корреспондирующий автор (liya.poryadina[at]gmail.com)

Аннотация

В данной работе представлены результаты исследования морфологии эритроцитов умершего от переохлаждения при температурных условиях Якутии (ниже -40°С) методами растровой электронной микроскопии (РЭМ). Выявлены характерные особенности морфологии эритроцитов, проведены сравнения экспериментальных данных до и после вскрытия. До вскрытия преобладали дискоциты и только 15% составили изменнные эритроциты – эхиноциты. После вскрытия процент эхиноцитов вырос более чем в два раза. Результаты исследования могут быть использованы в формировании фундаментальных представлений о клеточных изменениях в критических состояниях и о возможных механизмах восстановления клеток и их функциональных свойств.

Ключевые слова: переохлаждение, морфология эритроцитов, растровая электронная микроскопия.

MAIN FEATURES OF ERYTHROCYTES MORPHOLOGY IN PERSONS DEAD OF HYPOTHERMIA

Research article

Alekseev R.Z.[1], Golderova A.S.[2], Mamaeva S.N.[3], Platonova V.A.[4], Savvinova L.N.[5,] *, Afanasyeva S.S.[6], Kychkina T.V.[7]

[1] ORCID: 0000-0002-6451-2852,

[1] Federal State Budgetary Scientific Institution “Yakut Scientific Center for Complex Medical Problems,” Yakutsk, Russia

[2] ORCID: 0000-0002-6739-9453;

[3] ORCID: 0000-0003-3676-5630,

[2, 3, 4, 5, 5, 7] Ammosov North-Eastern Federal University,Yakutsk, Russia

* Corresponding author (liya.poryadina[at]gmail.com)

Abstract

This paper presents the results of the study of erythrocytes morphology of the persons dead of hypothermia under the temperature conditions of Yakutia (below -40 °C) with the help of scanning electron microscopy (SEM). Characteristic features of the erythrocyte morphology were revealed, and experimental data were compared before and after prosection. Before prosection, discocytes prevailed and only 15% were altered erythrocytes, that is – echinocytes. After prosection, the percentage of echinocytes more than doubled. The results of the study can be used in the formation of fundamental ideas about cellular changes in critical states and possible mechanisms for the recovery of cells and their functional properties.

Keywords: hypothermia, erythrocyte morphology, scanning electron microscopy.

Изучение состояния эритроцитов при критических, терминальных и постреанимационных состояниях позволяет выявить, как реагируют клетки, ответственные за газообмен в организме, на сильные изменения обмена веществ, происходящие при критических состояниях, и как при этом изменяются их функциональные, структурные и биохимические свойства. Изменения морфофункциональных свойств эритроцитов приводят к нарушению газообмена, изменению pH крови, и при этом изменяется метаболизм, поскольку эритроциты являются переносчиками некоторых ферментов. Поэтому восстановление или сохранение популяции функциональных эритроцитов может решить не только проблемы, связанные с газообменом, но и восстановить метаболизм, нарушенный при критических состояниях. Необходимы дальнейшие исследования состояния эритроцитов при критических состояниях для поиска способов коррекции морфологических, функциональных и ультраструктурных изменений эритроцитов [1].

Общее охлаждение и отморожения являются одними из тяжелых видов холодовой травмы, зачастую приводящие к высокому уровню инвалидизации и летальному исходу пострадавших [2]. В настоящее время в мире до конца не изучены вопросы смерти от общего охлаждения в условиях сверхнизких температур (ниже -40°С). В реальных условиях лиц, умерших от переохлаждения (по внешним признакам) без проведения реанимационных мероприятий доставляются в морг. Немаловажным моментом, возможно считается, что в течение первых 2-х суток пострадавшие находятся в состоянии холодового анабиоза (очень редкий пульс, низкое АД) и вероятность восстановления жизнедеятельности организма не исключается (отмечаются случаи сохранения жизнедеятельности сердца и других органов у замерзших животных).

Учитывая вышеперечисленное, нам представляется интересным определение особенностей морфологии эритроцитов при воздействии на организм низких температур (-40°С) у умерших от переохлаждения в условиях Якутии.

Объекты и методы исследования

С помощью растрового электронного микроскопа JEOL-7800 с термополевой эмиссионным катодом Шоттки и супергибридной объективной линзой, с использованием нижнего детектора вторичных электронов при напряжении от

0.1 кВ до 30 кВ. Обследованы мазки крови умершего от переохлаждения неизвестного мужчины 35-40 лет, обнаруженного в окрестности г. Якутска и доставленного ночью 24.12.2017 г. (температура воздуха -45°С). Применение данного режима электронного микроскопа при измерениях позволяют провести исследования поверхности эритроцитов образцов крови без повреждения, не применяя при этом напыление проводящих покрытий.

Нативные мазки крови были сделаны на предметном стекле по общепринятой методике. Первые мазки (до вскрытия) были сделаны сразу после доставки трупа в морг из области печени, т.к. проведенная термометрия внутренних органов и тканей показала максимальное значение температуры именно в печени, равную +24°С. Вторые мазки были сделаны через двое суток после полного оттаивания трупа после вскрытия.

Результаты исследования и их обсуждение

Эритроциты периферической крови традиционно служат моделью для оценки глубины повреждения мембран при патологическом процессе, протекающем в организме.

В нашем исследовании анализ РЭМ-изображений до вскрытия трупов указывает, что в исследуемых полях зрения отмечается конгломерация эритроцитов и преобладание дискоцитов (рис.1). Только около 15% эритроцитов имеют измененную форму: содержание эхиноцитов – сферических клеток, на поверхности которых достаточно регулярно располагаются так называемые спикулы, составило всего 13,72%, а акантоцитов – 2,68%.

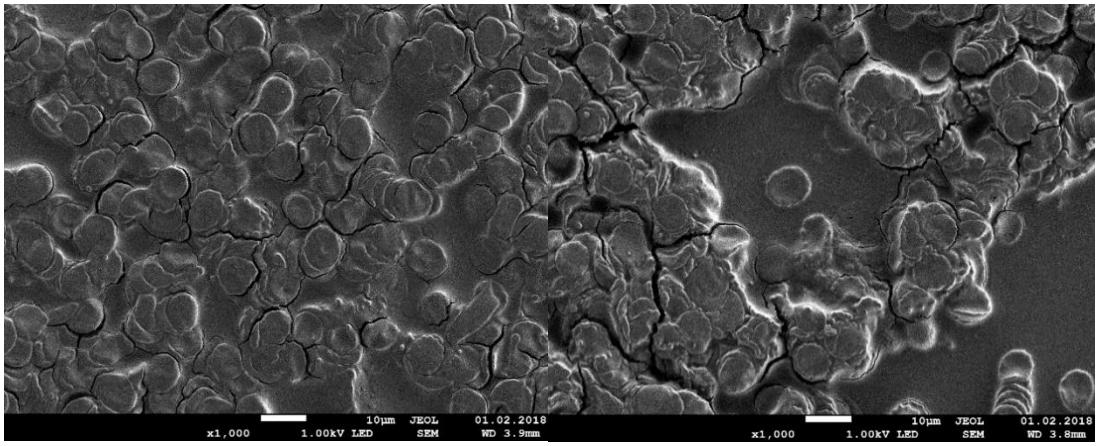


Рис.1 – РЭМ-изображения эритроцитов умершего от переохлаждения при увеличении в 1000х до вскрытия

Эхиноциты имеют на поверхности острые или тупые зубчики, сходной величины, равномерно распределенные на поверхности клетки. Эхиноциты образуются при деградации эритроцитов, увеличении pH, истощении запасов АТФ, а также при повышении уровня внутриклеточного кальция. Акантоциты – это эритроциты с беспорядочно расположенными на поверхности клетки зубчиками неодинаковой величины. Они образуются при избыточном по сравнению с фосфолипидами содержании холестерина в крови или нарушении состава липопротеинов плазмы [3]. Известно, что акантоцитарные формы эритроцитов определяются дефектом структурной мембраны [4], тогда как эхиноцитарные формы могут быть вызваны и отменены с помощью pH, осмолярности, биохимических и даже электрических изменений [5].

Исследование мазков крови, сделанных после вскрытия, т.е. после воздействия положительной комнатной температуры, процент эхиноцитов увеличился в 2,01 раза и составило 27,58%, а процент акантоцитов - наоборот уменьшился в 3,11 раз до 0,86% по сравнению с данными до вскрытия (рис.2). Следует отметить, что конгломераты из измененных эритроцитов после вскрытия стали крупнее размером, а степень изменений мембраны эритроцитов (за счет увеличения эхиноцитов) существенно увеличилась. Выявленные нами особенности морфологии эритроцитов при переохлаждении, а именно существенное преобладание эхиноцитов над акантоцитами, косвенно могут подтверждать возможность восстановления эхиноцитов в дискоциты, но при соблюдении определенных условий среды.

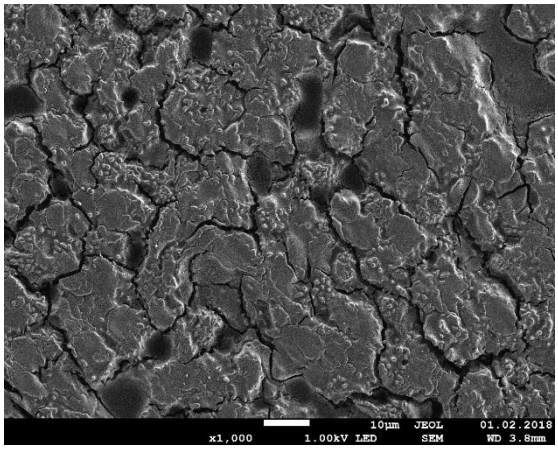


Рис.2 – РЭМ-изображения эритроцитов умершего от переохлаждения при увеличении в 1000х после вскрытия

Нами проведен сравнительный анализ диаметров эритроцитов до и после вскрытия трупа, который выявил статистически значимые различия (p=0,043), (7,78 ± 1,30 мкм и 6,94 ± 1,25 мкм, соответственно). Характерно, что до вскрытия преобладали эритроциты с диаметром больше 8 мкм, а после вскрытия – эритроциты менее 7 мкм (рис.3).

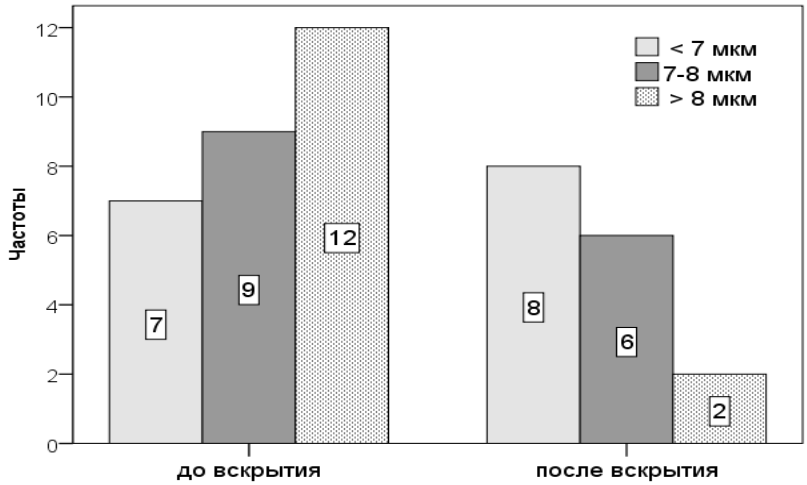


Рис. 3 – Распределении частот в зависимости от диаметра эритроцитов до и после вскрытия

Распределение эритроцитов в зависимости от диаметра на 3 группы (1 группа – менее 7 мкм; 2 группа – от 7 до 8 мкм; 3 группа – более 8 мкм) указывает (рис.3), что до вскрытия в крови преобладают эритроциты имеющие диаметр более 8 мкм. После вскрытия – диаметр эритроцитов уменьшается, большинство эритроцитов имеют диаметр меньше 7 мкм.

Из литературных источников известно, что в условиях окислительного стресса собственная ферментативная защита эритроцитов слабеет в связи с быстрой инактивацией конститутивного пула ферментов [6]. В связи с ингибированием ферментов нарушается процесс обмена веществ (синтез АТФ), изменяется проницаемость мембраны, снижается способность транспортировать вещества, в том числе кислород. Воздействие высоких температур также отражается на морфологии эритроцитов. Например, при гипертермии, смоделированной на крысах, происходило изменение диаметра эритроцитов [7]. Известно, что при хранении донорской крови или эритроцитарной массы при 4°С в эритроцитах снижается содержание АТФ [8, 9]. При этом изменяется морфология эритроцитов – из дискоцита они превращаются в эхиноциты [10].

Следующим этапом нашего исследования явилась сравнительный анализ особенностей спикул (отростков эхиноцитов). Оценивались длина (n=68) и ширина (n=52) спикул до и после вскрытия. Проведенный статистический анализ показал статистически значимые различия между ними (p=0,005 и p=0,001, соответственно). Длина и ширина спикул эхиноцитов до вскрытия оказались существенно больше, чем после вскрытия (рис.4).

Таким образом, воздействие положительной комнатной температуры в течение 1 до 2 суток проявляется статистически значимым уменьшением диаметра и размеров (длина и ширина) спикул эритроцитов.

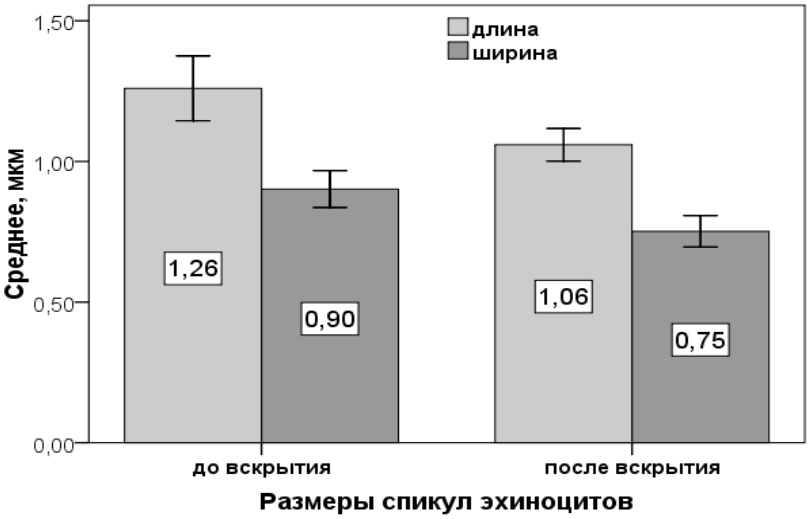


Рис.4 – Продольные и поперечные размеры спикул эхиноцитов до и после вскрытия

Заключение

Полученные результаты показывают наличие существенных различий в морфологии эритроцитов и их количественного соотношения дисморфных эритроцитов, что указывает на необходимость дальнейшего изучения этой проблемы для выявления зависимости возможного восстановления клеток, их нормальной популяции и их функциональных свойств в зависимости от способа отогревания умерших от переохлаждения при определенных температурных условиях.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Мороз В. В. Строение и функция эритроцита в норме и при критических состояниях // В. В. Мороз, А. М. Голубев, А. В.Афанасьев. Общая реаниматология. – 2012. – VIII; 1. – С.52 – 60

2. Алексеев Р. З. Комплексное лечение отморожений в дореактивном периоде: автореферат дис. ... доктора медицинских наук: 14.00.22. - // Р. З. Алексеев - Москва, 1999. - 29 с.

3. Стацевич Л. Н. Атлас морфология и патология эритроцитов: электрон. учеб.-метод. Пособие / Л. Н. Стацевич, О.С. Козлова, НГАУ – Новосибирск, 2012. – 31 с.

4. Perrin J. Acanthocytes et hypercholesterolemia / J. Perrin, A. Georges, A. Morali and others. Ann BioloClin. 2008;66(5):56972.

5. Mrowietz C. Reversibility of Echinocyte Formation after Contact of erythrocytes with various Radiographic Contrast Media / C. Mrowietz, B. Hiebl, R. P. Franke. ClinHemorheolMicrocirc. 2008;39 (1–4): 281–6.

6. Чеснокова Н. П. Молекулярно- клеточные механизмы инактивации свободных радикалов в биологических системах. Усп. соврем. естествознания // Н. П. Чеснокова, Е. В. Понукалина, М. Н. Бизенкова - 2006; 7: 29—36.

7. Козлов Н. Б. Термоустойчивость гомойотермного организма: биохимические механизмы, пути повышения. // Н.Б. Козлов - Смоленск: изд-во СГМИ; 1992. 115.

8. Karger R. 2012. Deformability of red blood cells and correlation with ATP content during storage as leukocyte-depleted whole blood / R. Karger, C. Lukow, V. Kretschmer. Transfus. Med. 39 : 277—282.

9. Hess J. R. 2014. Measures of stored red blood cell quality / J. R. Hess. Vox Sang.107: 1—9.

10. Reinhart S. A. Studies on metabolically depleted erythrocytes / S. A. Reinhart, T. Schulzki, P. O. Bonetti, Reinhart W. H.. Clin. Hemorheol. Microcirc. 2014, 56 : 161—173.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Moroz V. V. Stroenie i funkcii eritrocita v norme i pri kriticheskih sostoyaniyah // Obshaya reanimatologia [Erythrocite's Structure and Function in normal and critical conditions // General resuscitation] / V. V. Moroz, A. M. Golubev, A. V. Afanasyev. – 2012. – VIII; 1. – P.52-60. [in Russian]

2. Alekseev R. Z. Kompleksnoe lechenie otmorojeniy v doreaktivnom periode: avtoreferat [Complex treatment of a Frostbite in Prereactive Period: autoessay] / R. Z. Alekseev dis. … DMedSc: 14.00.22 – Moskva, 1999. – 29 P. [in Russian]

3. Stacevich L. N. Atlas morfologiya i patologiya eritrocitov: electron.ucheb.-metod.posobie [Atlas Morphology and Pathology of Red Blood Cells: electronic educational-metodical manual] / L. N. Stacevich, O. S. Kozlova – National Agrarian University of Novosibirsk, 2012. – P.31 [in Russian]

4. Perrin J. Acanthocytes et hypercholesterolemia / J. Perrin, A. Georges, A. Morali and others, Ann BioloClin. 2008;66(5):56972

5. Mrowietz C. Reversibility of Echinocyte Formation after Contact of erythrocytes with various Radiographic Contrast Media / C. Mrowietz, B. Hiebl, R. P. Franke. ClinHemorheolMicrocirc. 2008;39 (1–4): 281–6.

6. Chesnokova N. P. Molekulyarno-kletochnie mehanizmy inaktivacii svobodnyh radikalov v biologicheskih sistemah. Usp. sovremennogo estestvoznaniya. [Molecular and Cellular Mechanisms of Inactivation of Free Radicals in Biological Systems] / N. P. Chesnokova, E. V. Ponukalina, M. N. Bizenkova, – 2006, P.29- 36.[in Russian]

7. Kozlov N. B. Termoustoychivost gomoyotermnogo organizma: biohimicheskie mehanizmy, puti povisheniya. [Homoiothermal Resistance of the Organism: Biochemichal Mechanisms, Ways to Increase.] / N. B. Kozlov – Smolensk publishing SHMI, 1992, P. 115 [in Russian]

8. Karger R. Deformability of red blood cells and correlation with ATP content during storage as leukocyte-depleted whole blood / R. Karger, C. Lukow, V. Kretschmer. Transfus. Med. 2012, 39 : 277—282.

9. Hess J. R. . Measures of stored red blood cell quality. Vox Sang. 107 : 1—9.

10. Reinhart S. A. Studies on metabolically depleted erythrocytes / S. A. Reinhart, T. Schulzki, P. O. Bonetti and others. Clin. Hemorheol. Microcirc. 2014, 56 : 161—173.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.031

ФИКСИРОВАННЫЕ КОМБИНАЦИИ САХАРОСНИЖАЮЩИХ ПРЕПАРАТОВ: СТАНДАРТЫ ПРИМЕНЕНИЯ В РФ, США И ЕВРОПЕ

Научная статья

Сорокина Ю.А.[1,] *, Гаврилова Д.М.[2], Копылова М.В.[3], Барсук А.Л.[4]
[1] ORCID: 0000-0001-8430-237X,
[1, 2, 3, 4] Приволжский Исследовательский Медицинский Институт, Нижний Новгород, Россия

* Корреспондирующий автор (zwx[at]inbox.ru)

Аннотация

Рассмотрена актуальность вопроса лечения сахарного диабета второго типа. Отмечены недостатки монотерапии и преимущества использования в терапии рациональных комбинаций сахароснижающих препаратов. Проведен сравнительный анализ наиболее используемых групп препаратов, а также фиксированных комбинаций в России, Европе и США. Предположительно установлены причины различий в их ассортименте. Предложены возможные рациональные комбинации сахароснижающих препаратов для лечения сахарного диабета 2го типа в России.

Ключевые слова: сахарный диабет второго типа, сахароснижающие препараты, рациональные комбинации, комбинированные препараты.

FIXED COMBINATIONS FOR SUGAR-DECREASING PREPARATIONS: APPLICATION STANDARDS IN THE RUSSIAN FEDERATION, USA AND EUROPE

Research article

Sorokina Yu.A.[1,] *, Gavrilova D.M.[2], Kopylova M.V.[3], Barsuk A.L.[4]
[1] ORCID: 0000-0001-8430-237X,
[1, 2, 3, 4] Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russia;

* Corresponding author (zwx[at]inbox.ru)

Abstract

The relevance of the treatment of diabetes mellitus type II is considered in the article. The disadvantages of monotherapy and the advantages of using rational hypoglycemic drugs are noted. Comparative analysis of the most used groups of drugs, as well as fixed combinations in Russia, Europe and the United States is performed. Potential reasons for the differences in their assortment are established. Possible rational combinations of hypoglycemic drugs for the treatment of diabetes mellitus type II in Russia are proposed.

Keywords: diabetes mellitus type II, hypoglycemic drugs, rational combinations, fixed combination.

Проблема фармакотерапии при сахарном диабете второго типа (СД 2 типа) актуальна во всем мире [1, С. 331-332]. Согласно данным международной федерации диабета, более 415 млн (8,8% всего населения) человек во всем мире страдают сахарным диабетом, к 2040 году это число достигнет 642 млн (10,4%). При этом, на данный момент 320,5 млн пациентов СД2 относятся к группе трудоспособного населения (20-64 года). Кроме того, еще у 318 млн человек отмечается нарушение толерантности к глюкозе, что значительно повышает риск развития СД в будущем. Уже в 2017 году в мире насчитывалось 425 млн больных СД, а к 2045 число пациентов увеличится на 48%. Стремительный рост СД 2 типа, уже давно принявший характер эпидемии, обуславливает необходимость более глубокого изучения этиологических и патофизиологических факторов его развития, поиска новых путей лечения [2], [3].

Известно, что СД 2 типа может быть инсулинпотребным– в этом случае снижена выработка собственного инсулина из – за прогресса дисфункции бета – клеток поджелудочной железы. Препараты инсулина или секретагоги инсулина недостаточно эффективны, и необходимо воздействие на рецепторы (повышение их чувствительности, устранение инсулинорезистентности). В такой ситуации назначение одного только препарата точно не сможет оказать необходимый эффект [4, С. 55], [5, С. 56]. Для оптимизации к компенсации углеводного обмена рациональна комбинированная терапия сахароснижающими препаратами [5], [6], [13].

Препараты с разным механизмом действия в комбинации дополняют фармакологические эффекты друг друга, позволяют снизить дозы и уменьшить побочные эффекты, улучшают контроль гликемии, снижают частоту неблагоприятных эффектов и таким образом улучшают приверженность к лечению [5], [14]. К тому же, применение комбинации нескольких сахароснижающих препаратов могут не только снизить необходимое для лечения количество инсулина, но и отсрочить начало его использования [4, С. 57].

Поиск новых препаратов и совершенствование уже имеющихся препаратов для лечения СД 2 типа продолжается [8].

В настоящее время в США и Европе используются 9 групп пероральных препаратов [4], [8], [9]:

1) производные сульфонилмочевины (ПСМ),
2) меглитиниды(глиниды),
3) метформин (бигуаниды),
4) тиазолидиндионы,
5) ингибиторы α-глюкозидаз,
6) дипептидил пептидазы IV (иДПП-4) ингибиторы,
7)секвестранты желчных кислот,
8) агонист дофаминовых рецепторов 2 типа,
9) ингибиторы натрий-глюкоза транспортного белка (иНГЛТ-2)

Также помимо инсулинов используют еще 2 типа инъекционных лекарств: глюкогоноподобный пептид – 1 (миметик инкретина, аГПП-1) и аналог амилина.

В российских Алгоритмах специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом [10] отсутствуют некоторые лекарственные препараты, рекомендованные для применения в Европе и США, например, секвестранты желчных кислот аналоги дофамина и амилина [4], [8].

Секвестранты желчных кислот, согласно Стандартам помощи в США [9], снижают продукцию глюкозы печенью и усиливают секрецию инкретинов, а агонисты рецепторов допамина (бромкриптин) модулирует гипоталамическую регуляцию обмена веществ и повышает чувствительность к инсулину.Широко используются фиксированные комбинации препаратов, что делает процесс приема лекарств более удобным и экономичным. Их ассортимент разнится в США, Европе и России (Таблица 1) [4], [8], [9], [10].

Таблица 1 – Разнообразие фиксированных комбинаций в РФ, США и Европе

Препарат 1	**Препарат 2**	**Препарат 3**	**РФ**	**США**	**Европа**
Метформин	Канаглифлозин		нет	Инвокамет	Инвокамет
Метформин	**Вилдаглиптин**		**Галвус Мет**	нет	Галвумет R
Метформин	**Ситаглиптин**		**Янумет**, Янумет Лонг	Янумет	Янумет R, Истамет
Глимепирид	Пиоглитазон		нет	Детакт	нет
Метформин	Глимепирид	Пиоглитазон	нет	нет	Глицифит трио G1, G2
Глимепирид	**Метформин**		**Амарил М**, Глидика М	нет	Глицифит G1, G2, Диапред-м2, Глюконорм
Метформин	Пиоглитазон		нет	АКТОСплюсМет, АКТОСплюсМетXR	Пиоглу
Метформин	Воглибос		нет		Волиикс, Глицифит v 0.2, v 0.3
Глипизид	Метформин		нет	Метаглиб	Метаглиб
Саксаглиптин	**Метформин ER**		**Комбоглиз Пролонг**	Комбиглиз XR	Комбиглиз XR
Метформин	Росиглитазон		Авандамет	Авандамет	Авандамет R
Гликлазид	**Метформин**		**Глимекомб**		Диамикрон XR
Глимепирид	Росиглитазон		Авандаглим	Авандарил	нет
Репаглинид	Метформин		нет	ПрандиМет	нет
Глибенкламид	**Метформин**		**Глюкованс и многие другие**	Глюкованс	нет
Линаглиптин	**Метформин**		**Джентадуэто**	Джентадуэто	нет
Алоглиптин	Метформин		Випдомет	Казано	нет
Алоглиптин	Пиоглитазон		нет	Осени	нет
Дапаглифлозин	Метформин		Сигдуо Лонг	Ксигдуо XR	нет
Эмпаглифлозин	Линаглиптин		Гликамби	Гликсамби	нет
Эмпаглифлозин	Метформин		Синджарди	Синджарди	нет

*Примечание: * Жирным шрифтом выделены комбинации, рекомендованные в алгоритмах [10].*

Нужно отметить, что, несмотря на большое количество рациональных комбинаций [12], наиболее популярными в России являются бигуаниды (метформин) + ПСМ (самой распространенной и доступной фиксированной комбинацией ПСМ и метформина является комбинация глибенкламида и метформина [10,12]) и метформин+иДПП-4. Так же в России рекомендуют к использованию инсулин деглудек+ агонисты ГПП-1.

В США и Европе используются в основном комбинации: метформина с ингибиторами ДПП-4, тиазолидиндионами, ингибиторами НГЛТ-2 (в США больше), производными СМ (больше в Европе); комбинация метформина с ингибитором альфа-глюкозидаз используется только в Европе, а метформина + меглитиниды и НГЛТ-2 + ДПП-4 только в США [4,8,9].

Вероятных причин разницы между имеющимися комбинациями может быть несколько:

1. Разный подход к контролю уровня гликемии.

В России контроль гликемии и подбор терапии ведут по HbA1c (%)[1], [11], [14], причем подбирается конечное значение этого показателя индивидуально для каждого пациента, в зависимости от исходного уровня (до терапии), возраста, ожидаемой продолжительности жизни, наличия тяжелых макрососудистых осложнений, риск развития тяжелой гипогликемии. Поэтому чаще выбирают препараты, не приводящие к развитию гипогликемии, увеличению массы тела, такие как метформин, ингибиторы ДПП-4. [1], [11], [13]

В США и Европе учитывают степень снижения HbA1c (%) в зависимости от исходного уровня, а также одновременно воздействуют на инсулинорезистенотность и обмен желчных кислот, разнонаправлено воздействуя на метаболизм глюкозы через разные звенья патогенеза [4, С. 57].

2. Государственные затраты [12]

Производные сульфонилмочевины являются действенным и достаточно экономичным средством для контроля СД 2 типа, возможно поэтому эти препараты популярны в России, а также в целом в Европе. Ингибиторы альфа-глюкозидаз, использующиеся в Европе, не обладают высокой эффективностью, но также экономичны [8].

3. Внедрение новых методов лечения.

На данный момент инновационные сахароснижающие лекарственные препараты являются преимущество зарубежного происхождения (в частности, США) [4, С. 108]. Этому способствует финансирование науки, более развитые методы доклинических и клинических исследований и т.д.

Заключение

Активный поиск и внедрение новых препаратов и их комбинаций в практику лечения этого заболевания за рубежом дает материал для испытаний и исследований особенностей применения в России. Несмотря на систематически обновляемые схемы фармакотерапии СД 2 типа, необходимы дальнейшие шаги в сторону усовершенствования медицинской помощи, обучения населения, расширение арсенала препаратов, проведение подтверждающих или опровергающих их эффективность исследований, и, что не менее важно, поиск и внедрение рациональных комбинации лекарственных препаратов.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Козиолова Н. А. Выбор сахароснижающих препаратов у больных сахарным диабетом 2-го типа очень высокого сердечно-сосудистого риска (часть 1) / Н. А. Козиолова, А. И. Чернявина, Е. А. Полянская // Артериальная Гипертензия. – 2016 - №22(4). – С. 330–348.

2. Atlas IDF, 7th ed., 2015 [Электронный ресурс] –URL: http://www.dmthai.org/sites/default/files/idf_atlas_2015_uk_0.pdf (дата обращения: 01.10.2018)

3. Atlas IDF, 8th ed., 2017 – [Электронный ресурс] – –URL: http://diabetesatlas.org/resources/2017-atlas.html (дата обращения: 01.10.2018)

4. Reichal C. R. Anti-diabetic Drugs and Fixed Dose Combination Therapy / C. R. Reichal, M. G. Rao // Research & Reviews in Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. – 2014. – Vol.3(4). – P. 55-58.

5. Доскина Е. В. Современная комбинированная терапия сахарного диабета 2 типа, или борьба с «неподдающимся пациентом» / Е. В. Доскина // Эффективная фармакотерапия в эндокринологии. – 2014. - №9. – С. 50-56

6. Сорокина Ю. А. Синергизм при комбинированном использовании пероральных сахароснижающих препаратов / Ю. А. Сорокина, Л. В. Ловцова, А. В. Богдарина и др. // Современные технологии в медицине. - 2014. - №3(6). - С. 85-90

7. Дедов И. И. Фармакоэпидемиологические аспекты мониторинга здоровья пациентов с сахарным диабетом 2 типа: результаты Российского наблюдательного многоцентрового эпидемиологического исследования ФОРСАЙТ-СД2 / И. И. Дедов, М. Ф. Калашникова, Д. Ю. Белоусов и др.// Сахарный диабет. – 2016 - №19(6). – С. 443-456.

8. Evans JL. Oral and Injectable (Non-insulin) Pharmacological Agents for Type 2 Diabetes [Electronic resource] / J. L. Evans, B. Balkan, E. Chuang [et al.] // NCBI Bookshelf. A service of the National Library of Medicine, National Institutes of Health. – 2016. – URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279141/?report=printable. (дата обращения: 01.10.2018)

9. Standards of medical care in diabetes 2017 / edited by W. T. Cefalu. Diabetes Care. – 2017. - Vol. 40(Suppl. 1):S1–S2 doi: 10.2337/dc17-S001

10. Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом : клинические рекомендации / под ред. И. И. Дедова, М. В. Шестаковой, А. Ю. Майорова. – 8-й выпуск. – М.: УП ПРИНТ; 2017.

11. Дедов И. И. Инициация и интенсификация сахароснижающей терапии у больных сахарным диабетом 2 типа: обновление консенсуса совета экспертов Российской ассоциации эндокринологов (2015 г.) / И. И. Дедов, М.В. Шестакова, А. С. Аметов и др.// Сахарный диабет. – 2015. - №1. – С. 5-23.

12. Дедов И. И. Анализ стоимости болезни сахарного диабета 2 типа в Российской Федерации: результаты российского многоцентрового наблюдательного фармакоэпидемиологического исследования ФОРСАЙТ-СД2 / И. И. Дедов, М. Ф. Калашникова, Д. Ю. Белоусов и др. // Сахарный диабет. – 2017 – №20(6). – С. 403-419

13. Мкртумян А. М. Эффективный и безопасный контроль гликемии у больных сахарным диабетом 2 типа при применении фиксированной комбинации пероральных сахароснижающих препаратов / А. М. Мкртумян // Эндокринология. – 2013. - №2. – С. 14-19.

14. Аметов А. С. Ранняя комбинированная терапия при сахарном диабете 2 типа / А. С. Аметов, Е. В. Карпова // Сахарный диабет. – 2011. - №3. – С. 80-83.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Koziolova N. A. Vybor sakharosnizhayushchikh preparatov u bolnykh sakharnym diabetom 2-go tipa ochen vysokogo serdechno-sosudistogo riska (chast 1) [Selection of Hypoglycemic Drugs in Patients with Diabetes Mellitus Type II of Very High Cardiovascular Risk (part 1)] / N. A. Koziolova, A. I. Chernyavina, E. A. Polyanskaya // Arterial Hypertension. - 2016 - No.22 (4). - P. 330–348.Atlas IDF, 7th ed., 2015 – [Electronic resource] –- www.dmthai.org/sites/default/files/idf_atlas_2015_uk_0.pdf

2. Atlas IDF, 8th ed., 2017 – [Electronic resource] –- http://diabetesatlas.org/resources/2017-atlas.html (accessed: 01.10.2018)

3. Anti-diabetic Drugs and Fixed Dose Combination Therapy / C Rubina Reichal, M Gopal Rao // Research & Reviews in Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. – 2014. - Volume 3, Issue 4, October-December. – P. 55-58.

4. Ye.V. Doskina. Sovremennaya kombinirovannaya terapiya saharnogo diabeta 2 tipa, ili Bor'ba s «nepoddayushchimsya pacientom» [Modern combination therapy of diabetes, or Control of non-compliant patient] / Ye. V. Doskina. // EHffektivnaya farmakoterapiya v ehndokrinologii.[Effective pharmacotherapy in endocrinology]. – 2014. - №9. – S. 50-56 [in Russian]

5. Sorokina Y. A. Sinergizm pri kombinirovannom ispol'zovanii peroral'nyh saharosnizhayushchih preparatov [Synergism in Combined Use of Oral Antihyperglycemic Drugs] / Y. A. Sorokina, L. V. Lovtsova, A. V. Bogdarina // Sovremennye tekhnologii v meditsine [Modern technologies in medicine]. -2014. Vol. 6. № 3. S. 85-90 [in Russian]

6. Dedov I. I. Farmakoepidemiologicheskie aspekty monitoringa zdorov'ya patsientov s saharnym diabetom 2 tipa: rezul'taty Rossiyskogo nablyudatel'nogo mnogotsentrovogo epidemiologicheskogo issledovaniya FORSAYT-SD2 [Assessing routine healthcare pattern for type 2 diabetes mellitus in Russia: the results of pharmacoepidemiological study (FORSIGHT-DM2)] / I. I. Dedov, M. F. Kalashnikova, D. Yu. Belousov and others // Saharnyy diabet [Diabetes mellitus]. – 2016 - 19(6). – S. 443-456. [in Russian]

7. Evans J. L. Oral and Injectable (Non-insulin) Pharmacological Agents for Type 2 Diabetes [Electronic resource] / J. L. Evans, B. Balkan, E. Chuang et al // NCBI Bookshelf. A service of the National Library of Medicine, National Institutes of Health. – 2016. – Mode of access: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279141/?report=printable. - Date of access: 20.07.2016

8. Standards of medical care in diabetes—2017. Diabetes Care 2017;40(Suppl. 1):S1–S2 DOI: 10.2337/dc17-S001

9. Algoritmy specializirovannoj medicinskoj pomoshchi bol'nym saharnym diabetom [Algorithms of specialized medical care for patients with diabetes mellitus] / edited by I. I. Dedova, M. V. SHestakovoj, A. Yu. Majorova. – 8th issue. – M.: UP PRINT; 2017. – 112 p. [in Russian]

10. Initsiatsiya i intensifikatsiya saharosnizhayushchey terapii u bol'nyh saharnym diabetom 2 tipa: obnovlenie konsensusa soveta ekspertov Rossiyskoy assotsiatsii endokrinologov (2015) [Initiation and intensification of glucose-lowering therapy in patients with type 2 diabetes mellitus: update of the consensus of the board of experts of the Russian Association of Endocrinologists (2015)] / I. I. Dedov, M. V. Shestakova, A. S. Ametov and others // Saharnyy diabet [Diabetes mellitus]. – 2015. - (1). – S. 5-23.[in Russian]

11. Dedov I. I. Analiz stoimosti bolezni saharnogo diabeta 2 tipa v Rossiyskoy Federatsii: rezul'taty rossiyskogo mnogotsentrovogo nablyudatel'nogo farmakoepidemiologicheskogo issledovaniya FORSAYT-SD2 [Cost-of-illness analysis of type 2 diabetes mellitus in the russian federation:results from russian multicenter observational pharmacoepidemiologic study of diabetes care for patients with type 2 diabetes mellitus (FORSIGHT-T2DM)] / I. I. Dedov, M. F. Kalashnikova, D. Yu. Belousov and others // Saharnyy diabet [Diabetes mellitus]. – 2017 – 20(6). – S. 403-419. [in Russian]

12. Mkrtumyan A. M. Effektivnyy i bezopasnyy kontrol' glikemii u bol'nyh saharnym diabetom 2 tipa pri primenenii fiksirovannoy kombinatsii peroral'nyh saharosnizhayushchih preparatov [Fixed combination of oral antidiabetics for the eff ective and safe glycemic control in type 2 diabetic patients] / A. M. Mkrtumyan // Endokrinologiya. [Endocrinology] – 2013. - №2. – S. 14-19. [in Russian]

13. Ametov A. S. Rannyaya kombinirovannaya terapiya pri saharnom diabete 2 tipa [Early combination therapy for type 2 diabetes]/ A. S. Ametov, E. V. Karpova // Saharnyy diabet [Diabetes mellitus]. – 2011. - №3. – S. 80-83. [in Russian]

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / BIOLOGY

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.032

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИНТЕТИЧЕСКОГО ПОЛОВОГО ФЕРОМОНА КАЛИФОРНИЙСКОЙ ЩИТОВКИ

Научная статья

Агасьева И.С.[1], Нефедова М.В.[2], Настасий А.С.[3,] *, Исмаилов В.Я.[4]
[1] ORCID: 0000-0002-1216-1106;
[2] ORCID: 0000-0001-5390-233X;
[3] ORCID: 0000-0001-8324-0058;
[4] ORCID: 0000-0002-6713-0059;
[1, 2, 3, 4] Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений, Краснодар, Россия

* Корреспондирующий автор (nastasy.anton[at]yandex.ru)

Аннотация

В настоящее время половым феромонам отводится все более возрастающая роль в стратегии и тактике защиты растений. Обладая высокой биологической активностью, они малотоксичны, высокоспецифичны, и являются экологически безопасными средствами мониторинга и контроля численности вредителей. Испытаны в полевых условиях ряд феромонных препаратов синтеза ФГБНУ ВНИИБЗР и подобраны оптимальные рецептуры препаративных форм феромона калифорнийской щитовки. Испытания ряда феромонов калифорнийской щитовки синтеза различных учреждений показали их высокую биологическую эффективность, что и было использовано в разрабатываемых системах защиты яблони.

Ключевые слова: половые феромоны**,** биологическая система защиты, плодовые культуры, калифорнийская щитовка (*Quadraspidiotus perniciosus* Comst.).

BIOLOGICAL EFFICIENCY OF SYNTHETIC SEX PHEROMONES OF CALIFORNIAN PARLATORIA

Research article

Agasyeva I.S.[1], Nefedova M.V.[2], Nastasiy A.S.[3,] *, Ismailov V.Ya.[4]
[1] ORCID: 0000-0002-1216-1106;
[2] ORCID: 0000-0001-5390-233X;
[3] ORCID: 0000-0001-8324-0058;
[4] ORCID: 0000-0002-6713-0059;
[1, 2, 3, 4] All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

* Corresponding author (nastasy.anton[at]yandex.ru)

Abstract

Currently, sex pheromones play an increasingly growing role in the strategy and tactics of plant protection. Possessing high biological activity, they are low-toxic, highly specific, and environmentally safe means of monitoring and controlling the number of pests. A number of pheromone preparations synthesized at the FSBSI All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection were tested under field conditions and the most efficient formulations of preparative forms of the Californian Parlatoria pheromone were selected. Tests of a number of pheromones of the Californian Parlatoria for the synthesis of various institutions have shown their high biological efficiency, which was used in the developed systems for the protection of the apple tree.

Keywords: sex pheromones, biological defense system, fruit crops, Californian Parlatoria (*Quadraspidiotus perniciosus* Comst.).

Современные системы защиты растений, особенно плодовых культур недостаточно эффективны без научно-обоснованных прецизионных методов мониторинга вредных объектов. К ним относится мониторинг вредителей с помощью синтетических половых феромонов. Их высокая биологическая активность, специфичность в отношении целевых видов и нетоксичность в отношении энтомофагов предопределяет их широкое применение для защиты растений в органическом земледелии [1], [7].

Синтетические половые феромоны нашли широкое применение в практике защиты растений как средство раннего обнаружения вредителей, наблюдения за динамикой численности насекомых с целью оптимизации сроков защитных мероприятий. Применение феромонных ловушек для надзора и оптимизации химических обработок позволяет повысить их биологическую эффективность и значительно сократить количество используемых инсектицидов, что дает высокий экономический эффект и снижает негативное влияние на окружающую среду [2, 3, 5].

Значительные успехи в оптимизации сроков защитных мероприятий достигнуты для яблонной, восточной плодожорок и ряда видов листоверток [8], [9].

Положительные результаты были получены американскими учеными, где использование феромонных ловушек для массового отлова самцов обеспечивало эффективное подавление яблонной плодожорки, если первоначальная плотность популяции которой была низкой [11].

Исследования, проведенные в предгорной зоне Крыма и Псковской области, показали, что размещение от 15 до 30 диспенсеров с феромоном на 1 га сада обеспечивало высокий уровень дезориентации самцов при поиске самок [4].

По данным швейцарских ученых опыты, проведенные в 62 садах, показали высокий эффект дезориентации яблонной плодожорки, поврежденность плодов составляла 0,5% [10].

Достижения в области идентификации и синтеза половых феромонов ряда вредных видов насекомых сделали реальным проведение широких исследований по практическому использованию их в целях надзора за популяциями, определения численности, оптимизации сроков проведения защитных мероприятий и непосредственного регулирования численности вредителей.

Несмотря на то, что многие приемы использования феромонных ловушек для мониторинга основных вредителей яблони достаточно изучены и широко применяются в практике защиты растений [6], [12], целый ряд объективных причин предопределяет необходимость расширения исследований в этом направлении. К ним относятся изменения видового состава вредных видов, разработка новых методов синтеза препаративных форм феромонов, идентификация минорных компонентов природных феромонов и связанное с этим изменение активности феромонных композиций, а также недостаточная изученность видового состава и динамики численности энтомоакарифагов. К тому же недостаточно исследованы проблемы использования феромонов для непосредственного регулирования численности вредных видов.

Для этих целей были испытаны основные компоненты феромона особо опасного адвентивного вредителя яблони калифорнийской щитовки (*Quadraspidiotus perniciosus* Comst.) как в отдельности, так и в композициях. В исследованиях применялась стандартная ловушка «Атракон А» с меняющимся во время учета клеевым вкладышем (клей «Липофикс»). Учет самцов и замену вкладышей проводили 2 раза в неделю. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Установлено, что наибольшей аттрактивностью из испытанных компонентов обладал α-геранилпропионат. Смесь α-геранилпропионата и α-нерилпропионата (основных компонентов феромона, идентифицированного у этого вида), а α-нерилпропионат и β-геранилпропионат значительно уступали в биологической активности α-геранилпропионату (в 3, 12, 85 раз, соответственно).

Таблица 1 – Аттрактивность компонентов полового феромона калифорнийской щитовки (доза 1 мг на диспенсер)

Компоненты феромона	Отловлено самцов в среднем на 1 ловушку за период испытаний X±Sx
α-геранилпропионат	7956 ± 830
α-нерилпропионат	694 ± 90
Смесь 1+2 соотн.1:1	2778 ± 250
β-геранилпропионат	161 ± 37
Ловушка без феромона (контроль)	6,8 ± 1,8

Яблоневый сад, где проводились испытания, имел выраженное очаговое заселение калифорнийской щитовкой, поэтому результаты отловов в ловушках каждой повторности варьировали в пределах трех-семи-кратной величины от минимального отлова. В контрольных ловушках без феромона отлова самцов практически не наблюдалось.

Из данных таблицы 1 следует, что наиболее активным компонентом полового феромона калифорнийской щитовки является α-геранилпропионат. Этот вывод подтверждается данными других исследователей [2].

В этой связи дальнейшие исследования проводились только в отношении α-геранилпропионата, хотя в дальнейшем необходимо будет изучить роль каждого отдельного компонента в химической коммуникации вида.

α-геранилпропионат испытывался в дозах 10, 50, 100, 250, 500 и 1000 мкг на ловушку. Повторность в опытах 3-5-кратная. Ловушки размещались на высоте 2 м в юго-западной части кроны яблони.

Первичные испытания, проведенные в садах с низкой и средней численностью калифорнийской щитовки, показали, что корреляции между увеличением дозы α-геранилпропионата и количеством отловленных самцов не наблюдается (таблицы 2, 3).

Таблица 2 - Уловистость ловушек в зависимости от дозы α-геранилпропионата (Краснодар, ВНИИБЗР)

Доза феромона, мкг	Отловлено самцов в среднем на 1 ловушку, экз.						
	Август			Сентябрь			За весь период x±Sx
	I	II	III	I	II	III	
10	1126,0	0	0,7	4,5	35,0	38,3	1204±184
50	1878,5	0	0,3	6,3	39,0	42,3	1966±44
100	1742,6	0	0	0,7	13,0	41,3	1797±61
500	1195,0	0,3	0	0	28,3	31,0	1254±45
1000	1243,9	1,6	1,0	1,0	28,0	11,0	1286±78
Контроль без феромона	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3 – Аттрактивность феромона калифорнийской щитовки в зависимости от дозы α-геранилпропионата (Краснодар, учхоз Кубань, КГАУ)

Доза феромона, мкг	Отловлено самцов в среднем на 1 ловушку, экз.										
	Июль			Август					Сентябрь		За весь период x±Sx
	14	18	24	1	7	11	18	28	13	20	
100	64,0	41,8	18,2	6,0	1,8	1,4	0	10	40,4	1,2	184,8±43,2
250	47,8	51,0	27,8	10,4	9,8	2,2	0,8	13,6	33,4	0,8	197,6±57,9
500	74,0	53,2	31,2	13,2	8,6	2,4	1,4	11,4	42,4	0,2	238,0±105,4
1000	88,0	67,4	30,4	11.4	7,8	3,8	1,2	11,8	39,2	3,2	264,2±70,6

Дальнейшие испытания, проведённые в 2016 в яблоневом саду ООО Мичурина Красноармейского района Краснодарского края на фоне высокой численности калифорнийской щитовки, позволили в качестве оптимальной дозы признать 0,5 мг α-геранилпропионата на 1 диспенсер (таблица 4).

Таблица 4 – Аттрактивность феромона калифорнийской щитовки в зависимости от дозы α-геранилпропионата (АО им. Мичурина, Красноармейского района)

Доза феромона, мг	Отловлено самцов в среднем на 1 ловушку, экз.			
	Повторность			x±Sx
	1	2	3	
0,1	3520	2640	3156	3105,3
0,25	3696	4114	6072	4627,3
0,5	10450	7598	8975	9007,6
1,0	3420	5480	4807	4569

На основании испытаний доза феромона 0,5 мг на диспенсер рекомендована для использования в целях мониторинга и разработки приёмов регулирования численности вредителя методами массового отлова и разрыва химической половой коммуникации.

Испытания ряда феромонов калифорнийской щитовки различных научно-исследовательских учреждений показали их высокую биологическую эффективность и стандартность отлова насекомых феромонными ловушками, что и было использовано в разрабатываемых системах защиты яблони.

Многолетние испытания синтетических феромонов садовых вредителей показали, что в последние годы их состав и препаративные формы в основном стабилизированы и стандартность отлова насекомых феромонными ловушками вполне приемлема для практических целей. Ниже приведены результаты испытаний феромонов синтеза ООО «Феромон» (г. Москва) и ВНИИБЗР, которые показывают примерно одинаковую биологическую активность сравниваемых образцов (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты сравнительной оценки феромонов яблонной плодожорки (Краснодар, ВНИИБЗР)

Производства СПФ	Привлечено самцов				
	По данным учёта				Всего
	11.08	17.08	25.08	01.09	
ООО «Феромон»	76	68	44	46	234±37
ВНИИБЗР	85	60	77	54	276±29

Испытания ряда феромонов калифорнийской щитовки синтеза различных учреждений показали их высокую биологическую эффективность и стандартность отлова насекомых феромонными ловушками.

В результате проведенных исследований установлено, что основным аттрактивным компонентом феромона фитофага является α-геранилпропионат, а оптимальной дозой его нанесения составляет 0,5 мг на диспенсер. Полученные данные явились основой для мониторинга вредителя в яблоневых садах Юга России, для разработки методов массового отлова и дезориентации самцов калифорнийской щитовки, результаты которых будут представленны в последующих сообщениях.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Агасьева И. С. Интегрированная защита сада от вредителей и болезней / И. С. Агасьева, В. Я. Исмаилов, Н. А. Щербаков и др. // Главный агроном. – 2012. – № 2. - С. 45-47.

2. Бичина Т. И. Биологическая активность компонентов полового феромона калифорнийской щитовки (*Diaspididae perniciosus* Comst.) / Т. И. Бичина, Р. И. Ищенко, Б. Г. Ковалев и др. // Хеморецепция насекомых. – 1987. - № 9. – С. 89-92.

3. Емельянов В. А. Определение степени синхронности лета яблонной плодожорки *Cydia pomonella* L. и садовых листоверток (Lepidoptera, Tortricidae) при феромонном способе контроля / В. А. Емельянов, М. А. Булыгинская, З. В. Николаева и др. // Проблемы Энтомологии в России. – 1998. – № 1. – С. 130-131.

4. Емельянов В. А. Использование феромонов для борьбы с яблонной плодожоркой *Laspeyresia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) методом элиминации и дезориентации самцов / В. А. Емельянов, М. А. Булыгинская // Энтомологическое обозрение. - 1999. – № 78-3. - С. 555-567.

5. Коваленков В. Г. Феромоны в интегрированных системах / В. Г. Коваленков, В. Я. Исмаилов, Н. М. Тюрина // Защита и карантин растений. – 2000. – № 8. – С. 12-13.

6. Пастарнак И. Н. Изучение химической коммуникации фитофагов яблони на внутри- и межвидовом уровнях / И. Н. Пастарнак, А. А. Пачкин, И. С. Агасьева и др. // Наука Кубани. - 2014. - № 1. - С.48-53.

7. Пачкин А. А. Перспективы использования феромонов в защите яблоневого сада / А. А. Пачкин, М. В. Пушня, И. Н. Пастарнак и др. // Информационный бюллетень ВПРС МОББ. - 2015. – № 47. - С. 255-257.

8. Сумароков А. Ф. Возможности использования секс-ловушек с отечественным феромоном СР-2 для надзора за яблонной плодожоркой / А. Ф. Сумароков, Р. Н. Дубинец, А. И. Быховец // Ученые записки Тартуского университета. – 1980. – № 545. – С.48-53.

9. Cause R. Fluing actiwited study of thecodling moth by the reileaseapture method using sex traps in an apple orchard / R. Cause // Biol. Bundesanstalt fur Land - und Fortwirtschaft.-1978.-V.180. - P.68-71

10. Charmillot P. Lutte par confusion conte le carpocapsae *Cydia pomonella* L. en Suisse en 1996 an meyen des diffuseurs isomate - C Plus / P. Charmillot, D. Pasquier, L. Dorsal and others // Rev Suisse viticult., arboricult et horticult – 1997. - № 29-2. - С.91-96.

11. Gut Larry J. Feromon-based management of coding moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Washington apple orchards / J. Gut Larry, Jay F. Brunner // J. Agr. Entomol. – 1998. – №1-4. – P. 387-405.

12. Pastarnak I. Study of intra-and interspecific chemical communications of phytophages in apple-tree orchard for the substantiation of pest management methods / I. Pastarnak, A. Pachkin, M. Pushnja // Plant protection for ecological sustainability of agrobioctnoses. Information bulletin IOBC EPRS: research articles of the International scientific conference, 21-24 April 2014, Kazakhstan. Almaty, 2014. - P. 101-103

Список литературы на английском языке / References in English

1. Agas'eva I. S. Integrirovannaya zashchita sada ot vreditelej i boleznej [Integrated protection of gardens against pests and diseases] / I. S. Agas'eva, V. Ya. Ismailov, N. A. Shcherbakov and others // Glavnyj agronom [Major agronomist]. – 2012. – № 2. - P. 45-47. [in Russian]

2. Bichina T. I. Biologicheskaya aktivnost' komponentov polovogo feromona kalifornijskoj shchitovki (Diaspididae regniciosus Comst.) [The biological activity of the components of the sex pheromone of the San Jose scale (Diaspididae perniciosus Comst.)] / T. I. Bichina, R. I. Ishchenko, B. G. Kovalev and others // Hemorecepciya nasekomyh [Insect chemoreception]. – 1987. - № 9. – P. 89-92. [in Russian]

3. Emel'yanov V. A. Opredelenie stepeni sinhronnosti leta yablonnoj plodozhorki *Cydia pomonella* L. i sadovyh listovertok (Lepidoptera, Tortricidae) pri feromonnom sposobe kontrolya [Determining the degree of synchronicity in the flight of the apple moth *Cydia pomonella* L. and garden leafworm (Lepidoptera, Tortricidae) with the pheromone control method] / V. A. Emel'yanov, M. A. Bulyginskaya, Z. V. Nikolaeva and others // Problemy Entomologii v Rossii [Problems of Entomology in Russia]. – 1998. – № 1. – P. 130-131. [in Russian]

4. Emel'yanov V. A. Ispol'zovanie feromonov dlya bor'by s yablonnoj plodozhorkoj Laspeyresia pomonella L. (Lepidoptera, Tortricidae) metodom ehliminacii i dezorientacii samcov [The use of pheromones to combat the codling moth *Laspeyresia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) by the method of elimination and disorientation of males] / V. A. Emel'yanov, M. A. Bulyginskaya // Entomologicheskoe obozrenie [Entomological review]. - 1999. – № 78. – 3. - P. 555-567. [in Russian]

5. Kovalenkov V. G. Feromony v integrirovannyh sistemah [Pheromones in integrated systems] / V. G. Kovalenkov, V. YA. Ismailov, N. M. Tyurina // Zashchita i karantin rastenij [Plant protection and quarantine] . – 2000. – № 8. – P. 12-13. [in Russian]

6. Pastarnak I. N. Izuchenie himicheskoj kommunikacii fitofagov yabloni na vnutri- i mezhvidovom urovnyah [The study of chemical communication of apple phytophagous at the intra- and interspecific levels] / I. N. Pastarnak, A. A. Pachkin, I. S. Agas'eva and others // Nauka Kubani [Science of Kuban]. - 2014. - № 1. - P.48-53. [in Russian]

7. Pachkin A. A. Perspektivy ispol'zovaniya feromonov v zashchite yablonevogo sada [Prospects for the use of pheromones in the protection of apple orchard] / A. A. Pachkin, M. V. Pushnya, I. N. Pastarnak and others // Informacionnyj byulleten' VPRS MOBB. [VPRS IOBB Newsletter.]. - 2015. - № 47. – P. 255-257. [in Russian]

8. Sumarokov A. F. Vozmozhnosti ispol'zovaniya seks-lovushek s otechestvennym feromonom SR-2 dlya nadzora za yablonnoj plodozhorkoj [The possibility of using sex traps with domestic pheromone SR-2 for the supervision of the codling moth] / A. F. Sumarokov, R. N. Dubinec, A. I. Byhovec // Uchenye zapiski Tartuskogo universiteta [Scientific notes of the University of Tartu]. – 1980. – № 545. – P.48-53. [in Russian]

9. Cause R. Fluing actiwited study of thecodling moth by the reileaseapture method using sex traps in an apple orchard / R. Cause // Biol. Bundesanstalt fur Land - und Fortwirtschaft.- 1978.-V.180. - P.68-71

10. Charmillot P. Lutte par confusion conte le carpocapsae *Cydia pomonella* L. en Suisse en 1996 an meyen des diffuseurs isomate - C Plus / P. Charmillot, D. Pasquier, L. Dorsal, and others // Rev Suisse viticult., arboricult et horticult – 1997.-29, № 2. - P.91-96.

11. Gut Larry J. Feromon-based management of coding moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Washington apple orchards / Larry J. Gut, Jay F. Brunner // J. Agr. Entomol. – 1998. – 1. - № 4. – P. 387-405.

12. Pastarnak I. Study of intra-and interspecific chemical communications of phytophages in apple-tree orchard for the substantiation of pest management methods / I. Pastarnak, A. Pachkin, M. Pushnja and others // Plant protection for ecological sustainability of agrobioctnoses. Information bulletin IOBC EPRS: Research articles of the International scientific conference, 21-24 April 2014, Kazakhstan. Almaty, 2014. - P. 101-103

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.033

КОРРЕКЦИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ ЖЕНЩИН ПЕРВОГО ЗРЕЛОГО ВОЗРАСТА ПОСРЕДСТВОМ ЗАНЯТИЙ ФИТНЕСОМ ПО СИСТЕМЕ HOT IRON™

Научная статья

Нененко Н.Д.[1,] *, Максимова Т.А.[2]
[1] ORCID: 0000-0003-4535-3435;
[2] ORCID: 0000-0001-9325-0436;
[1, 2] ФГБОУ ВО «Югорский Государственный Университет» Министерства образования и науки России, Ханты-Мансийск, Россия
* Корреспондирующий автор (nenenkon[at]mail.ru)

Аннотация

В ходе проведенного исследования была экспериментально подтверждена возможность использования фитнес-тренировок по системе Hot Iron™ для улучшения физического здоровья женщин первого зрелого возраста. Результатом регулярных занятий по данной фитнес-программе стало значительное снижение жирового компонента, при одновременном увеличении мышечной массы у женщин 20-35 лет: Занятия, направленные на развитие силовой выносливости, способствовали некоторому повышению функциональных возможностей аппарата внешнего дыхания, а именно, отмечен прирост жизненной емкости легких, времени задержки дыхания на вдохе и выраженное увеличении экскурсии грудной клетки. Кроме того, выявлена положительная динамика физической работоспособности испытуемых, оцененная с использованием теста Руфье. В результате регулярных занятий по системе Hot Iron™ значительно улучшилась физическая подготовленность участниц эксперимента, выраженный прирост выявлен по результатам тестирования скоростной и силовой выносливости. Таким образом, доказано, что регулярные занятия, развивающие силовую выносливость, способствуют коррекции телосложения, повышению функциональных возможностей организма и гармонизации физического развития женщин первого зрелого возраста.

Ключевые слова: женщины первого зрелого возраста, здоровье, морфофункциональный статус, физическая работоспособность, силовая выносливость.

CORRECTION OF PHYSICAL HEALTH OF EARLY MATURE WOMEN BY MEANS OF FITNESS BASED ON HOT IRON™ SYSTEM

Research article

Nenenko N.D[.1,] *, Maksimova T.A.[2]
[1] ORCID: 0000-0003-4535-3435,
[2] ORCID: 0000-0001-9325-0436,
[1, 2] Yugra State University, Ministry of Education and Science of Russia, Khanty-Mansiysk, Russia

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

Abstract

The possibility of application of Hot Iron™ fitness training system in improving the physical health of women of the early mature age was experimentally confirmed in this research. The result of regular classes in this fitness program was a significant decrease in the fat component, while muscle mass simultaneously increased in women 20-35 years old: The exercises aimed at developing strength endurance contributed to a certain increase in the functional capabilities of the respiratory apparatus, namely, an increase in vital capacity of lungs, breath-holding time while inhaling and a pronounced increase in chest excursion. In addition, the positive dynamics of the physical performance of women, with the use of the test Rufe was revealed. As a result of regular Hot Iron™ classes, the physical fitness of the participants in the experiment significantly improved, a pronounced increase was revealed as the results of testing speed and strength endurance. Thus, it has been proven that regular exercises developing strength endurance contribute to the correction of the physique, increase the functional capabilities of the body and harmonize the physical development of women of the early mature age.

Keywords: women of the early mature age, health, morphofunctional status, physical performance, strength endurance.

Социальная политика государства в настоящее время направлена на поиск и внедрение современных оздоровительных технологий, ведущих к повышению работоспособности различных групп населения. Известно, что одним из основных факторов, обеспечивающих целенаправленное развитие личности и рост функциональных резервов организма, является физическая культура [1, С. 131], [2, С. 25]. В современных условиях для поддержания психического и физического благополучия все больше людей различного пола и возраста прибегают к занятиям фитнесом [3, С. 17]. Под термином «фитнес» в настоящее время понимается совокупность мероприятий, обеспечивающих разностороннее физическое развитие человека и повышение уровня здоровья [4, С. 77].

Фитнес-тренировки позволяют улучшить функциональное состояние организма, повысить уровень физической работоспособности, корректировать телосложение [5, С. 131], [6, С. 103]. Однако львиная доля известных программ для женщин направлена на развитие аэробной выносливости с несущественным включением нагрузок силовой направленности. К тренировкам, включающим в себя и тренировку выносливости, и силовой компонент, относится такое направление фитнеса, как Hot Iron™.

В связи с чем, целью настоящего исследования явилось комплексное изучение влияния регулярных занятий по системе Hot Iron™ на показатели физического здоровья женщин первого зрелого возраста.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на базе спортивного клуба «Adrenalin» в г. Пыть-Ях Ханты-Мансийского автономного округа-Югра. В исследовании принимали участие 18 женщин в возрасте от 20 до 35 лет, которые занимались по системе Hot Iron™ 3 раза в неделю по 50-55 минут в течение 6 месяцев. Hot Iron™ - групповая тяжелоатлетическая тренировка на силу и выносливость со штангой (2 кг), под музыку. Размер отягощения выбирается занимающимся самостоятельно в зависимости от степени подготовленности и продолжительности посещения данной тренировки, либо уточняется у тренера. Тренировка предусматривает проработку всех крупных мышц за 1 учебный час

Комплексная оценка здоровья женщин проводилась с использованием антропометрических, функциональных методик, а также оценки показателей физической подготовленности. В ходе антропометрических исследований были измерены показатели роста, веса, обхватные размеры, кожно-жировые складки. По результатам дынных измерений был оценен компонентный состав тела испытуемых по показателям жировой и мышечной масс, рассчитанных с помощью формул Я. Матейко.

Оценка функционального состояния женщин была проведена показателям жизненной емкости легких, экскурсии грудной клетки, кистевой и становой динамометрии, физической работоспособности – по пробе Руфье.

При оценке физической подготовленности испытуемых были использованы тесты, характеризующие развитие скоростно-силовой выносливости и гибкости: подъем из положения лежа на спине в положение сед за 30 секунд, сгибание-разгибание рук в упоре лежа за 30 секунд, удержание положения упор лежа на согнутых руках, наклон туловища вперед из положения сидя.

Результаты исследования и их обсуждение

Hot Iron™ – групповая тяжелоатлетическая тренировка на силу и выносливость со штангой под музыку. Тренировка предусматривает проработку всех крупных мышц под отягощением. Занятия строятся согласно тренировочным планам Iron System™, в которых строго установлены: упражнения, их последовательность и комбинации, ритм выполнения, количество повторений, отдых между упражнениями, а также музыкальное сопровождение.

Основными мотивациями для начала занятий фитнесом у женщин 20-35 лет являются совершенствование фигуры, повышение самооценки и улучшение состояния здоровья [7, С. 10]. [8, С. 90].

При тренировке силовой выносливости по системе Hot Iron™ отмечена тенденция к уменьшению массы тела и перераспределение его компонентного состава: (Таблица 1). В результате посещения занятий по системе Hot Iron™ абсолютное количество мышечной массы тела возросло на 22%, жировой – снизилось на 28%., то есть тренировки имели выраженную анаболическую направленность при выраженном эффекте жиросжигания:

Таблица 1 – Влияние занятий по системе Hot Iron™ на компонентный состав у женщин первого зрелого возраста(M±m)

Показатель	До начала занятий	В конце занятий
Масса тела, кг	66,45±11,13	65,06 ±11,55
Мышечная масса, кг	21,58±5,77	26,33±5,04
Жировая масса, кг	25,49±10,17	18,26±4,93

Регулярные тренировки по системе Hot Iron™ способствовали улучшению функциональных показателей организма испытуемых (Таблица 2).

Таблица 2 – Влияние занятий по системе Hot Iron™ на некоторые функциональные показатели женщин первого зрелого возраста (M±m)

Показатель	До начала занятий	В конце занятий
Экскурсия грудной клетки, см	5,0±1,57	6,95±1,49*
ЖЕЛ, л	2,82±0,23	2,94±0,29
Проба Штанге, с	44,64±13,47	49,27±15,57
Проба Руфье	11,24±2,29	8,22±2,83*
Динамометрия правой кисти, кг	27,18±3,71	29,91±2,84
Становая сила, кг	60,5±9,49	67,41±8,45

*Примечание: * – различия достоверны (p<0,05) по отношению к соответствующим показателям на начало эксперимента.*

Занятия с развитием силовой выносливости способствовали некоторому повышению функциональных возможностей аппарата внешнего дыхания у женщин первого зрелого возраста, а именно, отмечен прирост жизненной емкости легких (на 4,2%), времени задержки дыхания на вдохе (на 10,4%) и выраженное увеличении экскурсии грудной клетки (39%) (p<0,05).

Повышение физической работоспособности женщин в ходе занятий по системе Hot Iron™ было оценено с использованием теста Руфье: в начале исследования работоспособность женщин соответствовала низкому уровню, в конце – как удовлетворительная. В ходе исследования индекс Руфье уменьшился на 26,9% (p<0,05).

Ожидаемо, что занятия данным направлением фитнеса способствовали приросту силовых показателей: динамометрия правой кисти увеличилась на 10%, становая сила – на 11,9%.

Уровень физической подготовленности, во многом определяет эффективность выполнения женщинами своих многочисленных социальных функций [9, С. 89]. [10, С. 15]. Повышение уровня физической подготовленности, способствует улучшению жизнедеятельности, а, следовательно, положительно отражается на духовном и физическом здоровье женщин первого зрелого возраста.

В ходе исследования отмечена положительная динамика всех изучаемых показателей физической подготовленности (Таблица 3). При посещении в течение 6 месяцев занятий по системе Hot Iron™ выявлен статистически значимый прирост показателей скоростно-силовой выносливости: количество сгибаний и разгибаний рук в упоре лежа за 30 секунд увеличилось на 37,7% ($p<0,05$), подъемов корпуса из положения лежа на спине в положение сед за 30 секунд – на 43,9% ($p<0,05$), удержание корпуса в положении упор лежа на согнутых руках – 45% ($p<0,05$). Прирост показателя гибкости был не существенен и соответствовал 14,6%. Это объясняется тем, что тренировка по системе Hot Iron™ не ставит перед собой цели развить гибкость занимающихся, однако в конце каждого занятия проводилась заминка с использованием упражнений на стретчинг, что позволило добиться некоторых положительных результатов.

Таблица 3 – Влияние занятий по системе Hot Iron™ на показатели, характеризующие развитие силовой выносливости (M±m)

Показатель	До начала занятий	В конце занятий
Сгибание-разгибание рук в упоре лежа за 30с., раз	15,18 ±7,92	20,91±5,66*
Подъем корпуса из положения лежа на спине в положение сед за 30с., раз	13,27 ±6,51	19,09±6,33*
Удержание положения упор лежа на согнутых руках, с	61,36 ±32,51	89,0±43,26*
Наклон туловища вперед из положения сидя, см	8,09 ±5,18	9,27±5,24

Примечание: * – различия достоверны ($p<0,05$) по отношению к соответствующим показателям на начало эксперимента.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенного исследования была экспериментально подтверждена возможность использования фитнес-тренировок по системе Hot Iron™ с целью повышения уровня физического здоровья женщин первого зрелого возраста. Занятия на развитие силовой выносливости следует рекомендовать, прежде всего, женщинам, стремящимся улучшить физическую форму и скорректировать телосложение.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Тристан В. Г. Влияние различных видов оздоровительной аэробики на физическую работоспособность и подготовленность девушек / В. Г. Тристан, О. М. Буйкова // Вестник Южно-уральского университета. Серия: Образование, здравоохранение, физическая культура. – 2010. – № 5. – С. 131-135.

2. Гамалий Н. В. Современные физкультурно-оздоровительные технологии в физическом воспитании женщин первого зрелого возраста / Н. В. Гамалий // Физическое воспитание студентов творческих специальностей. – 2009. - №3. – С. 33-40.

3. Ивко И. А. Сравнение темпов прироста показателей морфофункционального состояния и физической подготовленности женщин молодого и зрелого возраста на начальном этапе занятий оздоровительной аэробикой / И. А. Ивко, Е. А. Поздеева // Человек. Спорт. Медицина. – 2016, Т. 16. - № 4. – С. 5-17.

4. Бренч С. В. Фитнес-аэробика как новый вид спортивной деятельности / С. В. Бренч // Физическая культура: воспитание, образование, тренировка. – 2010. – № 5. – С. 77-79.

5. Буйкова О. М. Влияние занятий различными видами аэробики на компонентный состав тела студенток / О. М. Буйкова, В. Г. Тристан // Вестник Южно-уральского университета. Серия: Образование, здравоохранение, физическая культура. – 2010. – № 19 (195). – С. 131-134.

6. Рябчиков А. И. Фитнес и его место в физической культуре / А. И. Рябчиков // Теория и практика физической культуры. – 2017. - № 5. – С. 103-104.

7. Беляев Н. С. Морфофункциональные и биомеханические предпосылки совершенствования методики занятий оздоровительной аэробикой с женщинами зрелого возраста / Н. С. Беляев // Ученые записки университета им П. Ф. Лесгафта. – 2009. - № 8 (54). – С. 10-14.

8. Бибик Р. В. Анализ современных оздоровительных технологий, используемых в процессе физического воспитания женщин первого зрелого возраста / Р. В. Бибик, Р. В. Бибик // Физическое воспитание студентов творческих специальностей. – 2008. - №5 (123). – С. 86-91.

9. Карпов В. Ю. Современные виды двигательной активности в формировании здорового образа жизни женщины / В. Ю. Карпов, К. К. Скросов, М. С. Антонова // Ученые записки университета им. П. Ф. Лесгафта. – 2015. – 5 (123). – С. 86-91.

10. Гиптенко А. В. Влияние фитнеса на уровень физического состояния женщин первого зрелого возраста / А. В. Гаптенко // Физическое воспитание студентов. – 2009. - № 1. – С. 13-15.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tristan V. G. Vliyanie razlichnyh vidov ozdorovitel'noj aehrobiki na fizicheskuyu rabotosposobnost' i podgotovlennost' devushek [Influence of various kinds of improving aerobics on physical working capacity and readiness of girls] / V. G. Tristan, O. M. Bujkova // Vestnik Yuzhno-ural'skogo universiteta. Seriya: Obrazovanie, zdravoohranenie, fizicheskaya kul'tura [Bulletin of the South Ural University. Series: Education, health, physical education]. - 2010. – № 5. – P. 131-135. [in Russian]

2. Gamalij N. V. Sovremennye fizkul'turno-ozdorovitel'nye tekhnologii v fizicheskom vospitanii zhenshchin pervogo zrelogo vozrasta [Modern health and fitness technologies in the physical education of women of the first mature age] / N. V. Gamalij // Fizicheskoe vospitanie studentov tvorcheskih special'nostej [Physical education of students of creative specialties]. - 2009 – №3. – P. 33-40. [in Russian]

3. Ivko I. A. Sravnenie tempov prirosta pokazatelej morfofunkcional'nogo sostoyaniya i fizicheskoj podgotovlennosti zhenshchin molodogo i zrelogo vozrasta na nachal'nom ehtape zanyatij ozdorovitel'noj aehrobikoj [The comparison of growth rates of indicators of morphofunctional state and physical fitness of young and mature women at the initial stage of recreational aerobics] / I. A. Ivko, E. A. Pozdeeva // Chelovek. Sport. Medicina [Person. Sport. The medicine]. – 2016, T. 16. – № 4. – P. 5-17. [in Russian]

4. Brench S. V. Fitnes-aehrobika kak novyj vid sportivnoj deyatel'nosti [Fitness aerobics as a new sport activity] / S. V. Brench // Fizicheskaya kul'tura: vospitanie, obrazovanie, trenirovka [Physical culture: education, education, training]. – 2010. – P. 77-79 [in Russian]

5. Bujkova O. M. Vliyanie zanyatij razlichnymi vidami aehrobiki na komponentnyj sostav tela studentok [The impact of various types of aerobics on the component composition of the body of students] / O. M. Bujkova, V. G. Tristan // Vestnik Yuzhno-ural'skogo universiteta. Seriya: Obrazovanie, zdravoohranenie, fizicheskaya kul'tura [Bulletin of the South Ural University. Series: Education, health, physical education]. - 2010. – № 19 (195). – P. 131-134. [in Russian]

6. Ryabchikov A. I. Fitnes i ego mesto v fizicheskoj kul'ture [Fitness and its role in physical culture] / A. I. Ryabchikov // Teoriya i praktika fizicheskoj kul'tury [Theory and Practice of Physical Culture.]. - 2017. – № 5. – P. 103-104. [in Russian]

7. Beljaev N. S. Morfofunkcional'nye i biomekhanicheskie predposylki sovershenstvovaniya metodiki zanyatij ozdorovitel'noj aehrobikoj s zhenshchinami zrelogo vozrasta [The morphofunctional and biomechanical prerequisites for improving the practice of recreational aerobics with women of mature age] / N. S. Beljaev // Uchenye zapiski universiteta im P.F. Lesgafta [Scientific notes of the University named after P. F. Lesgaft]. - 2009. – № 8 (54). – P. 10-14. [in Russian]

8 Bibik R. V. Analiz sovremennyh ozdorovitel'nyh tekhnologij, ispol'zuemyh v processe fizicheskogo vospitaniya zhenshchin pervogo zrelogo vozrasta [Analysis of modern health technologies used in the process of physical education of women of the first mature age] / R. V. Bibik, R. V. Bibik // Fizicheskoe vospitanie studentov tvorcheskih special'nostej [Physical education of students of creative specialties]. - 2008. – № 5 (121). – P. 86-91 [in Russian]

9. Karopov V. Yu. Sovremennye vidy dvigatel'noj aktivnosti v formirovanii zdorovogo obraza zhizni zhenshchiny [Modern types of motor activity in the formation of a healthy lifestyle for women] / V. Yu Karopov, K. K. Skrosov, M. S. Antonova // Uchenye zapiski universiteta im P.F. Lesgafta [Scientific notes of the University named after P. F. Lesgaft]. - 2015. – № 5 (123). – P. 86-91 [in Russian]

10. Giptenko A. V. Vliyanie fitnesa na uroven' fizicheskogo sostoyaniya zhenshchin pervogo zrelogo vozrasta [The influence of fitness on the level of physical condition of women of the first mature age] / A. V. Gaptenko // Fizicheskoe vospitanie studentov [Physical education of students]. – 2009. – № 1. – P. 13-15 [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.034

ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНЫХ ПРОДУКТОВ ГЛУБОКОГО ГЛИКИРОВАНИЯ НА КЛЕТОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Научная статья

Леонова Т.С.[1], Вихнина М.В.[2], Гришина Т.В.[3], Леонова Л.Е.[4], Фролов А.А.[5], Романовская Е.В.[6, *]

[1] ORCID: 0000-0002-7153-5059;
[2] ORCID: 0000-0001-8912-5886;
[3] ORCID: 0000-0002-5306-2980;
[4] ORCID: 0000-0003-4560-2278;
[5] ORCID: 0000-0002-7593-77171;
[6] ORCID: 0000-0001-8912-5886;
[1, 2, 3, 4, 5, 6,] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (e.romanovskaya[at]spbu.ru)

Аннотация

Образующиеся в результате неферментативного взаимодействия белков с углеводами конечные продукты глубокого гликирования (Advanced Glycation End products, AGEs) представляют собой группу модифицированных аминокислотных остатков, которые могут медленно накапливаться в организме во время нормального процесса старения. Помимо эндогенных AGEs, в организме человека эти токсичные соединения появляются за счет потребления продуктов питания, прошедших термическую обработку или подвергавшихся длительному хранению, активного и пассивного курения. AGEs могут вызывать возникновение и прогрессирование не только осложнений диабета, но и являются основой патофизиологии многих других болезней, включая сердечно-сосудистые заболевания и нейродегенеративные болезни. И экзогенные, и эндогенные AGEs в организме человека играют существенную роль в развитии воспалительного ответа. В предлагаемом обзоре рассматриваются структура и функции основных рецепторов AGEs и активируемые ими сигнальные пути, а также некоторые биологические эффекты этой активации.

Ключевые слова: гликирование, конечные продукты глубокого гликирования, рецепторы, сигнальные пути

INFLUENCE OF ADVANCED GLYCATION END PRODUCTS ON CELLULAR PROCESSES

Research article

Leonova T.S.[1], Vikhnina M.V.[2], Grishina T.V.[3], Leonova L.E.[4], Frolov A.A.[5], Romanovskaya E.V.[6, *]

[1] ORCID: 0000-0002-7153-5059;
[2] ORCID: 0000-0001-8912-5886;
[3] ORCID: 0000-0002-5306-2980;
[4] ORCID: 0000-0003-4560-2278;
[5] ORCID: 0000-0002-7593-77171;
[6] ORCID: 0000-0001-8912-5886;
[1, 2, 3, 4, 5, 6] St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

* Corresponding author (e.romanovskaya[at]spbu.ru)

Abstract

Advanced Glycation End products or AGEs are formed as the result of non-enzymatic interaction of proteins with carbohydrates and belong to the group of modified amino acid residues that can slowly accumulate in the body during the normal process of aging. In addition to endogenous AGEs, these toxic compounds appear in the human body due to the consumption of food that has been heat treated or subjected to long-term storage, due to active and passive smoking. AGEs can cause the onset and progression of complications of diabetes, and become the basis of the pathophysiology of many other diseases including cardiovascular and neurodegenerative ones. Both exogenous and endogenous AGEs play a significant role in the development of the inflammatory response in the human body. The proposed review examines the structure and functions of the main AGEs receptors and the signaling pathways they activate, as well as some of the biological effects of this activation.

Keywords: glycation, advanced glycation end products, receptors, signaling pathways

Конечные продукты глубокого гликирования (AGEs) рассматриваются как потенциально токсичные молекулы, накапливающиеся в организме человека с возрастом и вызывающие возникновение или прогрессирование не только осложнений диабета, но и многих других заболеваний, включая сердечно-сосудистые и нейродегенеративные.

Образование эндогенных AGEs

Гликирование представляет спонтанную неферментативную реакцию белков с сахарами (реакция Майяра), обусловленную взаимодействием между восстанавливающими сахарами или дикарбонильными продуктами их распада (глюкоза, фруктоза, галактоза, манноза, рибоза, реакционноспособные триозы – интермедиаты энергетического метаболизма) и аминогруппами остатков лизина, аргинина и серусодержащих аминокислотных остатков). В результате быстро образуются лабильные Шиффовы основания, которые претерпевают внутримолекулярную перестройку и образуют относительно стабильные продукты Амадори и Хайнса (кетозамины, дезоксикетозы или дезоксиальдозы) [1, С. 5-96]. В дальнейшем продукты Амадори подвергаются дегидратации, циклизации, окислению, кросс-линкингу и полимеризации, что приводит к образованию интермедиатов (3-дезоксиглюкозон, глиоксаль и метилглиоксаль) и затем к формированию стабильных модифицированных аминокислотных остатков, называемых конечными продуктами глубокого гликирования или Advanced Glycation End

products, AGEs (рис. 1) [2, С. 587], [3, С. 15]. Таким необратимым изменениям при физиологических температуре и pH подвергаются только долгоживущие белки (такие, как гемоглобины, альбумины, коллаген, кристаллины). К AGEs, обнаруженным в тканях животных и для которых показаны биологические эффекты относятся, в частности, карбоксиметиллизин, карбоксиэтиллизин, пирралин, пентозидин, глюкозопан, аддукты гидроимидазолона, глиоксаль-лизиновый и метилглиоксаль-лизиновый димеры [4, С. 352], [5, 58].

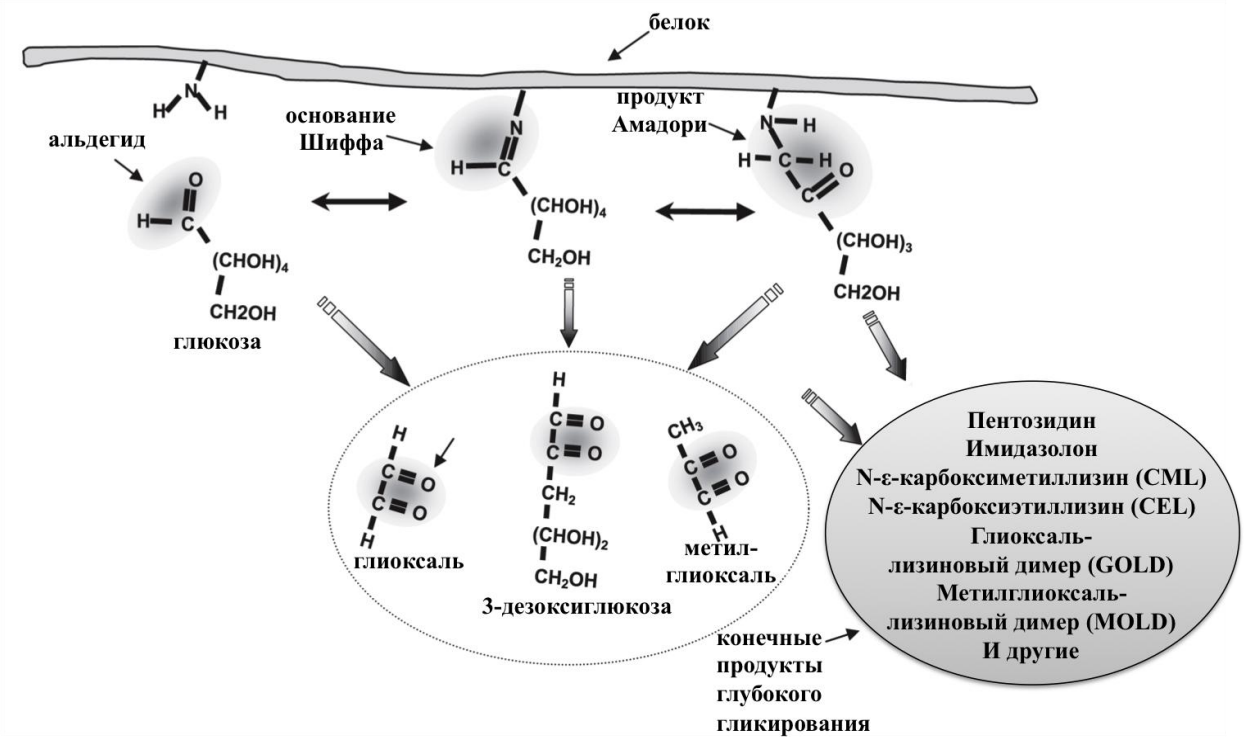


Рис. 1 – Возможные пути образования конечных продуктов глубокого гликирования [2, С. 583, с изменениями]

В процессе гликирования образуются активные формы кислорода, которые вносят свой вклад в индуцированные гликированием модификации белков, часто называемые «гликоокислением». Этим может объясняться и увеличение накопления AGEs в условиях окислительного стресса и воспаления [6, С. 10], [7, С. 8].

Экзогенные AGEs

Основными источниками экзогенных AGEs являются пища, прошедшая тепловую обработку, и табак (сигаретный дым). AGEs образуются в ходе приготовления богатой белками и жирами пищи при высокой температуре, придавая ей коричневую окраску [1, С. 105]. Причем показано, что короткие воздействия высоких температур приводят к образованию большего количества AGEs, чем длительное воздействие более низких; приготовление пищи с использованием воды и СВЧ также снижает образование AGEs [8, С. 2], [9, С. 20], [10, С. 465].

Можно выделить как минимум три возможных механизма повреждающего действия на клетки и ткани эндогенных и экзогенных AGEs: активация рецептор-опосредованных сигнальных путей, приводящих прежде всего к окислительному стрессу и воспалению и модуляции экспрессии генов; изменение структуры и функции стабильных долгоживущих белков, в частности, белков соединительной ткани, за счет необратимого кросс-линкинга с AGEs; прямое гликирование внутриклеточных белков и липидов, приводящее к нарушению функций клетки [11, С. 745].

Рецепторы, связывающие AGEs

Рецепторы, способные связываться с AGEs, локализованы на моноцитах, макрофагах, эндотелиальных и других клетках. Результатом связывания может быть удаление и разрушение AGEs или активация внутриклеточного сигналлинга. Выделяют три группы рецепторов AGEs. Первая группа включает семейство AGE-R, включая AGE-R1 (80K-H), AGE-R2 (OST-48), AGE-R3 (галектин-3) и LOX-170. Эти рецепторы в основном вовлечены в эндоцитоз и удаление AGEs. Так, AGE-R1 препятствует AGE-индуцированному увеличению активных форм кислорода и подавляет активацию RAGE-зависимых сигнальных путей, в частности, подавляет активацию NF-kB-зависимого сигнального пути [12, С. 420], [13, С. 710]. Ко второй группе относят семейство скавенджер-рецепторов макрофагов SR-A; SR-B: CD36, SR-BI, SR-E: LOX-1; FEEL-1; FEEL-2, основной функцией которых является эндоцитоз и внутриклеточная деградация [14, С. 6140].

Третий класс рецепторов – это хорошо охарактеризованные мультилигандные рецепторы RAGE (Receptor For Advanced Glycation End Products), структура и функции которых будут рассмотрены далее.

Было показано, что экспрессия RAGE свойственна для таких типов клеток, как моноциты/макрофаги, Т-лимфоциты, клетки эндотелия, дендритные клетки, фибробласты, гладкомышечные клетки, хондроциты и кератиноциты [15, С. 2248]. Кроме того, RAGE экспрессируется почти во всех типах клеток ЦНС, включая микроглию, астроциты и нейроны [16, С. 60].

RAGE был описан в эндотелиальных клетках легких быка в 1992 г., является трансмембранным гликопротеином типа I, принадлежащим суперсемейству иммуноглобулинов (Ig) с молекулярной массой 35 кДа [17, С. 15000]. Молекулярная масса RAGE человека составляет примерно 50 кДа с учетом посттрансляционных модификаций.

RAGE состоит из трех основных доменов – экстраклеточного лиганд-связывающего, содержащего иммуноглобулиноподобные регионы V (аминокислотные остатки 23–119), C1 (120–233) и C2 (234–325), одинарной трансмембранной спирали (343–363) и короткого C-терминального цитоплазматического домена (364–404) (рис. 2) [18, С. 2], [19, С. 695]. V-домен связывает большинство лигандов RAGE, тогда как цитоплазматический конец ответственен за трансдукцию сигнала. Вторичная структура V-домена состоит из двух β-слоев, короткой α-спирали и неупорядоченной спирали. V и C1-домены представляют собой плотно связанную структурную единицу (VC1), которая связана гибким линкером из пяти аминокислотных остатков (231–237) с C2-доменом. VC1 обогащен положительно заряженными аминокислотными остатками (для изолированного VC1-домена pI=9.9), в противоположность отрицательно заряженному C2-домену (pI=4.2) [20, С. 280]. Для RAGE показано наличие альтернативного сплайсинга, в результате которого могут образовываться его различные функциональные формы. Так, одна из них лишена N-концевого V-домена, но локализована в цитоплазматической мембране. Вторая форма лишена C-концевого цитоплазматического домена и не способна участвовать в сигналлинге. Возможно также образование растворимой формы, получившей название sRAGE, и содержащей все иммуноглобулиноподобные домены [21, С. 6], [13, С. 709]. Еще один путь возникновения такой растворимой формы – это расщепление полноразмерной формы RAGE металлопротеазами ADAM10 и MMP9 [22, С. 35510]. Сывороточный sRAGE может действовать как внеклеточный рецептор-ловушка (Decoy Receptor) для связывания различных лигандов. В противоположность самому RAGE, sRAGE ингибирует миграцию лейкоцитов, инактивирует продукты гликозилирования, тормозит развитие окислительного стресса и воспаления [23, С. 1830].

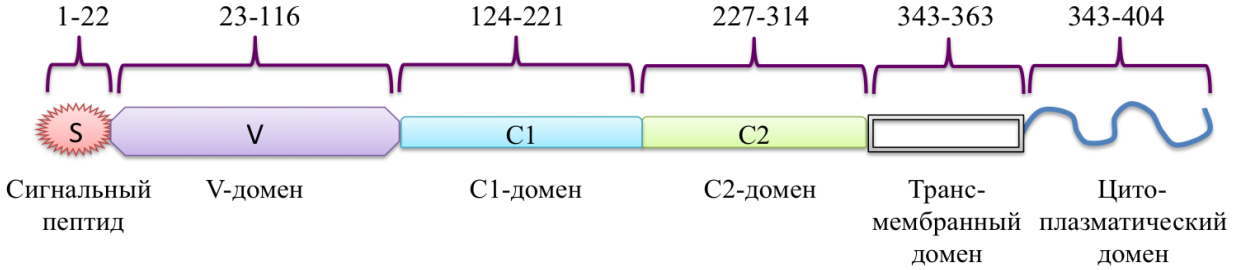


Рис. 2 – Доменная организация RAGE человека

Образование комплекса AGE - RAGE приводит к индукции окислительного стресса и воспалению и ассоциирована с многими патологиями [24, С. 25]. Детально исследовали взаимодействие синтетического полипептида, содержащего модифицированные метилглиоксалем группы: N-карбоксиметиллизин, N-карбоксиэтиллизин и гидроимидазолоны. Показано, что полость V-домена, образованная заряженными аминокислотными остатками K52, R98, K110 совместно с E50 и E108 представляет собой благоприятное окружение для связывания вышеперечисленных лигандов. Эффект связывания исследуемых лигандов с RAGE был подтвержден фосфорилированием JNK в альвеолярных эпителиальных клетках человека A549 [25, С. 3333].

Первоначально RAGE были охарактеризованы, как рецепторы, связывающие AGEs, однако позднее было показано, что эти рецепторы активируются большим количеством лигандов. Выяснилось, что сигнальные пути, опосредуемые RAGE, сложны и клетки по-разному отвечают на активацию рецептора. На активацию RAGE-зависимых каскадов влияют разнообразные факторы. Клеточный ответ, индуцированный взаимодействием RAGE с лигандом, зависит от вида и концентрации лиганда, от присутствия в среде других лигандов, типа клеток и концентрации RAGE на их поверхности, наличия в клетке молекул, участвующих в передаче сигнала, и от уже активированных в клетке сигнальных путей [26, С. 17]. Первым лигандом, для которого было показано связывание с RAGE и который не относится к AGEs, был HMGB1. Будучи изначально описанным как негистоновый белок, архитектурный фактор хроматина, он также относится к группе веществ, ассоциированных с опасностью (повреждением), способных инициировать неинфекционный воспалительный ответ (DAMP) [27, С. 10]. К другим эндогенным лигандам, связывающим RAGE, относятся белки семейства S100 (небольшие кальций-связывающие белки, содержащие два структурных мотива «EF-рука», также охарактеризованные как DAMP и обладающие цитокин-подобным действием), β-амилоид (Aβ40 и Aβ42), экстраклеточная ДНК, фосфолипиды и гликозаминогликаны [28, С. 355]. В результате взаимодействия RAGE с одним из перечисленных лигандов активируется ряд компонентов внутриклеточных сигнальных каскадов, в частности протеинкиназа B, протеинкиназа C, киназа гликоген-синтазы; GSK3β; pSrc- и PI3K-киназа, Rac и Ras ГТФазы, ERK1/2-, JNK-, MEK-киназы; p38 MAP- и ROCK киназы, белок раннего ответа 1Egr-1, транскрипционные факторы NF-kB и STAT3 (см. обзор [29]).

Показано, что RAGE способны к образованию димеров и олигомеров как в составе липидных микродоменов (рафтов), так и в растворимой форме, причем еще до связывания лиганда [30, С. 2048].

В клетках меланомы MelJuSo с помощью антител к N-16 фрагменту RAGE методами вестерн-блоттинга и иммунофлуоресценции были выявлены мономеры и димеры рецепторов с молекулярной массой от 55-60 до 120 и более кДа [31, С. 130]. Для β2-интегрина Mac-1 показано, что олигомеры в комплексе с лигандом в составе липидного рафта могут содержать четыре и более молекул RAGE [32, С. 2190]. При исследовании механизмов влияния докозогексаеновой кислоты (DHA) на диабетическую ретинопатию на культуре клеток микроглии было показано, что DHA значительно снижает степень вовлечения RAGE в липидные рафты [33, С. 718]. Оказалось, что низкомолекулярные фракции сои, являющиеся антагонистами RAGE-зависимых сигнальных путей, обладают аналогичным действием [34, С. 1839]. Связывание с лигандами стабилизирует рецепторы и их олигомеры, что показано для AGEs, белков семейства S100 белки и Aβ-олигомеров. По-видимому, олигомеризация играет

существенную роль в повышении специфичности связывания с лигандом, в модуляции функции рецептора и активации сигнального каскада [35, С. 1303].

Ассоциация рецепторов в димеры и в высшие олигомерные формы облегчается образованием дисульфидных мостиков и нековалентных взаимодействий. Структурные исследования растворимых и мембранных олигомеров проводились с применением спектроскопии ЯМР в растворе и масс-спектрометрии. Было показано, что отрицательно заряженный C2-домен стабилизирует структуру гомодимера растворимой формы RAGE через взаимодействие с положительно заряженным VC1-доменом. Ключевыми для димеризации и олигомеризации являются аминокислотные остатки K110, R114, R116 VC1-домена и остатки E125, D128, S131 и S307 C2-домена [36, С. 1518].

Для мембранной формы RAGE также показано, что она существует в равновесии между мономером и димером. Интересно, что в образовании мембрано-связанного димера, помимо электростатических взаимодействий, существенную роль играет образование ковалентной связи между остатками цистеина V-доменов. Образование димера облегчает связывание AGEs и усиливает фосфорилирование ERK, высвобождение цитокинов и полимеризацию актина [37, С. 58].

Сигнальные пути, активируемые RAGE-AGEs

Связывание лигандов с RAGE активирует ряд сигнальных путей, клеточный ответ зависит от лиганда, микроокружения и типа клеток.

Первыми идентифицированными лигандами RAGE были AGEs, образование которых было обсуждено выше. Цитоплазматический домен RAGE не имеет тирозинкиназной активности, ключевым медиатором трансдукции RAGE-зависимого сигналлинга является белок млекопитающих Diaphanous (mDia1) [28, С. 362]. Связывание эндогенных и экзогенных AGEs со своими рецепторами прежде всего вызывает провоспалительный ответ, опосредованный транскрипционным фактором NF-kB, ключевым регулятором генной активности при иммунном ответе на воспаление [38, С. 79]. Стимуляция RAGE приводит к окислительному стрессу и вызывает активацию митоген-активируемого киназного каскада (MAPK), что приводит к высвобождению и активации NF-κB [39, С. 47].

Накопление отличных от AGEs лигандов RAGE, в частности, HMGB1, вызываемое повреждением тканей и активацией клеток при воспалительной реакции, стимулирует RAGE-зависимую активацию транскрипции мРНК субъединицы p65 фактора NF-kB, что обеспечивает высокий уровень активности NF-kB. В свою очередь, обратная связь в RAGE-сигнальном пути поддерживается NF-kB-зависимой активацией экспрессии RAGE, что приводит к дополнительному усилению исходного сигнала [40, С. 25R].

Высокие уровни NF-kB в результате активации RAGE-опосредованных сигнальных путей и развитие патологических реакций под воздействием AGEs были показаны на различных моделях воспаления: кишечник мыши, гладкие мышцы легкого крысы, нейрональной культуры клеток PC12 [41, С. 275].

После запуска RAGE-зависимого сигнального каскада одним из механизмов регуляции уровня экспрессии рецепторов является их интернализация [42, С. 117]. Обработка клеток нейробластомы мыши Neuro-2a, экспрессирующих на плазматической мембране RAGE, индуцировала фосфорилирование киназ ERK1 и ERK 2, что приводило к транспорту NF-kB в ядро и его связывание с ДНК, тогда как предварительная инкубация клеток с ингибиторами интернализации рецепторов (дансилкадаверином или оксидом фениларсина) подавляла активацию MAP-киназного каскада [43, С. 26].

Эффекты AGEs, не опосредованные связыванием с рецепторами

Образование AGE меняет функции некоторых важных белков клеточного матрикса. Так, коллаген стенок кровеносных сосудов имеет относительно длинное время полужизни, за это время он может подвергаться значительному неферментативному гликированию, что вносит существенный вклад в развитие атеросклероза. Показано, что поперечные сшивки под воздействием AGEs образуются в растворимых белках плазмы крови – сывороточном альбумине, протромбине и фибриногене [44, С. 175]. Ковалентные кросс-линки также образуются в иммуноглобулинах и липопротеинах низкой плотности (LDL) [45, С. 190]. Образование AGEs на коллагене IV типа базальных мембран подавляет возможность латеральной ассоциации этих молекул в нормальную сеть. Также с коллагеном IV типа AGE формируют кросс-линки с гепаран-сульфатами протеогликанов [46, С. 10].

Гликирование апопротеина B и фосфолипидных компонентов LDL приводит к их функциональным изменениям и сверхвосприимчивости к окислительным модификациям. В дальнейшем, поглощение гликированных LDL макрофагами приводит к их избытку по сравнению с нативными из-за низкой аффинности к ним неспецифических скавенджер-рецепторов. Модификациям посредством AGEs в процессе старения и диабета подвергаются и другие структурные белки - миелин, тубулин и кристаллин хрусталика, внося свой вклад в развитие такой патологии, как катаракта.

Биологические эффекты AGEs

AGEs, будучи продуктами неферментативного гликозилирования, накапливаются в организме человека с возрастом, у больных сахарным диабетом [47, С. 165], в очагах хронического воспаления, а также при тяжелых метаболических нарушениях. AGEs, как эндогенные, так и экзогенные, могут вызывать различные клеточные ответы, что приводят к множественным расстройствам здоровья и заболеваниям [48, С. 1075].

Одним из осложнений диабета является развитие хронического воспаления, которое вызывается процессами гибели клеток, приводящими к формированию инфламмасом в эффекторных клетках, продукции провоспалительных цитокинов, развитию резистентности к инсулину [49, С. 52], [50, С. 414], [51, С. 710]. Хроническое воспаление опосредовано, в частности, накоплением AGEs, вызывающих окислительный стресс, активацию лейкоцитов и, как результат, развитие эндотелиальной дисфункции при сахарном диабете [52, С. 1569], [35, С. 1303], [53, С. 308]. В экспериментах *in vitro* показано, что интермедиаты гликирования глиоксаль и метилглиоксаль вызывают снижение активности антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы на 39% и 52%, Se-содержащей глутатионпероксидазы из эритроцитов быка 89% и 94% и глутатион-S-трансферазы из печени крысы на 67% и 54% соответственно [54, С. 729].

В стенках кровеносных сосудов и миокарде накапливаются AGEs и модифицированные ими белки, что приводит к образованию поперечных сшивок между фибриллами коллагена. В результате коллаген теряет свои свойства и, как следствие, уменьшается упругость сосудов и мышечной ткани сердца у лиц преклонного возраста и больных диабетом [55, С. 160]. Накопление AGEs стимулирует экспрессию RAGE и приводит к увеличению циркулирующих в крови растворимой изоформы рецептора, не содержащей трансмембранный домен, и внеклеточного домена. Увеличение содержания растворимой формы изоформы RAGE в крови также активирует воспалительные и деструктивные процессы в сосудах и миокарде, что дополнительным фактором развития сердечно- сосудистых заболеваний и ускорение старения [56, С. 98], [57, С. 610], [58, С. 1538].

Провоспалительное действие AGEs, опосредованное образованием провоспалительных цитокинов и активных форм кислорода, делает их существенными элементами в патогенезе таких заболеваний, как сахарный диабет, катаракта, болезнь Альцгеймера [59, С. 1] и другие нейродегенеративные заболевания [60, С. 67], [61, С. 115]. Индуцированная AGEs генерация активных форм кислорода через активацию экспрессии фактора роста эндотелия (VEGF) увеличивает проницаемость сосудов и пролиферацию эндотелиальных клеток, что может привести к развитию опухоли метастазам [55, С. 160]. Доказана роль взаимодействия AGEs-RAGE в развитии и прогрессии таких видов рака, как рака груди, меланомы, гепатоцеллюлярной карциномы, рака поджелудочной железы, кишечника и легких [62, С. 55], [63, С. 315], [64, С. 1900], [65, С. 7].

В настоящее время растворимые формы RAGE могут рассматриваться как биологические маркеры патологических процессов, связанных с воспалением. Так, определение растворимой формы RAGE может применяться для диагностики таких заболеваний, как болезнь Крона, неспецифический язвенный колит, хронической обструктивной болезни легких, диабете 1-го типа, болезни Альцгеймера [66, С. 698].

Доказано, что AGEs накапливаются в организме человека с возрастом, приводя к прогрессированию заболеваний, зависимых от возраста (подробнее см. обзор [67]).

Исследования механизмов повреждающего действия AGEs на клетки являются фундаментом для разработки фармакалогической стратегии предотвращения и лечения заболеваний, вызываемых накоплением AGEs. Несмотря на то, что ученые сталкиваются со многими трудностями в получении и интерпретации данных из-за сложности и неоднозначности эффектов AGEs, особенно экзогенных, мы постепенно приближаемся к пониманию механизмов влияния конечных продуктов глубокого гликирования на клеточные процессы.

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в СПбГУ за счет финансовой поддержки гранта Российского научного фонда (проект № 17-16-01042).

Funding

The article was prepared based on the results of work carried out at St. Petersburg State University with the financial support of the grant of the Russian Science Foundation (project No. 17-16-01042).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы/ References

1. Uribarri J. Dietary AGEs and their Role in Health and Disease / J. Uribarri – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 1-384 p.
2. Basta G. Advanced glycation end products and vascular inflammation: Implications for accelerated atherosclerosis in diabetes / G. Basta, A. M. Schmidt, R. De Caterina // Cardiovascular Research. – 2004. – №63. – P. 582-592.
3. Vistoli G. Advanced glycoxidation and lipoxidation end products (AGEs and ALEs): An overview of their mechanisms of formation / G. Vistoli, D. De Maddis, A. Cipak et al. // Free Radical Research. – 2013. – №47. – P. 3-27.
4. Nass N. Advanced glycation end products, diabetes and ageing / N. Nass, B. Bartling, A.N. Santos et al. // Zeitschrift fur Gerontologie und Geriatrie. – 2007. – №40. – P. 349-356.
5. Gugliucci A. Formation of Fructose-Mediated Advanced Glycation End Products and Their Roles in Metabolic and Inflammatory Diseases / A. Gugliucci // Advances in Nutrition: An International Review Journal. – 2017. – №8. – P. 54-62.
6. Aragno M. Dietary sugars and endogenous formation of advanced glycation endproducts: Emerging mechanisms of disease / M. Aragno, R. Mastrocola // Nutrients. – 2017. – №9. – P. 1-16.
7. Ottum M. S. Advanced glycation end-products: modifiable environmental factors profoundly mediate insulin resistance / M.S. Ottum, A. M. Mistry // Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition. – 2015. – №57. – P. 1-12.
8. Uribarri J. Advanced Glycation End Products in Food and a Practical Guide to Their Reduction in the Diet / J. Uribarri, S. Woodruff, S. Goodman et al. // Journal of American Dietic Association. – 2010. – №110. – P. 1-27.
9. Poulsen M. W. Advanced glycation endproducts in food and their effects on health / M. W. Poulsen, R. V. Hedegaard, J.M. Andersen et al. // Food and Chemical Toxicology. – 2013. – №60. – P. 10-37.
10. Uribarri J. Dietary Advanced Glycation End Products and Their Role in Health and Disease 1 , 2 / J. Uribarri, M. Dolores, M. Pía et al. // Advances in Nutrition. – 2015. – №6. – P. 461-473.
11. Kellow N. J. Effect of diet-derived advanced glycation end products on inflammation / N. J. Kellow, M. T. Coughlan // Nutrition Reviews. – 2015. – №73. – P. 737-759.
12. Ott C. Role of advanced glycation end products in cellular signaling / C. Ott, K. Jacobs, E. Haucke et al. // Redox Biology. – 2014. – №2. – P. 411-429.
13. Pinkas A. Advanced Glycation End-Products and Their Receptors: Related Pathologies, Recent Therapeutic Strategies, and a Potential Model for Future Neurodegeneration Studies / A. Pinkas, M. Aschner // Chemical Research in Toxicology. – 2016. – №29. – P. 707-714.
14. Zhu W. Advanced glycation end products induce a prothrombotic phenotype in mice via interaction with platelet CD36 / W. Zhu, W. Li, R. L. Silverstein // Blood. – 2012. – №119. – P. 6136-6144.

15. Lopez Diez R. Cellular Mechanisms and Consequences of Glycation in Atherosclerosis and Obesity / R. Lopez Diez, A. Shekhtman, R. Ramasamy et al. // Biochimica et Biophysica Acta - Molecular Basis of Disease. – 2016. – №1862. – P. 2244-2252.

16. Kierdorf K. RAGE regulation and signaling in inflammation and beyond / K. Kierdorf, G. Fritz // Journal of Leukocyte Biology. – 2013. – №94. – P. 55-68.

17. Neeper M. Cloning and expression of a cell surface receptor for advanced glycosylation end products of proteins / M. Neeper, A. M. Schmidt, J. Brett et al. // Journal of Biological Chemistry. – 1992. – №267. – P. 14998-15004.

18. Chuah Y. K. Receptor for Advanced Glycation End Products and Its Ligands / Y. K. Chuah, R. Basir, H. Talib et al. // International Journal of Inflammation. – 2013. – №2013. – P. 403460.

19. Juranek J. Receptor for advanced glycation end-products in neurodegenerative diseases / J. Juranek, R. Ray, M. Banach et al. // Reviews in the Neurosciences. – 2015. – №26. – P. 691-698.

20. Degani G. A capture method based on the VC1 domain reveals new binding properties of the human receptor for advanced glycation end products (RAGE) / G. Degani, A. A. Altomare, M. Colzani et al. // Redox Biology. – 2017. – №11. – P. 275-285.

21. Schmidt A. M. Soluble RAGEs - Prospects for treating & tracking metabolic and inflammatory disease / A.M. Schmidt // Vascular Pharmacology. – 2015. – №72. – P. 1-8.

22. Zhang L. Receptor for advanced glycation end products is subjected to protein ectodomain shedding by metalloproteinases / L. Zhang, M. Bukulin, E. Kojro et al. // Journal of Biological Chemistry. – 2008. – №283. – P. 35507-35516.

23. Wang Y. sRAGE Induces Human Monocyte Survival and Differentiation / Y. Wang, H. Wang, M. G. Piper et al. // The Journal of Immunology. – 2010. – №185. – P. 1822-1835.

24. Davis K. E. Advanced Glycation End Products, Inflammation, and Chronic Metabolic Diseases: Links in a Chain? / K.E. Davis, C. Prasad, P. Vijayagopal et al. // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2016. 2016. – P. 1-32.

25. Xue J. The Receptor for Advanced Glycation End Products (RAGE) Speci fi cally Recognizes Methylglyoxal-Derived AGEs / J. Xue, R. Ray, D. Singer et al. // Biochemistry. – 2014. – №53. – P. 3327-3335.

26. Downs C. A. RAGE-induced changes in the proteome of alveolar epithelial cells / C. A. Downs, N. M. Johnson, G. Tsaprailis et al. // Journal of Proteomics. – 2018. – №177. – P. 11-20.

27. Vicentino A. R. R. Emerging role of HMGB1 in the pathogenesis of schistosomiasis liver fibrosis / A. R. R. Vicentino, V.C. Carneiro, D. Allonso et al. // Frontiers in Immunology. – 2018. – №. 9. – P. 1-15.

28. Hudson B. I. Targeting RAGE Signaling in Inflammatory Disease. / B.I. Hudson, M.E. Lippman // Annual review of medicine. – 2018. – №69. – P. 349-364.

29. Rojas A. The receptor for advanced glycation end-products: A complex signaling scenario for a promiscuous receptor / A. Rojas, F. Delgado-Lopez, I. Gonzalez et al. // Cellular Signalling. – 2013. – №25. – P. 609-614.

30. Yatime L. The Structure of the RAGE:S100A6 Complex Reveals a Unique Mode of Homodimerization for S100 Proteins / L. Yatime, C. Betzer, R.K. Jensen, et al. // Structure. – 2016. – №. 24. – P. 2043-2052.

31. Popa I. Expression and subcellular localization of RAGE in melanoma cells / I. Popa, E. Ganea, S. M. Petrescu // Biochemistry and Cell Biology. – 2014. – №92. – P. 127-136.

32. Xie J. Cellular signalling of the receptor for advanced glycation end products (RAGE) / J. Xie, J.D. Mendez, V. Mendez-Valenzuela et al. // Cellular Signalling. – 2013. – №25. – P. 2185-2197.

33. Wang L. DHA Inhibited AGEs-Induced Retinal Microglia Activation Via Suppression of the PPARγ/NFκB Pathway and Reduction of Signal Transducers in the AGEs/RAGE Axis Recruitment into Lipid Rafts / L. Wang, K. Chen, K. Liu et al. // Neurochemical Research. – 2015. – №40. – P. 713-722.

34. Munescue S. Low-molecular weight fractions of Japanese sou sauce as a RAGE antagonist via inhibition of RAGE trafficking to lipid rafts / S. Munescue, Y. Yamamoto, R. Urushihara et al. // Food and Function. – 2013. – №4. – P. 1835-1842.

35. Hofmann Bowman M. A. Advanced glycation end products in diabetic cardiomyopathy: An alternative hypothesis / M.A. Hofmann Bowman, S. Fedson, A.M. Schmidt // Journal of Heart and Lung Transplantation. – 2011. – №30. – P. 1303.

36. Xue J. Change in the Molecular Dimension of a RAGE-Ligand Complex Triggers RAGE Signaling / J. Xue, M. Manigrasso, M. Scalabrin et al. // Structure. – 2016. – №24. – P. 1509-1522.

37. Jangde N. Cysteine mediated disulfide bond formation in RAGE V domain facilitates its functionally relevant dimerization / N. Jangde, R. Ray, S. Sinha et al. // Biochimie. – 2018. – №154. – P. 55-61.

38. Wei J. Y. Activation of RAGE/STAT3 pathway by methylglyoxal contributes to spinal central sensitization and persistent pain induced by bortezomib / J. Y. Wei, C.C. Liu, H. D. Ouyang et al. // Experimental Neurology. – 2017. – №296. – P. 74-82.

39. Oczypok E. A. All the “RAGE” in lung disease: The receptor for advanced glycation endproducts (RAGE) is a major mediator of pulmonary inflammatory responses / E. A. Oczypok, T. N. Perkins, T. D. Oury // Paediatric Respiratory Reviews. – 2017. – №23. – P. 40-49.

40. Ramasamy R. Advanced glycation end products and RAGE: A common thread in aging, diabetes, neurodegeneration, and inflammation / R. Ramasamy, S. J. Vannucci, S. S. Du. et al. // Glycobiology. – 2005. – №15. – P. 16R-28R.

41. Yu W. Pterostilbene inhibited advanced glycation end products (AGEs)-induced oxidative stress and inflammation by regulation of RAGE/MAPK/NF-κB in RAW264.7 cells / W. Yu, X. Hu, M. Wang // Journal of Functional Foods. – 2018. – №40. – P. 272-279.

42. Cao W. Advanced glycation end products induced immune maturation of dendritic cells controls heart failure through NF-κB signaling pathway / W. Cao, J. Chen, Y. Chen et al. // Archives of Biochemistry and Biophysics. – 2015. – №580. – P. 112-120.

43. Sevillano N. Internalization of the receptor for advanced glycation end products (RAGE) is required to mediate intracellular responses / N. Sevillano, M. D. Giron, M. Salido et al. // Journal of Biochemistry. – 2009. – №145. – P. 21-30.

44. Ансари Н. А. Неферментативное гликирование белков: от диабета до рака / Н. А. Ансари, З. Рашид // Биомедицинская химия. – 2010. – №2. – С. 168-178.

45. Indurthi V. S. K. Interaction between glycated serum albumin and AGE-receptors depends on structural changes and the glycation reagent / V. S. K. Indurthi, E. Leclerc, S. W. Vetter // Archives of Biochemistry and Biophysics. – 2012. – №528. – P. 185-196.

46. Kandarakis S. A. Emerging role of advanced glycation-end products (AGEs) in the pathobiology of eye diseases / S. A. Kandarakis, C. Piperi, F. Topouzis// Progress in Retinal and Eye Research. – 2014. 2014. – P. 1-18.

47. Ramasamy R. The diverse ligand repertoire of the receptor for advanced glycation endproducts and pathways to the complications of diabetes / R. Ramasamy, S. F. Yan, A. M. Schmidt // Vascular Pharmacology. – 2012. – №57. – P. 160-167.

48. Frimat M. Kidney, heart and brain: three organs targeted by ageing and glycation / M. Frimat, M. Daroux, R. Litke et al. // Clinical Science. – 2017. – №131. – P. 1069-1092.

49. Byun K. Advanced glycation end-products produced systemically and by macrophages: A common contributor to inflammation and degenerative diseases / K. Byun, Y.C. Yoo, M. Son et al. // Pharmacology and Therapeutics. – 2017. – №177. – P. 44-55.

50. Reynaert N. L. Advanced glycation end products and their receptor in age-related, non-communicable chronic inflammatory diseases; Overview of clinical evidence and potential contributions to disease / N. L. Reynaert, P. Gopal, E. P. A. Rutten et al. // International Journal of Biochemistry and Cell Biology. – 2016. – №81. – P. 403-418.

51. Vlassara H. Advanced Glycation Endproducts in Diabetes and Diabetic Complications / H. Vlassara, G. E. Striker // Endocrinology and Metabolism Clinics of North America. – 2013. – №42. – P. 697-719.

52. Pertynska-Marczewska M. Advanced glycation end products: A link between metabolic and endothelial dysfunction in polycystic ovary syndrome? / M. Pertynska-Marczewska, E. Diamanti-Kandarakis, J. Zhang et al. // Metabolism: Clinical and Experimental. – 2015. – №64. – P. 1564-1573.

53. de Vos L. C. Advanced glycation end products: An emerging biomarker for adverse outcome in patients with peripheral artery disease / L. C. de Vos, J. D. Lefrandt, R. P. F. Dullaart et al. // Atherosclerosis. – 2016. – №254. – P. 305-313.

54. Ланкин В. З. Влияние природных дикарбонилов на активность антиоксидантных ферментов in vitro и in vivo / В. З. Ланкин, Г. Г. Коновалова, А. К. Тихазе и др. // Биомедицинская химия. – 2012. – №6. – С. 727-736.

55. Yamagishi S. Pathologic role of dietary advanced glycation end products in cardiometabolic disorders, and therapeutic intervention / S. Yamagishi, T. Matsui // Nutrition. – 2016. – №32. – P. 157-165.

56. Hegab Z. Role of advanced glycation end products in hypertension and cardiovascular risk: Human studies / Z. Hegab, S. Gibbons, L. Neyses et al. // Journal of the American Society of Hypertension. – 2012. – №4. – P. 90-102.

57. Neviere R. Implication of advanced glycation end products (Ages) and their receptor (Rage) on myocardial contractile and mitochondrial functions / R. Neviere, Y. Yu, L. Wang et al. // Glycoconjugate Journal. – 2016. – №33. – P. 607-617.

58. Deluyker D. Advanced glycation end products (AGEs) and cardiovascular dysfunction: focus on high molecular weight AGEs / D. Deluyker, L. Evens, V. Bito // Amino Acids. – 2017. – №49. – P. 1535-1541.

59. Abate G. Nutrition and AGE-ing : Focusing on Alzheimer ’ s Disease / G. Abate, M. Marziano // – 2017. – №2017. – P. 7039816.

60. Jiang X. RAGE and its emerging role in the pathogenesis of Parkinson’s disease / X. Jiang, X. Wang, M. Tuo et al. // Neuroscience Letters. – 2018. – №672. – P. 65-69.

61. Kouidrat Y. Advanced glycation end products and schizophrenia: A systematic review / Y. Kouidrat, A. Amad, M. Arai et al. // Journal of Psychiatric Research. – 2015. – №66-67. – P. 112-117.

62. Yamagishi S. Role of receptor for advanced glycation end products (RAGE) and its ligands in cancer risk / S. Yamagishi, T. Matsui, K. Fukami // Rejuvenation Research. – 2014. – №18. – P. 48-56.

63. Palanissami G. RAGE and Its Ligands: Molecular Interplay Between Glycation, Inflammation, and Hallmarks of Cancer—a Review / G. Palanissami, S. F. D. Paul // Hormones and Cancer. – 2018. – №9. – P. 295-325.

64. Malik P. Role of receptor for advanced glycation end products in the complication and progression of various types of cancers / P. Malik, N. Chaudhry, R. Mittal et al. // Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects. – 2015. – №1850. – P. 1898-1904.

65. Lin J. A. Glycative stress from advanced glycation end products (AGEs) and dicarbonyls: An emerging biological factor in cancer onset and progression / J.A. Lin, C.H. Wu, C.C. Lu et al. // Molecular nutrition & food research. – 2016. – №60. – P. 1-15.

66. Успенская Ю. А. Лиганды RAGE-белков: роль в межклеточной коммуникации и патогенезе воспаления / Ю. А. Успенская, Ю. К. Комлева, Е. А. Пожиленкова и др. // Вестник Российской академии медицинских наук. – 2015. – №70. – С. 694-703.

67. Емельянов В. В. Гликирование, антигликирование и дегликирование: роль в механизмах старения и геропротекции / В.В. Емельянов // Успехи геронтологии. – 2016. – №3. – С. 407-416.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Uribarri J. Dietary AGEs and their Role in Health and Disease / J. Uribarri – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 1-384 p.

2. Basta G. Advanced glycation end products and vascular inflammation: Implications for accelerated atherosclerosis in diabetes / G. Basta, A. M. Schmidt, R. De Caterina // Cardiovascular Research. – 2004. – №63. – P. 582-592.

3. Vistoli G. Advanced glycoxidation and lipoxidation end products (AGEs and ALEs): An overview of their mechanisms of formation / G. Vistoli, D. De Maddis, A. Cipak et al. // Free Radical Research. – 2013. – №47. – P. 3-27.

4. Nass N. Advanced glycation end products, diabetes and ageing / N. Nass, B. Bartling, A. N. Santos et al. // Zeitschrift fur Gerontologie und Geriatrie. – 2007. – №40. – P. 349-356.

5. Gugliucci A. Formation of Fructose-Mediated Advanced Glycation End Products and Their Roles in Metabolic and Inflammatory Diseases / A. Gugliucci // Advances in Nutrition: An International Review Journal. – 2017. – №8. – P. 54-62.

6. Aragno M. Dietary sugars and endogenous formation of advanced glycation endproducts: Emerging mechanisms of disease / M. Aragno, R. Mastrocola // Nutrients. – 2017. – №9. – P. 1-16.

7. Ottum M. S. Advanced glycation end-products: modifiable environmental factors profoundly mediate insulin resistance / M. S. Ottum, A. M. Mistry // Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition. – 2015. – №57. – P. 1-12.

8. Uribarri J. Advanced Glycation End Products in Food and a Practical Guide to Their Reduction in the Diet / J. Uribarri, S. Woodruff, S. Goodman et al. // Journal of American Dietic Association. – 2010. – №110. – P. 1-27.

9. Poulsen M. W. Advanced glycation endproducts in food and their effects on health / M. W. Poulsen, R. V. Hedegaard, J.M. Andersen et al. // Food and Chemical Toxicology. – 2013. – №60. – P. 10-37.

10. Uribarri J. Dietary Advanced Glycation End Products and Their Role in Health and Disease 1 , 2 / J. Uribarri, M. Dolores, M. Pía et al. // Advances in Nutrition. – 2015. – №6. – P. 461-473.

11. Kellow N. J. Effect of diet-derived advanced glycation end products on inflammation / N. J. Kellow, M. T. Coughlan // Nutrition Reviews. – 2015. – №73. – P. 737-759.

12. Ott C. Role of advanced glycation end products in cellular signaling / C. Ott, K. Jacobs, E. Haucke et al. // Redox Biology. – 2014. – №2. – P. 411-429.

13. Pinkas A. Advanced Glycation End-Products and Their Receptors: Related Pathologies, Recent Therapeutic Strategies, and a Potential Model for Future Neurodegeneration Studies / A. Pinkas, M. Aschner // Chemical Research in Toxicology. – 2016. – №29. – P. 707-714.

14. Zhu W. Advanced glycation end products induce a prothrombotic phenotype in mice via interaction with platelet CD36 / W. Zhu, W. Li, R. L. Silverstein // Blood. – 2012. – №119. – P. 6136-6144.

15. Lopez Diez R. Cellular Mechanisms and Consequences of Glycation in Atherosclerosis and Obesity / R. Lopez Diez, A. Shekhtman, R. Ramasamy et al. // Biochimica et Biophysica Acta - Molecular Basis of Disease. – 2016. – №1862. – P. 2244-2252.

16. Kierdorf K. RAGE regulation and signaling in inflammation and beyond / K. Kierdorf, G. Fritz // Journal of Leukocyte Biology. – 2013. – №94. – P. 55-68.

17. Neeper M. Cloning and expression of a cell surface receptor for advanced glycosylation end products of proteins / M. Neeper, A. M. Schmidt, J. Brett et al. // Journal of Biological Chemistry. – 1992. – №267. – P. 14998-15004.

18. Chuah Y. K. Receptor for Advanced Glycation End Products and Its Ligands / Y. K. Chuah, R. Basir, H. Talib et al. // International Journal of Inflammation. – 2013. – №2013. – P. 403460.

19. Juranek J. Receptor for advanced glycation end-products in neurodegenerative diseases / J. Juranek, R. Ray, M. Banach et al. // Reviews in the Neurosciences. – 2015. – №26. – P. 691-698.

20. Degani G. A capture method based on the VC1 domain reveals new binding properties of the human receptor for advanced glycation end products (RAGE) / G. Degani, A. A. Altomare, M. Colzani et al. // Redox Biology. – 2017. – №11. – P. 275-285.

21. Schmidt A. M. Soluble RAGEs - Prospects for treating & tracking metabolic and inflammatory disease / A.M. Schmidt // Vascular Pharmacology. – 2015. – №72. – P. 1-8.

22. Zhang L. Receptor for advanced glycation end products is subjected to protein ectodomain shedding by metalloproteinases / L. Zhang, M. Bukulin, E. Kojro et al. // Journal of Biological Chemistry. – 2008. – №283. – P. 35507-35516.

23. Wang Y. sRAGE Induces Human Monocyte Survival and Differentiation / Y. Wang, H. Wang, M. G. Piper et al. // The Journal of Immunology. – 2010. – №185. – P. 1822-1835.

24. Davis K. E. Advanced Glycation End Products, Inflammation, and Chronic Metabolic Diseases: Links in a Chain? / K. E. Davis, C. Prasad, P. Vijayagopal et al. // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2016. 2016. – P. 1-32.

25. Xue J. The Receptor for Advanced Glycation End Products (RAGE) Speci fi cally Recognizes Methylglyoxal-Derived AGEs / J. Xue, R. Ray, D. Singer et al. // Biochemistry. – 2014. – №53. – P. 3327-3335.

26. Downs C. A. RAGE-induced changes in the proteome of alveolar epithelial cells / C. A. Downs, N. M. Johnson, G. Tsaprailis et al. // Journal of Proteomics. – 2018. – №177. – P. 11-20.

27. Vicentino A. R. R. Emerging role of HMGB1 in the pathogenesis of schistosomiasis liver fibrosis / A. R. R. Vicentino, V.C. Carneiro, D. Allonso et al. // Frontiers in Immunology. – 2018. – №9. – P. 1-15.

28. Hudson B. I. Targeting RAGE Signaling in Inflammatory Disease. / B. I. Hudson, M. E. Lippman // Annual review of medicine. – 2018. – №69. – P. 349-364.

29. Rojas A. The receptor for advanced glycation end-products: A complex signaling scenario for a promiscuous receptor / A. Rojas, F. Delgado-Lopez, I. Gonzalez et al. // Cellular Signalling. – 2013. – №25. – P. 609-614.

30. Yatime L. The Structure of the RAGE:S100A6 Complex Reveals a Unique Mode of Homodimerization for S100 Proteins / L. Yatime, C. Betzer, R. K. Jensen, et al. // Structure. – 2016. – №24. – P. 2043-2052.

31. Popa I. Expression and subcellular localization of RAGE in melanoma cells / I. Popa, E. Ganea, S. M. Petrescu // Biochemistry and Cell Biology. – 2014. – №92. – P. 127-136.

32. Xie J. Cellular signalling of the receptor for advanced glycation end products (RAGE) / J. Xie, J. D. Mendez, V. Mendez-Valenzuela et al. // Cellular Signalling. – 2013. – №25. – P. 2185-2197.

33. Wang L. DHA Inhibited AGEs-Induced Retinal Microglia Activation Via Suppression of the PPARγ/NFκB Pathway and Reduction of Signal Transducers in the AGEs/RAGE Axis Recruitment into Lipid Rafts / L. Wang, K. Chen, K. Liu et al. // Neurochemical Research. – 2015. – №40. – P. 713-722.

34. Munescue S. Low-molecular weight fractions of Japanese sou sauce as a RAGE antagonist via inhibition of RAGE trafficking to lipid rafts / S. Munescue, Y. Yamamoto, R. Urushihara et al. // Food and Function. – 2013. – №4. – P. 1835-1842.

35. Hofmann Bowman M. A. Advanced glycation end products in diabetic cardiomyopathy: An alternative hypothesis / M.A. Hofmann Bowman, S. Fedson, A. M. Schmidt // Journal of Heart and Lung Transplantation. – 2011. – №30. – P. 1303.

36. Xue J. Change in the Molecular Dimension of a RAGE-Ligand Complex Triggers RAGE Signaling / J. Xue, M. Manigrasso, M. Scalabrin et al. // Structure. – 2016. – №24. – P. 1509-1522.

37. Jangde N. Cysteine mediated disulfide bond formation in RAGE V domain facilitates its functionally relevant dimerization / N. Jangde, R. Ray, S. Sinha et al. // Biochimie. – 2018. – №154. – P. 55-61.

38. Wei J. Y. Activation of RAGE/STAT3 pathway by methylglyoxal contributes to spinal central sensitization and persistent pain induced by bortezomib / J. Y. Wei, C.C. Liu, H. D. Ouyang et al. // Experimental Neurology. – 2017. – №296. – P. 74-82.

39. Oczypok E. A. All the "RAGE" in lung disease: The receptor for advanced glycation endproducts (RAGE) is a major mediator of pulmonary inflammatory responses / E. A. Oczypok, T. N. Perkins, T. D. Oury // Paediatric Respiratory Reviews. – 2017. – №23. – P. 40-49.

40. Ramasamy R. Advanced glycation end products and RAGE: A common thread in aging, diabetes, neurodegeneration, and inflammation / R. Ramasamy, S. J. Vannucci, S. S. Du. et al. // Glycobiology. – 2005. – №15. – P. 16R-28R.

41. Yu W. Pterostilbene inhibited advanced glycation end products (AGEs)-induced oxidative stress and inflammation by regulation of RAGE/MAPK/NF-κB in RAW264.7 cells / W. Yu, X. Hu, M. Wang // Journal of Functional Foods. – 2018. – №40. – P. 272-279.

42. Cao W. Advanced glycation end products induced immune maturation of dendritic cells controls heart failure through NF-κB signaling pathway / W. Cao, J. Chen, Y. Chen et al. // Archives of Biochemistry and Biophysics. – 2015. – №580. – P. 112-120.

43. Sevillano N. Internalization of the receptor for advanced glycation end products (RAGE) is required to mediate intracellular responses / N. Sevillano, M. D. Giron, M. Salido et al. // Journal of Biochemistry. – 2009. – №145. – P. 21-30.

44. Ansari N. A. Nefermentativnoe glikirovanie belkov: ot diabeta do raka [Non-enzymatic Glycation of Proteins: From Diabetes to Cancer] / N. A. Ansari, Z. Rasheed // Biomedicinskaya khimiya [Biomedical chemistry]. – 2010. – №2. – P. 168-178. [in Russian]

45. Indurthi V. S. K. Interaction between glycated serum albumin and AGE-receptors depends on structural changes and the glycation reagent / V. S. K. Indurthi, E. Leclerc, S.W. Vetter // Archives of Biochemistry and Biophysics. – 2012. – №528. – P. 185-196.

46. Kandarakis S. A. Emerging role of advanced glycation-end products (AGEs) in the pathobiology of eye diseases / S. A. Kandarakis, C. Piperi, F. Topouzis // Progress in Retinal and Eye Research. – 2014. 2014. – P. 1-18.

47. Ramasamy R. The diverse ligand repertoire of the receptor for advanced glycation endproducts and pathways to the complications of diabetes / R. Ramasamy, S. F. Yan, A. M. Schmidt // Vascular Pharmacology. – 2012. – №57. – P. 160-167.

48. Frimat M. Kidney, heart and brain: three organs targeted by ageing and glycation / M. Frimat, M. Daroux, R. Litke et al. // Clinical Science. – 2017. – №131. – P. 1069-1092.

49. Byun K. Advanced glycation end-products produced systemically and by macrophages: A common contributor to inflammation and degenerative diseases / K. Byun, Y. C. Yoo, M. Son et al. // Pharmacology and Therapeutics. – 2017. – №177. – P. 44-55.

50. Reynaert N. L. Advanced glycation end products and their receptor in age-related, non-communicable chronic inflammatory diseases; Overview of clinical evidence and potential contributions to disease / N. L. Reynaert, P. Gopal, E.P.A. Rutten et al. // International Journal of Biochemistry and Cell Biology. – 2016. – №81. – P. 403-418.

51. Vlassara H. Advanced Glycation Endproducts in Diabetes and Diabetic Complications / H. Vlassara, G. E. Striker // Endocrinology and Metabolism Clinics of North America. – 2013. – №42. – P. 697-719.

52. Pertynska-Marczewska M. Advanced glycation end products: A link between metabolic and endothelial dysfunction in polycystic ovary syndrome? / M. Pertynska-Marczewska, E. Diamanti-Kandarakis, J. Zhang et al. // Metabolism: Clinical and Experimental. – 2015. – №64. – P. 1564-1573.

53. de Vos L. C. Advanced glycation end products: An emerging biomarker for adverse outcome in patients with peripheral artery disease / L. C. de Vos, J. D. Lefrandt, R. P. F. Dullaart et al. // Atherosclerosis. – 2016. – №254. – P. 305-313.

54. Lankin V. Z. Vliyanie prirodnyh dikarbonilov na aktivnost' antioksidantnyh fermentov in vitro i in vivo [The Influence of Natural Dicarbonils on the Antioxidant Enzymes Activity in vitro and in vivo] / V. Z. Lankin, G. G. Konovalova, A. G. Tikhaze and others // Biomedicinskaya khimiya [Biomedical chemistry]. – 2012. – №6. – P. 727-736. [in Russian]

55. Yamagishi S. Pathologic role of dietary advanced glycation end products in cardiometabolic disorders, and therapeutic intervention / S. Yamagishi, T. Matsui // Nutrition. – 2016. – №32. – P. 157-165.

56. Hegab Z. Role of advanced glycation end products in hypertension and cardiovascular risk: Human studies / Z. Hegab, S. Gibbons, L. Neyses et al. // Journal of the American Society of Hypertension. – 2012. – №4. – P. 90-102.

57. Neviere R. Implication of advanced glycation end products (Ages) and their receptor (Rage) on myocardial contractile and mitochondrial functions / R. Neviere, Y. Yu, L. Wang et al. // Glycoconjugate Journal. – 2016. – №33. – P. 607-617.

58. Deluyker D. Advanced glycation end products (AGEs) and cardiovascular dysfunction: focus on high molecular weight AGEs / D. Deluyker, L. Evens, V. Bito // Amino Acids. – 2017. – №49. – P. 1535-1541.

59. Abate G. Nutrition and AGE-ing : Focusing on Alzheimer ' s Disease / G. Abate, M. Marziano // – 2017. – №2017. – P. 7039816.

60. Jiang X. RAGE and its emerging role in the pathogenesis of Parkinson's disease / X. Jiang, X. Wang, M. Tuo et al. // Neuroscience Letters. – 2018. – №672. – P. 65-69.

61. Kouidrat Y. Advanced glycation end products and schizophrenia: A systematic review / Y. Kouidrat, A. Amad, M. Arai et al. // Journal of Psychiatric Research. – 2015. – №66-67. – P. 112-117.

62. Yamagishi S. Role of receptor for advanced glycation end products (RAGE) and its ligands in cancer risk / S. Yamagishi, T. Matsui, K. Fukami // Rejuvenation Research. – 2014. – №18. – P. 48-56.

63. Palanissami G. RAGE and Its Ligands: Molecular Interplay Between Glycation, Inflammation, and Hallmarks of Cancer—a Review / G. Palanissami, S. F. D. Paul // Hormones and Cancer. – 2018. – №9. – P. 295-325.

64. Malik P. Role of receptor for advanced glycation end products in the complication and progression of various types of cancers / P. Malik, N. Chaudhry, R. Mittal et al. // Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects. – 2015. – №1850. – P. 1898-1904.

65. Lin J. A. Glycative stress from advanced glycation end products (AGEs) and dicarbonyls: An emerging biological factor in cancer onset and progression / J. A. Lin, C. H. Wu, C. C. Lu et al. // Molecular nutrition & food research. – 2016. – №60. – P. 1-15.

66. Uspenskaya Y. A. Ligandy RAGE-belkov: rol' v mezhkletochnoj kommunikacii i patogeneze vospaleniya [Ligands of RAGE-Proteins: Role in Intercellular Communication and Pathogenesis of Inflammation] / Y. A. Uspenskaya, Y. K. Komleva, E.A. Pozhilenkova and others // Vestnik rossijskoj akademii medicinskih nauk [Annals of the Russian academy of medical sciences]. 2015. – №70. – P. 694-703. [in Russian]

67. Emelyanov V. V. Glikirovanie, antiglikirovanie i deglikirovanie: rol' v mekhanizmah stareniya i geroprotekcii [Glycation, Antiglycation and Deglycation: Their Role in Aging Mechanisms and Geroprotective Effects] / V. V. Emelyanov // Uspekhi gerontologii [Advances in Gerontology]. – 2016. – №3. – P. 407-416. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.035

ВЫВОДИМОСТЬ И ПОЛОВАЯ ДЕТЕРМИНАЦИЯ НЕКОТОРЫХ ПТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЯИЦ

Научная статья

Мальцев А.[1], Омаркожаулы Н.[2], Сенкебаева Д.[3,] *
[3] ORCID: 0000-0002-3248-0550,
[1] ФГБНУ «Сибирский научно-исследовательский институт птицеводства, Омск, Россия;
[2, 3] Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан

* Корреспондирующий автор (dilor1986[at]mail.ru)

Аннотация

Повышение выводимости и раннее выявление половой детерминации молодняка птицы создает предпосылки для дифференциации их содержания и кормления, что будет способствовать снижению себестоимости птицеводческой продукции и повышению рентабельности отрасли. Целью исследования явилось изучение влияния сроков хранения яиц перед инкубацией, их формы, массы и плотности на выводимость и соотношение полов. Взаимосвязь выводимости и половой дифференциации с параметрами яиц определяли их инкубацией в контрольных лотках, различающиеся лишь по изучаемому параметру. Пол молодняка определяли японским методом. По результатам исследования инкубации яиц установили, что по мере удлинения сроков хранения яиц индеек с 7 до 9 дней наблюдалось снижение выводимости молодняка с 72,2 до 68,2%; яиц гусынь с 7 до 14 дней – с 64,6 до 55,2% при изменении соотношения в выводе самок/самцов с 1,00/1,02 до 1,00/1,26 и с 1,00/1,03 до 1,00/1,21 соответственно. Выводимость яиц индеек массой 80-90 г составила 75,4%, яиц гусынь массой 140-150 г – 66,7%. По мере увеличения массы инкубируемых яиц индеек с 80 до90 г и более соотношение самок/самцов возрастало с 1,00/0,96 до 1,00/1,11, гусей с 140 до 150 г и более - с 1,00/1,06 до 1,00/1,13. При снижении индекса формы яиц ухудшалась выводимость молодняка при возрастании удельного веса самцов. При снижении плотности также наблюдалось ухудшение выводимости, но не отмечалось сдвигов в соотношении полов.

Ключевые слова: птица, индюшата, гусята, выводимость, пол, детерминация.

COMMUNICATION OF PARAMETERS OF HATCHING EGGS WITH HATCHABILITY AND SEX DETERMINATION OF BIRDS

Research article

Maltsev A.[1], Omarkozhauly N.[2], Senkebayeva D.[3]
[3] ORCID: 0000-0002-3248-0550,
[1] Federal State Budget Scientific Institution «Siberian Scientific Research Institute of Poultry», Omsk, Russia
[2, 3] S.Seifullin Kazakh AgroTechnical University. Astana, Republic of Kazakhstan

* Corresponding author (dilor1986[at]mail.ru)

Abstract

The purpose of this research was to study of effect of periods of storage of eggs before incubation, their shape, mass and density on hatchability, and sex ratio. The increaseof hatchability and early detection of sex determination of young birds create opportunitiesfor differentiation of their keeping and feeding that will help to reduce the cost of poultry products and increase of industry profitability. Interconnection of hatchability and by the studied parameter. Sex of pauls has been determined by Japanese method.According to the results of study of incubation of turkeys eggs have been found that sue to the elongation of shelf life from 7 to 9 days, there was a decrease of hatching of young turkeys from 72.2% to 68.2%; geese eggs with a shelf life from 7-14 days - from 64.6% to 55.2% with ratio change in hatching of females/males from 1.00/.02 to 1.00/1.26 up to 1.00/1.03 and 1.00/1.21 respectively. Hatchability of turkeys' eggs with weight 80-90 g was 75.4%, geese eggs with weight 140-150 g - 66.7%. Upon gaining in weight of incubated eggs of turkeys from 80 to 90 g and ratio of female/male has been increased from 1.00/0.96 to 1.00/1.11 and geese from 140 to 150 g or more to 1.00/1.06 to 1.00/1.13. When the index of shape of eggs is reduced, the hatching of young birds decreased and density of males increased. The decrease in density also reduced the hatching of young birds, but does not reflect on sex ratio.

Keywords: bird, chicks, determination, gosling, hatchability of eggs,sex, turkey, young.

Introduction

Sex is a set of genetically determined properties that determine its role in reproduction. Sex differentiation of embryo is formed when fused is affected by sex determination factors during the ontogenesisof autosomal sex chromosomes and epigenetic factors of environment.

Significant sex determination in poultry development actualizes the task on early detection of young birds of incubated young birds. Earlier differentiation of feeding and keeping of grown young by age-sex group allow it firstly to reduce the cost of feed per unit of production, which creates opportunitiesfor reducing the cost and increasing the profitability of industry reference.

Sexual differentiation of embryos of birds (W chromosome) in connection with the homozygous of male chromosomes (ZZ) is determined by females heterozygous chromosomes (ZW). Therefore, in the early days of embryos development the sex identification can be performed on gametes of female in the left gonads and after ten days it is possible to apply the methods of molecular genetics as autoscope. For example, sexual identity on 7 -9 day of development can be determined by coherence tomography from allantoic fluid of androgens and estrogens [1, P. 71].

According to the classical theory of Fischer [4, P. 47] on sexual determination of animals, the sex ratio in a large number of samples must be approach 1/1, but this ratio in small samples can move under the influence by both internal genotype and external paratypic factors. In particular, the lengthening of egg pre-incubation storage periods reduces the hatchability of young because of different life potential of embryos that increases the density of males [12, P. 84-90].

Tagirov [12, P. 84-90], Sergeyev [11, P. 30] and Ferguson [3] suggested a hypothesis about the possibility of existence of allelic forms of enzyme aromatize or female factor in W-chromosome in different populations of birds that have negative impact on viability of female chromosomes with different sensitivity to external influences (temperature, long-term storage, and etc.), which leads to displacement of sex ratio.

The issue on early sex determination of incubated young birds has a great scientificant research and practical value that allowto differentiate the technology of its growing and specificate feeding rate and diet, which is a determining factor of reduction of costs and feed per unit of production and increasing the economic efficiency of poultry production.

Materials And Methods

Brood of day old chicks was determined by their quantity and quality. To examine the relationship between hatchability and sexual differentiation with eggs parameters, eggs were placed in control trays setters, differing only by studied parameter: in the 1st experiment - on storage period, in the 2nd experiment - by weight, in the 3rd experiment–by shape, in the 4th experiment –by density. Storage periodsof eggs was controlled by date of receipt in the hatching house, weight –by weighing, shape - by calculation of diameter to length, density - by immersion in standard solutions.

Sex of day old chicks was determined by Japanese method –differentiation of rudimentary hills in the mucous membrane of cloaca. For this purpose, after 8-10 hours of hatching, turkey poult with umbilical cord and dry feathers is held on palm of the left hand upper legs, stroking the abdomen with index and middle fingers of the right hand to speed upthe first fecal. Then chick was placed on palm with head down and legs between index and middle fingers of the right hand and ring and little finger pressed his neck so that abdomen pressed against his back. At this time, the mucous membrane of cloaca is opened by the thumb finger of the left hand.

In the open vent of male turkeys on the ventral part of mucous membrane of cloaca closer to the surface there are observed a small, flexible, reddish genital hills, which are absent in females.

To determine of sex the gosling is held in the left hand and fixe his foot between middle and index fingers of the left hand, gosling head should be down and neck rest on the little finger. The vent should be stretched by thumb of the left hand, thumb and forefinger of his right hand. After that, thumb of the right hand is placed on edge of ventral part of the cloaca and opened it.

At the same time in the fold of cloaca in males is visible vestige of bead in the form of a bent size of 3-4 mm. Females in the inner fold of the cloaca are clearly visible the flat and spherical mucosal thickening. Sometimes it is enough to slightly pull the tail of gosling on the back to determine sexual organs (Fig. 1).

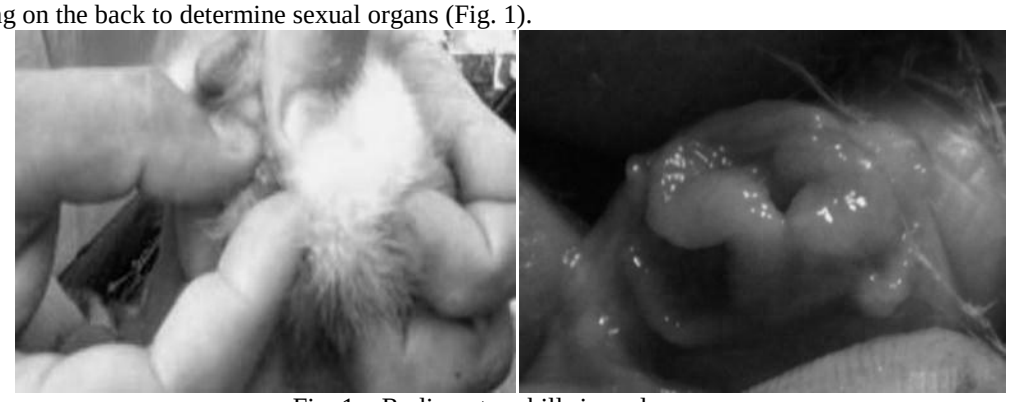


Fig. 1 – Rudimentary hills in male geese

Sexdetermination of young birds should not exceed 16-18 hours after hatching, increase of this periodleads to modification of form of the cloacal foldsand reduce productivity.

Results

Study on evaluation of young hatchability and sex determination was carried out on poultry farms "Ordabasy Kus"of South Kazakhstan and "Bishkulsk" of North Kazakhstan regions.

When collecting, storage and incubation of eggs the temperature and humidity conditionsrecommended for these hatcheries were reserved. At the initial stage of selection and sorting the eggs looked around topside and sorted according to storage period, weight, shape and density. The most dirty eggs and eggs with cracked or too thin shell, with calcareous nodules and marble shell, too small and too large, as well as irregular shapes were left.

In the pre-candling were determined the homogeneity of shell, volume and strength of air chamber, mobility of yolk, location of embryonic disc and reject eggs with wrong locationor blurred boundaries of air chamber, double-yolk, blood or meat clots, with broken chalaza.

Selected eggs with a clearly distinguishable in candling germinal disc of 4 mm in diameter with a slightly flattened yolk, held on both sides chalaza in a tightly liquefied protein layer were placed in trays of setter.

The incubation of eggs of white broad-breed turkeys was carried out in setters "Petersime", and egg of white Italian geese in setters "Universal" with automatically save of optimal parameters of temperature and humidity of incubation.

The results of incubation allowed to observe the connection of hatchability and sex differentiation of turkeys and geese with parameters of hatching eggs in the form of pre-incubation periods of storage, weight, shape and density.

In the first study were monitored the hatchability and sex of young from eggs with equal weight, shape and density, but with different pre-incubation periods of storage (Table 1).

Table 1 – Hatching and sex of young from eggs with different terms of pre-incubation storage

Control trays	**Number of eggs, pieces**	**Period of storage, days**	**Fertilizedegg**		**Hatched young**		
					sex	**among them**	
			pieces	**%**		♀	♂
Turkey eggs							
1-st	126	6	111	88,1	91	45	46
2-nd	126	8	108	85,7	89	44	45
3-rd	126	9	98	77,8	86	38	48
Goose eggs							
1-st	116	7-8	95	81,8	75	37	38
2-nd	116	10-11	96	82,7	67	33	34
3-rd	116	13-14	94	81,0	64	29	35

The results of incubation, represented in Table 1, have shown a connection of hatching and sex of day-old chicks with pre-incubation egg storage periods. Thus, the hatching of healthy turkey poults from set eggs in amount of 126 with a shelf life of less than 6 days was 72.2% at the same time from 91 chicks where 49.5% were females, 50.5% males; with a shelf life of 8 days the hatch was 70.6% and from 89 chicks where 49.4% were females, 51.6% males; with a shelf life of 9 days of the hatch was 68.2% and from 86 chicks 44.2% were females, 55.8% males.

Hatching of healthy goslings from set in amount of 116 eggs with a shelf life of 7-8 days was 64.7% from 75 chicks where 49.3% were female, 50.7% - male, with a shelf life of 10-11 days the hatch was 57.7 % from hatching 67 chicks where46.3% were females, 53.7% males; with a shelf life of 13-14 days the hatchwas 55.2% from hatching64 chicks where45.3% were females, 54.7% males.

In the second study were studied the hatching and sex of young from eggs with different weight, excluding shelf life, shape and density (Table 2).

Table 2 – Hatching and sex of young from eggs with different weight

Control trays	**Number of eggs, pieces**	**Egg weight, g**	**Fertilizedegg**		**Hatched young**		
					sex	**among them**	
			pieces	**%**		♀	♂
Turkey eggs							
1-st	126	< 80	108	85,7	94	48	46
2-nd	126	80-90	107	84,9	95	45	50
3-rd	126	> 90	96	76,2	72	35	37
Goose eggs							
1-st	66	< 140	52	78,8	38	20	18
2-nd	66	140-150	55	83,3	44	21	23
3-rd	66	> 150	53	80,3	34	16	18

Hatching of turkey chicks from eggs with weight less than 80 g was 74.6% so from hatching 94 chicks where51.1% were females, 48.9% males; weight 80-90 g hatching was 75.4% and from hatched 95 chicksfemales were 47.4%, 52.6% males; weight more than 150 g hatching was 57.1% and from hatched72 chicksfemales were 48.6%, 51.4% males.

Hatching of goslings from eggs with weight less than 140 g was 57.6% from hatching 38 chicksfemales were 52.6%, 47.4% males; weight 140-150 g hatching was 66.7% and from hatched44chicks females were 47.7%, 52.3% males; weight more than 150 g hatching was51.5% and from hatched 34 chicks females were 47.0% , 53.0% males.

In the third study were studied the hatching and sex of young from eggs with different shape, excluding shelf life, weight and density (Table 3).

Table 3 – Hatching and sex of young from eggs with different shape

Control trays	**Number of eggs, pieces**	**Shapeindex, %**	**Fertilizedegg**		**Hatched young**		
					sex	**among them**	
			pieces	**%**		♀	♂
Turkey eggs							
1-st	126	< 73	96	76,2	70	33	37
2-nd	126	74-76	112	88,9	94	46	48
3-rd	126	> 77	109	86,5	98	50	48
Goose eggs							
1-st	66	> 65	53	80,3	45	20	25
2-nd	66	65-69	54	81,8	47	23	24
3-rd	66	< 70	53	80,3	46	24	22

Hatching of turkeys from egg with shape index of less than 73% was55.6% from hatching 70 chicks females were 47.1%, 52.9% males; with shape index 74-76% hatching was 74.6% from hatching 94 chicks where 48.9% were females, 51.1% males; with shape index more than 77% hatching was 77.8%, from hatching98 chicks 51.0% were females, 49.0% males.

Hatching of goslings from egg with shape index of less than 65% was68,2% from hatching 45 chicks females were 44,4%, 55,6%males; with shape index 65-69% hatching was 71,2% from hatching47 chicks where 48,9% were females, 51.1% males; with shape index more than 70% hatching was 69,7%, from hatching46 chicks 52,2% were females, 47,8% males.

In the fourth study were studied the hatching and sex of young from eggs with different density, excluding shelf life, weight and shape (Table 4).

Table 4 – Hatching and sex of young from eggs with different density

Control trays	Number of eggs, pieces	Eggdensity, g%	Fertilizedegg		Hatched young		
					sex	among them	
			pieces	%		♀	♂
Turkey eggs							
1-st	126	<1,070	108	85,7	76	37	39
2-nd	126	1,071-1,080	111	88,1	91	46	45
3-rd	126	>1,081	114	90,4	93	48	45
Goose eggs							
1-st	66	<1,085	53	80,3	42	21	21
2-nd	66	1,085-1,090	54	81,8	46	22	24
3-rd	66	>1,090	53	80,3	44	22	22

Hatching of turkeys from egg with density of less than 1,070 g% was60,3% from hatching 76 chicks females were 48,7%, 51,3% males; with density 1,071-1,080 g% hatching was72,2% from hatching 91 chicks, where 50,5% were females, 49,5% males; with density more than 1,081 g% hatching was73,8%from hatching 93 chicks 51.6% were females, 48,4% males.

Hatching of goslings from egg with density of less than 1,085 g% was63,6% from hatching 42 chicks females were 50,0%, 50,0% males; with density 1,085-1,090 g% hatching was 69,7%, from hatching 46 chicks, where 47,8% were females, 52,2% males; with density more than 1,090 g% hatching was 66,7%, from hatching 44 chicks 50,0% were females, 50,0% males.

Discussion

Embryogenesis and sex differentiation are related to both genetic and paratypic factors of hatching eggs parameters in the form of pre-incubation periods of storage, weight, shape and density.

Internalgenetic factors and external epigenetic factors are influenced on the formation of sex of young bird. During the early embryogenesis at the genetic level there is a sex differentiation of zygote caused by homozygous or heterozygous gametes, which have affected also by paratypic factors.

Ismailov and others [7, P. 28-30] in their research syndicate the connection embryogenesis and sex differentiation with genetic and paratypic factors of hatching eggs and the establishment of parameters of a healthy young goslings with high growth. So, Tagirov [12, P. 84-90] found a significant shift of sex ratio towards males formation in hatching of eggs Rhode Island Red after their storage within 15-21 days.In his studies the number of males is almost twice higher than females. Similar results were obtained in experiments of Sergeyev [11, P. 30], that carried out in the experimental farm "Borki" the ratio of females/males of goslings hatchin from eggs with a shelf life of 4-8 days was - 1.00/0.95; 9-12 days - 1.00/1.01; 13-15 days - 1.00/1,024-1,028. Ferguson [3], also notes that the increase of pre-incubation period of storage of eggs increases the output of proportion of males, because accumulated aromatase allelic of enzyme W has negative impact on density of female chromosomes.

Dependence of hatchability and embryos sex from weight of eggs of geese and turkeys with a high output of a healthy day old chicks in our study established from the average weight of eggs in the predominance of males in hatching. Similar results were obtained in studies of Rolnick [10, P. 34-38], who points out that the weight of eggs ofmales weighted 0.2-0.4 grams more than eggs from females. Dyadichkina [2, P. 12-16], has established a direct relationship between the density of eggs and eggshell thickness.

Interconnection of hatchability and sex differentiation with parameters of eggs confirmed by studies of Francis and Barlow [5, P. 673-675], Holmgren and Mosegaard [6, P. 910-925] on the impact of sex determination in the early stages of embryogenesis temperature and acidity (pH), buffer and salinity of environments. Romanoff [8, P. 643], Rolnik and Portenko [10, P. 34-38] indicate the impact of paratypic factors of environmental on the formation of sex cells, concentration of estrogen, gas production rate and metabolic processes in different steps of embryogenesis.

Thus, the results of study of communication of parameters of hatching eggs of geese and turkeys with hatchability and sex differentiation of young animals are agreed with the earlier results of study and indicate the possibility to influence on hatchability of young and sex differentiation paratypic factors.

Conclusion

Hormonal methods, giving the opportunity to determine sex of embryo in the early embryogenesis at 3.5-4.5 hours by biopotentials gonads and level of estrogen is acceptable poor in scale of production.

Extension of pre-incubation storage of egg has reduced biocapacity of embryo development. The dependence of hatchability and sex of embryos from egg weight demonstrated by a higher hatching of a healthy day-old chicks from the average egg weight. With the increase of value of egg shape index was increased hatching of day-old chicks and the ratio of hatching of females/males, on the contrary, was decreased. Densityreduction of eggs was decrease the hatching of day-old chicks. The tendency of decrease in hatching and increase of age-specific weight of males was established with lengthening

shelf life of eggs.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Бондаренко Ю.В. Современные методы определения пола молодняка с/х. птицы.- Харьков, 2004.- 71 с.
2. Фишер Р.А. Генетическая теория естественного отбора // Пресса Оксфордского унив.-1930. - 47 с.
3. Тагиров М.Т. Смещение полового соотношения у кур после продолжительного хранения яиц // Биотехнология.- 2010.- Т. 3, № 3.- 84-90 с.
4. Фрэнсис Р. С., Барлоу Г. В. Социальный контроль первичной половой дифференциации у цихлид Мидаса // Известия Национальной академии наук.−1993.-№ 90.- 673-675 с.
5. Холмгрен К., Мозегаард Х. Влияние статуса индивидуального роста на будущий пол европейского угря // Журнал «Биология рыб».−1996.-№ 49. 910−925 с.
6. Рольник В.В. и Портенко Э.Л. Газообмен развивающегося куриного эмбриона.- «Общая биология».- 1964.- 34-38 с.
7. Романофф А.Л. Химико-физиологические половые различия у новорожденных цыплят. Птицеводство. 27/5 : 643 с.
8. Сергеев А.И. Влияние сроков хранения яиц на выводимость. - Актуальные проблемы развития птицеводства.- М., Серг Посад, 2009.- 30 с.
9. Фергюсон М. В. Дж. Способы инкубирования и вывода птичьих яиц // Пат. WO 94/13132.- 1994.
10. Рольник В.В. Биология эмбрионального развития птиц.- Л.: Наука.-1968.- 88 с.

Список литературы на английском / References in English

1. Bondarenko I. V. Sovremennyye metody opredeleniya pola molodnyaka sel'skokhozyaystvennoy ptitsy [Modern methods of sex determination of young farm birds] / I. V. Bondarenko – Kharkov – 2004 - P. 71.
2. Dyadichkina L. A. Yeshche raz kachestvo yaits kak opredelyayushchiy faktor inkubatsii [Once again the quality of eggs as the defining factor of incubation] / L. A. Dyadichkina // Ptitsa i ptitsaproducty // Poultry and poultry products - 2008 - №2 - P 12-16.
3. Pat. WO 94/13132. Ferguson M. W. J. Method of hatching avian eggs.- 1994.
4. Fisher R. A. The genetical theory of natural selection / R. A. Fisher. - United Kingdom: Oxford Univiversity Press., 1930. – P. 47.
5. Francis R. C. Social control of primary sex differentiation in the Midas cichlid / R. C. Francis., G. W. Barlow. - Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1993 – P. 673-675.
6. Holmgren K. Implications of individual growth status on the future sex of the European eel / K. Holmgren., H. Mosegaard. - Journal of Fish Biology, Volume 49, Issue 5. – P. 910−925. DOI: 10.1111/j.1095-8649.1996.tb00089.x
7. Ismailov R. A. Sokhraneniye i ratsional'noye ispol'zovaniye genofonda gusey Severnogo Kazakhstana. Materialy IV Kazakhstanskogo mezhdunarodnogo foruma ptitsevodcheskikh khozyayst [Preserving and rational use of gene pool of geese of Northern Kazakhstan] / R. A. Ismailov, G. A. Temirbekova and R. I. Sharipova // Materials of the IV Kazakhstan International Forum of Poultry Farmers. - Astana. – 2015, P. 28-30.
8. Romanoff A. L. Chemical and physiological sex differences in newly hot shed chicks / A. L. Romanoff // Poultry Sciences, 1948. - № 27/5. –P. 643.
9. Rol'nik V. V. Biologiya embrional'nogo razvitiya domashney ptitsy [Biology of embryonic development of poultry] / V. V. Rolnik. Leningrad: Nauk. – 1968. - p. 88... Leningrad: Science – 1968. - P. 88.
10. Rol'nik V. V. Gazoobmen razvivayushchegosya kurinogo embriona [Gas exchange of the developing chick embryo] / V. V. Rolnik E. L. Portenko. // Obshchaya biologiya [General Biology]. – 1964 - P. 34-38.
11. Sergeyev A. I. Vliyaniye perioda khraneniya na vyvodimost' yaits. Aktual'nyye problemy razvitiya ptitsevodstva [The effect of storage period on the hatchability of eggs. Actual problems of development of poultry farming] / A. I. Sergiyev // Moscow: SergievPosad – 2009 - P. 30.
12. Tagirov M. T. Smena sootnosheniya polov u kur posle dlitel'nogo khraneniya yaits [The shift of sex ratio in chickens after prolonged storage of eggs] / M. T. Tagirov // Biotekhnologiya - 2010.– Biotechnology - №3- P.84-90. [in Russian]

ВЕТЕРИНАРНЫЕ НАУКИ / VETERINARY SCIENCE

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.036

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ КОРМОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЦЫПЛЯТ-БРОЙЛЕРОВ КРОССА «КОББ-500»

Научная статья

Адельгейм Е.Е.[1,] *, Шепелев С.И.[2]
[1] ORCID: 0000-0001-8090-1252;
[2] ORCID: 0000- 0003-3759-3041,
[1, 2] Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия

* Корреспондирующий автор (rodina15[at]yandex.ru)

Аннотация

Важнейшим высокоэффективным сектором птицеводства является бройлерное производство, позволяющее получать рентабельную мясную продукцию, для производства которой требуются полнорационные комбикорма обеспеченные высокой энергетической ценностью и протеина в сыром виде. Методы исследования: наблюдение и эксперимент; анализ и синтез; опыт; сравнение; методы вариационного статистического анализа. Как показали данные эксперимента, частичная замена дорогостоящих кормов, в составе которых имеются компоненты животного происхождения - мясной и рыбной муки, соевым шротом в заключительном промежутке времени при выращивании экспериментальной группы цыплят-бройлеров кросса «Кобб-500», приводит к улучшению результативных показателей экономической эффективности производства продукции.

Ключевые слова: полнорационный комбикорм, соевый шрот, уровень протеина, цыплята-бройлеры, продуктивность.

EVALUATION OF FEED REPLACEMENT EFFICIENCY AT GROWING CROSS COBB-500 BROILERS

Research article

Adelheim E.E.[1,] *, Shepelev S.I.[2]
[1] ORCID: 0000-0001-8090-1252;
[2] ORCID: 0000- 0003-3759-3041;
[1, 2] Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

* Corresponding author (rodina15[at]yandex.ru)

Abstract

Broiler production is the most important highly efficient sector of the poultry industry, which allows to obtain cost-effective meat products, its production requires compound feed which provides high energy value and protein in its raw form. Research methods: observation and experiment; analysis and synthesis; experience; comparison; methods of variational statistical analysis. As experimental data shows, the partial replacement of compound feed, which contains components of animal origin – meat and fish meal, soybean meal in the final period of time when growing the experimental group of broilers of the Cobb-500 cross, leads to an improvement in the economic efficiency of indicators production.

Keywords: complete feed, soybean meal, protein level, broiler chickens, productivity.

Птицеводство является одной из важных составляющих, обеспечивающих продовольственную независимость страны [1, С. 329], [2, С. 72]. На эффективность развития отрасли влияют разные показатели [3, С. 85].

Безусловно, существенное влияние на результативные показатели развития отрасли оказывает качественный состав кормовой базы. Основной структурной составляющей полноценного содержания птицы являются комбинированные корма [4, С. 39].

Важное место в производстве полнорационных комбинированных кормов занимают корма, характеризующиеся высоким уровнем содержания энергии и протеина необходимого для обеспечения интенсивного роста молодняка птицы. При этом необходимо учитывать, что применение высокопитательных кормов существенным образом повышает энергетическую питательность и биологическую полноценность протеина комбинированных кормов, но в значительной степени ведет к повышению себестоимости мяса птицы, так как данные корма являются наиболее дорогими в структуре применяемых полнорационных комбинированных кормов. Таким образом, повышение уровня энергии и протеина в комбинированных кормах ведет к увеличению мясной продуктивности птицы, но в большей степени удорожает производство продукции [5, С. 10].

Поэтому исследования, направленные на изучение возможности обеспечения необходимого уровня питательных веществ за счет применения более дешевых компонентов в условиях промышленной технологии птицеводства при увеличении эффекта выращивания цыплят-бройлеров, являются актуальными и имеют большое практическое значение [6, С. 8].

Оценка эффективности замены кормов при выращивании цыплят-бройлеров проводилась с использованием следующих научных методов: наблюдение и эксперимент (изучение оптимального уровня энергии и протеина в комбикормах); анализ и синтез; опыт; сравнение; методы вариационного статистического анализа (статистическая обработка материалов с использованием приложения «MicrosoftExcel»).

Основное содержание структуры опыта и методики исследования заключается в следующем.

Экспериментальный опыт изучения влияния оптимального уровня энергетической ценности кормов и протеина в

комбинированных кормах на значение продуктивности цыплят-бройлеров осуществлялся в условиях промышленной технологии производства мяса птицы.

Научно-хозяйственный опыт ставился на группе цыплят-бройлеров, полученных из одной партии вывода кросса «Кобб-500» при условии напольного содержания птицы. Условия содержания птицы в период проведения исследований были приблизительно одинаковыми и полностью соответствовали технологическим нормативам в соответствии с руководством по содержанию и выращиванию птицы бройлеров кросса «Кобб-500» [7].

Изучению подверглась группа птицы кросса КОББ-500 в возрасте 28 дней. Количество голов на начало опыта в каждой из групп - 322200 голов.

Основные параметры и схема проведения опыта отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры и схема проведения опыта

Группы	Живая масса цыплят-бройлеров на начало опыта, г	Условия кормления
		заключительный период «Финишер» 28-38 дн
1 – контрольная	1475,6±18,42	Комбикорм ПК-6 «Финишер» Соевый шрот-20,6% Мука мясная-7,95% Мука рыбная-2,69% ОЭ-325 ккал\100г СП-19,56%
2 – опытная	1475,4±17,86	Комбикорм ПК-6 «Финишер» Соевый шрот-23,19% Мука мясная-5,95% Мука рыбная-2,00% ОЭ-327 ккал\100г СП-18,89%

Начало опыта соответствовало началу заключительного периода выращивания цыплят-бройлеров в возрасте 28 суток, окончание опыта при достижении птицей возраста 38 суток. Количество птицы на начало проведения опыта не изменялось в контрольной позиции и в опытной группе и составило 32200 голов.

В соответствии со структурной схемой осуществления опыта, контрольная и опытная группы цыплят-бройлеров в рационе получали комбинированные корма марки ПК-6-2 «Финишер» рекомендованного для кросса цыплят-бройлеров «КОББ-500». Различие в составе полнорационных комбинированных кормов между контрольной группой и опытной заключалось в различном уровне и соотношении компонентов, включенных в состав комбинированных кормов, а также в зависимости от обменной энергии и уровня сырого протеина. Методика исследования предполагала следующие условия.

За весь период проведения опыта проводился последовательный учет изменения живой массы и уровня сохранности поголовья цыплят - бройлеров. Из числа методов использовался замер живой массы.

Замер живой массы цыплят осуществлялся путем систематического взвешивания условной выборки в числе не менее 500 голов в каждом птичнике до момента кормления птицы при постановке на эксперимент, в середине и в конце исследований. Относительная прибавка роста определялась по отношению к абсолютному приросту к массе птицы на середину периода, выраженное в процентах. Уровень сохранности цыплят-бройлеров учитывали методом определения павшего молодняка и общего подсчета количества голов [8, С. 114].

Расчет потребления корма производился на 1 голову рассчитывали на основании показателей загрузки задаваемого комбинированного корма в бункера и числа голов птицы. Издержки кормов на 1 кг прироста вычисляли, используя фактические затраты комбинированных кормов при кормлении цыплят-бройлеров [9, С. 302].

Статистическая обработка экспериментальной части материалов опыта проводилась с использованием методов вариационной статистики на основании модулей приложения «Microsoft Excel». К их числу относятся методы выборочного анализа.

По общепринятой методике была рассчитана экономическая эффективность проведенных исследований.

Состав и содержание основных питательных веществ в комбикормах ПК-6 «Финишер» применяемых при выращивании цыплят-бройлеров контрольной и опытной группы в период опыта представлены в таблицах 2, 3.

Таблица 2 – Состав основных питательных веществ в комбикормах для цыплят - бройлеров контрольной и опытной группы 3 фазы выращивания ПК-6-2 «Финишер», %

Состав	1-контрольная	2-опытная
Пшеница	30,8	30,8
Кукуруза	30,0	30,0
Шрот соевый сп 44%	20,6	23,19
Мука мясная сп 56%	7,95	5,95
Мука рыбная сп 63%	2,69	2,00
Масло подсолнечное	5,0	5,1
Монохлоргидрат лизина 98%	0,11	0,11
Dl-метионин 98,5%	0,47	0,47
Ферментный препарат	0,10	0,10
Соль поваренная	0,06	0,06
Монокальцшфосфат	0,4	0,4

Окончание табл. 1 – Состав основных питательных веществ в комбикормах для цыплят - бройлеров контрольной и опытной группы 3 фазы выращивания ПК-6-2 «Финишер», %

Состав	1-контрольная	2-опытная
Известняковая мука	0,8	0,8
Сода пищевая (бикарбонат натрия)	0,02	0,02
Премикс П- 6 цыплята-броилеры в возрасте 5 нед. и старше	1,0	1,0

Структурный анализ состава комбинированных кормов для цыплят -бройлеров ПК-6-2 «Финишер» показывает, что в комбинированном корме цыплят-бройлеров опытной группы уровень обменной энергии несколько выше, чем в контрольной группе -327 Ккал\100 г, что связано с повышением содержания соевого шрота и как источника обменной энергии –подсолнечного масла.

Таблица 3 – Содержание основных питательных веществ в комбикормах для цыплят -бройлеров контрольной и опытной группы 3 фазы выращивания ПК-6-2 «Финишер»

Содержание в 100 г	Ед. изм.	1-контрольная	2-опытная	Норма
Обменная энергия птицы	Ккал/100г	325,00	327,00	325,00
Сырой протеин	%	19,56	18,89	19,00
Линолевая кислота	%	4,26	4,32	1,25
Сырая клетчатка	%	2,81	2,92	4,00*
Лизин	%	1,10	1,08	1,10
Метионин	%	0,78	0,76	0,69
Метионин+цистин	%	1,01	0,96	1,00
Лизин усвояемый птицей	%	0,96	0,94	0,96
Метионин усвояемый птицей	%	0,59	0,54	0,43
М+ц усвояемый птицей	%	0,82	0,78	0,78
Са	%	0,84	0,84	0,84
Р усвояемый	%	0,43	0,43	0,40
К	%	0,65	0,65	0,65
Na	%	0,17	0,16	0,16
Cl	%	0,15	0,15	0,15

*Примечание: * - не более*

Наряду с этим комбикорм цыплят-бройлеров опытной группы характеризуется пониженным уровнем сырого протеина 18,89%, что на 0,67% ниже, чем в контрольной группе. Снижение уровня сырого протеина произошло за счет снижения уровня содержания наиболее дорогих высокобелковых кормов – мясной и рыбной муки.

Показатели содержания других питательных веществ в комбикорме ПК-6-2 «Финишер» опытной группы цыплят-бройлеров остались практически без изменений.

Важнейшим показателем уровня кормления является сохранность поголовья птицы [10, С. 25]. Данные по сохранности цыплят-бройлеров при различном уровне обменной энергии и сырого протеина представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели сохранности цыплят-бройлеров в заключительный период выращивания (28-38 дней)

Показатели	Группа		опытная в % к контролю
	1 (контрольная группа)	2 (опытная группа)	
Количество птицы при посадке (28 дн.), голов	32200	32200	100,0
Количество при сдаче на убой (38 дн.), голов	32020	32018	99,9
Период выращивания, дни	10	10	100,0
Сохранность, %	99,44	99,43	0,01 п.п.

Как показывают данные таблицы изменение уровня энергии и протеина практически не повлияло на уровень сохранности поголовья цыплят-бройлеров, которая была достаточно высокой как в контрольной 99,44% , так и в опытной группе – 99,43%.

Наиболее важные показатели продуктивности цыплят-бройлеров приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Показатели роста цыплят-бройлеров и затраты кормов в заключительный период выращивания (28-38 дней)

Показатели	Варианты кормления		Опытная (в % к контролю)
	1 (контрольная группа)	2 (опытная группа)	
Количество при посадке, голов	32200	32200	100,0
Количество на момент сдачи на убой, голов	32020	32018	99,9
Срок выращивания, дни	10	10	100,0
Средняя живая масса в начале периода, г/гол	1475,6	1475,4	100,0
Ср.живая масса в конце периода, г/гол	2346,2	2328,5	99,2
Абсолютный прирост, г/гол	870,6	853,1	98,0
Средний прирост за сутки, г/гол	87,06	85,31	98,0
Общий прирост, кг	27876,6	27314,5	98,0
Всего затраты корма, кг	49982,77	49985,64	100,0
Затраты корма, кг/гол	1,561	1,561	100,0
Затраты корма, кг/кг прироста	1,793	1,830	102,1

Полученные в результате проведенных исследований расчетные данные позволяют сделать вывод: снижение уровня сырого протеина в комбинированном корме ПК-6-2 «Финишер» привело к снижению живой массы цыплят-бройлеров в заключительный период выращивания на 18 г\гол или на 0,8%. При этом наблюдается следующая тенденция: среднесуточный прирост цыплят – бройлеров также снизился на 1,75 г\гол и составил 85,31 г\гол. С учетом сохранности поголовья к концу периода выращивания общий прирост живой массы цыплят-бройлеров в опытной группе составил 27314 кг, при этом затраты корма на 1 кг прироста живой массы несколько повысились – на 2 % и составили 1,83 кг\кг.

Наряду с этими данными, при оценке различных методов, применяемых при выращивании птицы, важнейшим показателем является экономическая оценка эффективности применяемых технологий, которая позволяет произвести анализ и выбор наиболее выгодной технологии [11, С. 34]. Проведенная экономическая оценка эффективности выращивания цыплят-бройлеров при использовании комбинированных кормов с пониженным уровнем протеина свидетельствует о положительной разнице в пользу их использования при выращивании цыплят-бройлеров в заключительный период выращивания. Снижение уровня сырого протеина в комбикорме ПК-6-2 «Финишер» цыплят-бройлеров опытной группы произошло вследствие замены соевым шротом дорогостоящих высокобелковых кормов – мясной и рыбной муки. Вследствие такой замены стоимость 1 центнера комбикорма в опытной группе снизилась на 176 рублей и составила 2114 руб./ц.

Дальнейшие расчеты показали, что применение комбикорма ПК-6-2 «Финишер» при частичной замене кормов животного происхождения в заключительный период выращивания цыплят-бройлеров повлекло снижение стоимостных затрат на комбикорма стоимость которых за период опыта составила 1056696,43 рублей. При одинаковых прочих затратах полная себестоимость продукции в опытной группе снизилась на 87909 рублей или на 2,19%, при этом себестоимость 1 кг мяса составила 78,15 руб\кг.С учетом реализационной стоимости продукции, которая на период проведения опыта составила 103,0 руб\кг, в опытной группе цыплят было получено прибыли на сумму 1250424,37 рубля, что на 48181,65 рубля выше чем в контрольной группе.

Таким образом, уровень рентабельности производства продукции в опытной группе цыплят-бройлеров при использовании комбикорма ПК-6-2 «Финишер» с пониженным уровнем мясной и рыбной муки возрос на 1,89 п.п. и составил 31,79%.

На основании результатов проведены исследований приходим к выводу, что с целью повышения уровня рентабельности и снижения себестоимости производства продукции при выращивании цыплят-бройлеров предлагаем

в заключительный период выращивания цыплят бройлеров кросса «Кобб-500» производить частичную замену высокобелковых кормов животного происхождения на соевый шрот.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Родина Т. Е. Мировой опыт обеспечения устойчивого развития рынка продовольствия / Т. Е. Родина, С. И. Шепелев // Никоновские чтения. - 2014.- № 19. - С.329-330.

2. Родина Т. Е. Проблемы обеспечения продовольственной безопасности региона / Т. Е. Родина, С. И. Шепелев // Международный научно-исследовательский журнал. - 2014. - № 4-3 (23). - С. 72-73.

3. Родина Е. Е. Возрастные особенности желудка кур кросса Хайсекс Браун. Диссертация на соискание ученой степени кандидата ветеринарных наук / Е. Е. Родина. - Брянск, 2006. -149 с.

4. Епимахова Е. Э. Интенсивное кормление сельскохозяйственных птиц [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е. Э. Епимахова, Н. В. Самокиш, Б. Т. Абилов. - Электрон. дан. - Ставрополь: СтГАУ, 2017. - 76 с. - URL: https://e.lanbook.com/book/107180

5. Родина Е. Е. Возрастные особенности желудка кур кросса Хайсекс Браун. Автореферат канд. дис. канд. ветеринарных наук / Е. Е. Родина. - Брянск, 2006. - 24 с.

6. Шепелев С.И. Откорм индюшат на рационах с пониженным уровнем соевого шрота: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата сельскохозяйственных наук по специальности 06.02.02 – кормление сельскохозяйственных животных и технология кормов / С. И. Шепелев. - Москва, МСХА, 1994. - 16с

7. Руководство по содержанию и выращиванию бройлеров кросса «Кобб» //Cobb-Vantress Inc. PO Box 1030. Siloam Springs. 2009

8. Шепелев С. И. Эффективность применения пробиотика "Простор" при выращивании цыплят-бройлеров / С. И. Шепелев, С. Е. Яковлева // Интенсивность и конкурентоспособность отраслей животноводства Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения и 50-летию трудовой деятельности Заслуженного деятеля науки РФ, Заслуженного ученого Брянской области, Почетного профессора Брянского ГАУ, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Гамко Леонида Никифоровича. 2016. С. 112-116.

9. Родина Т. Е. Хозяйственный риск и его влияние на экономическую безопасность предприятия / Т. Е. Родина // Никоновские чтения. - 2009. -№ 14. - С. 302-303.

10. Сидорова А. Л. Современные аспекты кормления и содержания сельскохозяйственных животных и птиц [Электронный ресурс]: монография / А. Л. Сидорова. - Электрон. дан. - Красноярск: КрасГАУ, 2008. - 160 с. - URL: https://e.lanbook.com/book/90802

11. Чупина Л. В. Птицеводство. Кормление сельскохозяйственной птицы [Электронный ресурс]: учебное пособие / Л. В. Чупина, В. А. Реймер, И.Ю. Клемешова. - Электрон. дан. - Новосибирск: НГАУ, 2014. - 134 с. - URL: https://e.lanbook.com/book/63080

Список литературы на английском языке / References in English

1. Rodina T. E. Mirovoy opyt obespecheniya ustoychivogo razvitiya rynka prodovol'stviya [International Experience of Ensuring Sustainable Development of Food Market] / T. E. Rodina, S. I. Shepelev // Nikonovskiye chteniya [Nikon readings]. – 2014. – No. 19. – P.329-330. [in Russian]

2. Rodina T. E. Problemy obespecheniya prodovol'stvennoy bezopasnosti regiona [Problems of Food Security in Region] / T. E. Rodina, S. I. Shepelev // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Scientific Research Journa]l. – 2014. – No. 4-3 (23). – P. 72-73. [in Russian]

3. Rodina E. E. Vozrastnyye osobennosti zheludka kur krossa Khayseks Braun. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata veterinarnykh nauk [Age Features of Hayseks Brown Cross Chicken Stomach]. Thesis for PhD in Veterinary Medicine and Science / E. E. Rodina. – Bryansk, 2006. – 149 p. [in Russian]

4. Epimahova E. E. Intensivnoye kormleniye sel'skokhozyaystvennykh ptits [Intensive Feeding of Farm Birds [Electronic resource]: manual / E. E. Epimakhova, N. V. Samokish, B. T. Abilov – Electron. Dan. – Stavropol: SSAU, 2017. – 76 p. – Access mode: https://e.lanbook.com/book/107180 [in Russian]

5. Rodina E. E. Vozrastnyye osobennosti zheludka kur krossa Khayseks Braun [Age Features of Hayseks Brown Cross Chicken Stomach]. Abstract of PhD thesis in of Veterinary Medicine and Science / E. E. Rodina. – Bryansk, 2006. – 24 p. [in Russian]

6. Shepelev S. I. Otkorm indyushat na ratsionakh s ponizhennym urovnem soyevogo shrota [Poults Fattening with Rations with Reduced Level of Soybean Meal]: Thesis for PhD in Agriculture in the specialty 06.02.02 – feeding of farm animals and feed technology / S. I. Shepelev. – Moscow, Moscow Agricultural Academy, 1994. – 16 p. [in Russian

7. Rukovodstvo po soderzhaniyu i vyrashchivaniyu broylerov krossa «Cobb» Guide on Breeding and Cultivation of Cross "Cobb" Broilers // Cobb-Vantress Inc. PO Box 1030. Siloam Springs. 2009 [in Russian]

8. Shepelev S. I. Effektivnost' primeneniya probiotika "Prostor" pri vyrashchivanii tsyplyat-broylerov [Effectiveness of "Prostor" Probiotics in Broiler Chickens Breeding] / S. I. Shepelev, S. E. Yakovleva // Intensivnost' i konkurentosposobnost' otrasley zhivotnovodstva Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 75-letiyu so dnya rozhdeniya i 50-letiyu trudovoy deyatel'nosti Zasluzhennogo deyatelya nauki RF, Zasluzhennogo uchenogo Bryanskoy oblasti, Pochetnogo professora Bryanskogo GAU, doktora sel'skokhozyaystvennykh nauk, professora Gamko Leonida Nikiforovicha [Intensity and competitiveness of livestock industries Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 75th anniversary of the birth and 50th anniversary of labor activity Honored Scientist of the Russian Federation, Honored Scientist of the Bryansk Region, Honorary Professor of the Bryansk State Agrarian University, Doctor of Agricultural Sciences, Professor Gamko Leonid Nikiforovich]. 2016. P. 112-116. [in Russian]

9. Rodina T. E. Khozyaystvennyy risk i yego vliyaniye na ekonomicheskuyu bezopasnost' predpriyatiya [Economic Risk and Its Impact on Economic Security of Enterprise] / T. E. Rodina // Nikon readings. - 2009. – No. 14. – P. 302-303. [in Russian]

10. Sidorov A. L. Sovremennyye aspekty kormleniya i soderzhaniya sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh i ptits [Elektronnyy resurs]: monografiya [Modern Aspects of Feeding and Breeding of Farm Animals and Birds [Electronic resource]: Monograph / A. L. Sidorov. – Electron. Dan. – Krasnoyarsk: KrasGAU, 2008. – 160 p. –URL: https://e.lanbook.com/book/90802 [in Russian]

11. Chupina L. V. Ptitsevodstvo. Kormleniye sel'skokhozyaystvennoy ptitsy [Poultry Farming. Feeding of Poultry [Electronic resource]: manual / L. V. Chupina, V. A. Reimer, I. Yu. Klemeshov – Electron. Dan. – Novosibirsk: NSAU, 2014. – 134 p. – URL: https://e.lanbook.com/book/63080 [in Russian]