

№ 6 (120) ▪ 2022

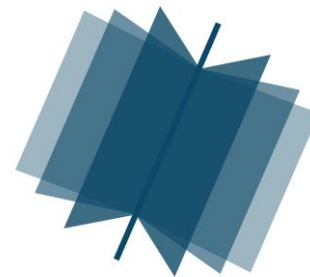
Часть 1 ▪ Июнь

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЖУРНАЛ**

INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL

ISSN 2227-6017 ONLINE

Екатеринбург
2022



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

**№ 6 (120) 2022
Часть 1
Июнь**

Дата выхода 17.06.2022
Цена: бесплатно.

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

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

Члены редколлегии:

Филологические науки:

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

Технические науки:

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

Педагогические науки:

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

Психологические науки:

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

Физико-математические науки:

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

Географические науки:

Умывакин В.М. д-р геогр. наук, к. техн. наук проф., Военный авиационный инженерный университет (Воронеж, Россия);
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);
Ларионов М.В., д-р биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия).

Архитектура:

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

Ветеринарные науки:

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

Медицинские науки:

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

Исторические науки:

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

Культурология:

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

Искусствоведение:

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

Философские науки:

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

Юридические науки:

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

Сельскохозяйственные науки:

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

Социологические науки:

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

Химические науки:

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

Науки о Земле:

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

Экономические науки:

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

Политические науки:

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

Фармацевтические науки:

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Баштовая В.А., Белов В.Д., Садиев А.А., Савченко Д.С. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА НА ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИЗГИБ	6
Бородина Е.Д., Кузнецова Е.В. УСТРОЙСТВО БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ В УСЛОВИЯХ ОРЕНБУРЖЬЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД.....	12
Vasilyev P.S., Reva L.S., Shurak A.A. ASSESSING THE IMPACT OF THE STATE OF THE HEAT-EXCHANGE SURFACE ON THE HEAT TRANSFER INTENSITY DURING DROPLET BOILING.....	18
Вдовенко А.В., Вдовенко В.А., Егоров П.И., Эунап Р.А., Кашина Ж.В. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ПРИМЕРЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОЯЩЕГОСЯ ЗДАНИЯ.....	26
Жердецккий Н.А., Гороховский А.В. ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ROCK-EVAL ДЛЯ ОЦЕНКИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИТИТАНАТОВ КАЛИЯ ПРИ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИПРОПИЛЕНА.....	32
Грушко Ю.В. ПЕРЦЕПТИВНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАТТЕРНЫ – СПОСОБ БЫСТРОГО ТРЕКИНГА ЗРАЧКА НА ОСНОВЕ ОТКЛИКА ANN-MLP ПЕРСЕПТРОНА И МОДИФИЦИРОВАННОГО ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ.....	36
Васяева Н.С., Дегаев М.Н. ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВЫХ СИСТЕМ	56
Зеньков Е.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА РЕЗИНОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ	61
Кисель Н.Н., Ковалев А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СВЧ-КАМЕРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКА	67
Коротков А.Н., Ань Чао СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ	72
Левкина И.А., Леденева Т.М. АГРЕГИРОВАНИЕ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ	78
Малахова Д.С., Лукьянов М.А., Иваев М.И. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: РОЛЬ, ЗНАЧЕНИЕ И ОПЫТ УСПЕШНОГО ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ.....	89
Медведева Г.А., Гиниятова К.Р., Миникаева К.Р. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАНАЛОВ ДЛЯ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ.....	93
Лиховидов Д.В., Скребова Е.Г., Калинин Н.С., Ильин А.Е. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАРТОВОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ САМОЛЕТОВ	102
Таваров С.Ш., Сидоров А.И., Калегина Ю.В. ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ОЦЕНКЕ ПЛАНА РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ	108
Ленковец А.С., Олешко А.Ю., Галанцев А.П., Тронза Е.И., Тюрина С.А., Юдин Г.А., Дальская Г.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ СПЛАВОВ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ НА ПРОГНОСТИЧНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ, АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ SiC ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ.....	113
Тронза Е.И., Тюрина С.А., Дальская Г.Ю., Юдин Г.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА	118
Егорова Т.Р., Кычкина В.Г., Колесов А.Е. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНОГО НЕФТЕПРОВОДА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ.....	124

Проскурин А.Ю. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....	131
Тимошкин М.С., Миронов А.Н., Леонтьев А.С. СРАВНЕНИЕ YOLO V5 И FASTER R-CNN ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИИ В ПОТОКОВОМ РЕЖИМЕ.....	137
НАУКИ О ЗЕМЛЕ / SCIENCE ABOUT THE EARTH	
Алипов Б.А., Калачев А.А., Залесов С.В. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ИСКУССТВЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ (<i>LARIX SIBIRICA LEDEB</i>) В РУДНОМ АЛТАЕ.....	147
Липина Л.Н., Жукова Н.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЛЯМИ СВОБОДНЕНСКОГО РАЙОНА АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ	152
Мищенко К.П., Тихомирова Е.А. ОЦЕНКА ПРОГНОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫТЭСНЕНИЯ НЕФТИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	158
Растанина Н.К., Хромцова Е.В., Растанин П.Л. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОГО ОЛОВОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	164
Ушакова Д.А., Скрипчинская Е.А., Хенкина Л.В., Глушко М.В. ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА (СОЦИАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ НА ТЕРРЕНКУРАХ КУОРТНОГО ПАРКА КИСЛОВОДСКА)	168
Наседкин П.О., Нежевляк О.В., Шмидт А.Г. ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ КАЗАНСКОГО СП ЛЮБИНСКОГО РАЙОНА ОМСКОЙ ОБЛАСТИ	177
Шигапов И.С., Набеева Э.Г., Мингазова Н.М., Акмалова З.Б. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАИФСКОГО УЧАСТКА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА	181

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА НА ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИЗГИБ

Научная статья

Баштова В.А.^{1,*}, Белов В.Д.², Садиев А.А.³, Савченко Д.С.⁴
^{1, 2, 3, 4} Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, Россия

* Корреспондирующий автор (bashtovaya-lera[at]mail.ru)

Аннотация

Большое количество запасов углеводородов расположено в зоне континентально шельфа Арктики. Однако многие свойства льда, который является неотъемлемой частью данных территорий остаются мало изучены. Изучению прочности и других свойств морского льда посвящены многие работы [1], [3], [5], [10].

Поиск закономерностей ледообразования и экспериментальных исследований характеристик ледового покрова – главная задача «Международной Зимней Школы», проводимой на базе Дальневосточного федерального университета. Данная работа отражает результаты исследований прочности льда на изгиб от различных факторов. В работе используются данные, собранные исследовательскими группами в 2021 году, в бухте Новик.

Ключевые слова: Арктика, шельфовые сооружения, лед, ледовая нагрузка, прочность льда на изгиб.

ICE BENDING STRENGTH STUDIES ON FLEXURAL CENTER

Research article

Bashtovaya V.A.^{1,*}, Belov V.D.², Sadiev A.A.³, Savchenko D.S.⁴
^{1, 2, 3, 4} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

* Corresponding author (bashtovaya-lera[at]mail.ru)

Abstract

Numerous hydrocarbon reserves are located in the continental Arctic shelf zone. However, many of the features of ice, which is an integral part of these territories, remain undiscovered. The durability and other properties of sea ice have been the subject of many studies [1], [3], [5], [10].

The search for the patterns of ice forming and experimental studies of its features is the main task of the «International Winter School» research, conducted on the basis of the Far Eastern Federal University. This work reflects the results of the ice bending strength study from various factors. The article uses data collected by research teams in 2021 at the Novik Bay.

Keywords: the Arctic, offshore structures, ice, ice loading, ice bending strength.

Введение

На сегодняшний момент разрабатывается большое количество новых видов топлива, но этот процесс требует больших временных и денежных ресурсов, поэтому природный газ, уголь и нефть всё ещё остаются основными источниками энергии.

Основное количество запасов углеводородов, которые предстоит освоить в 21 веке, расположено на Арктическом шельфе. Факторами, оказывающим наибольшее влияние на разработку этих месторождений, являются жесткие метеорологические условия. Одним из важнейших внешних факторов, которых необходимо учесть при проектировании, строительстве и эксплуатации ледостойких нефтегазодобывающих платформ и прочих морских сооружений, является ледовая нагрузка [8], [9]. Величина ледовой нагрузки зависит, в том числе, и от прочности льда на изгиб, так как именно в результате деформации изгиба происходит основное разрушение ледового покрова [7].

Прочность льда на изгиб определяется тремя методами:

- 1) по разрушению балок, свободно лежащих на двух опорах;
- 2) по разрушению консолей (клавишей);
- 3) по разрушению круглых плит, свободно лежащих на кольцевой опоре и нагружаемой в центре.

Во время данного исследования в лабораторных условиях был использован третий метод по определению прочности на изгиб. В исследованиях были измерены прочность при центральном изгибе образцов морского льда, собранных в бухте Новик (г. Владивосток) в феврале месяце (см. рисунок 1).

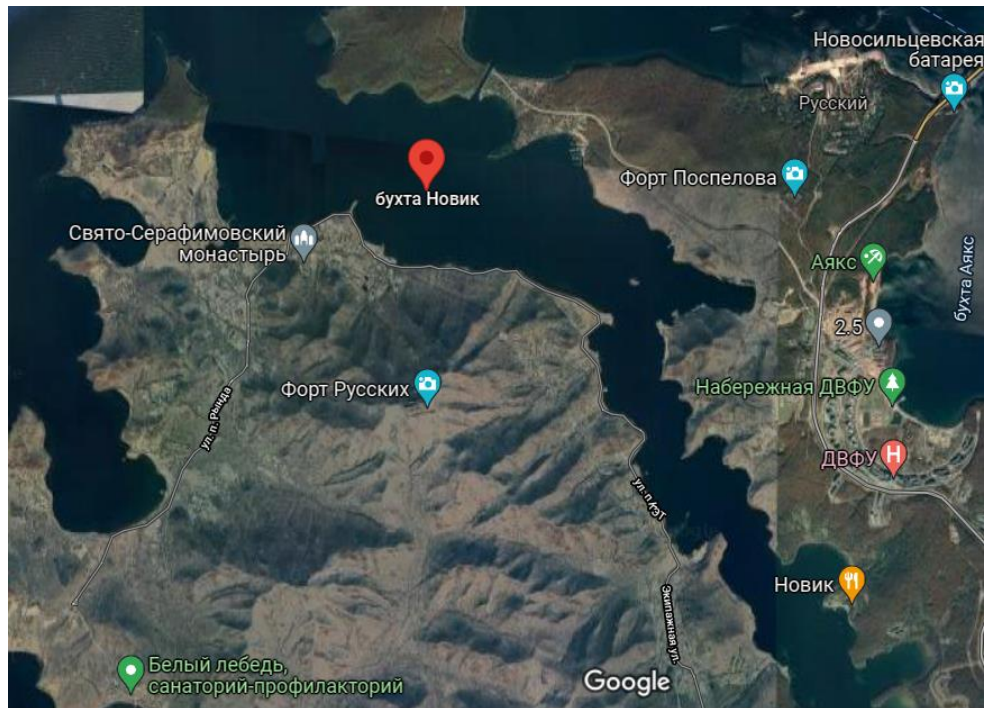


Рис. 1 – Бухта Новик

В исследовании рассмотрено влияние температуры, внешних условий формирования и скорости нагружения на характеристики сопротивления морского льда центральному изгибу, а также изменение прочности изгиба по толщине.

Ход эксперимента

Объект – лёд (керны) в бухте Новик.

Предмет – прочность льда на центральный изгиб.

С помощью керноотборника выбуривались образцы из ледяного покрова бухты Новик, диаметром, 140 мм. Полученные образцы транспортировались до места проведения испытаний в термобоксах. При подготовке кернов к испытанию, обрезалась верхняя часть, толщиной до 4 см, для удаления нежелательных включений природного происхождения. Керны распиливались на диски, толщиной 2 см.

Подготовленные диски устанавливались под пресс (Shimadzu AGS-X) и нагружались со скоростями 0,1 мм/с; 0,5 мм/с; 1 мм/с; 2 мм/с до разрушения.

В процессе эксперимента фиксировались следующие данные: разрушающая сила, температура, деформация.

Основные результаты и обсуждение

Целью эксперимента было выявление зависимости прочности льда на изгиб от следующих факторов: температура льда, толщина образцов, температуры воздуха и скорости ветра при различных скоростях нагрузки.

Для определения прочности на изгиб использовалась следующая формула:

$$\sigma_{f,p,l} = 2.08 * \frac{F_{разр}}{h_{пл}^2}$$

$\sigma_{f,p,l}$ – прочность на изгиб при центральном изгибе круговой пластины (Па);

$F_{разр}$ – разрушающая сила (Н);

$h_{пл}$ – толщина пластины (м).

На основе собранных лабораторных испытаний была проведена количественная и качественная обработка результатов. Был проведён корреляционный анализ в Excel. Для анализа прочности льда на центральный изгиб были построены зависимости прочности и температуры от его относительной толщины.

Согласно рисунку 2а наблюдается линейная зависимость между температурой и толщиной кернов при всех скоростях испытания.

Графики зависимости прочности от толщины (см. рисунок 2) имеют линейный характер, но имеются скачки (выбросы), которые могут быть обусловлены влиянием таких факторов как солёность, структура льда, погодные условия в процессе формирования ледяного покрова и т.д.

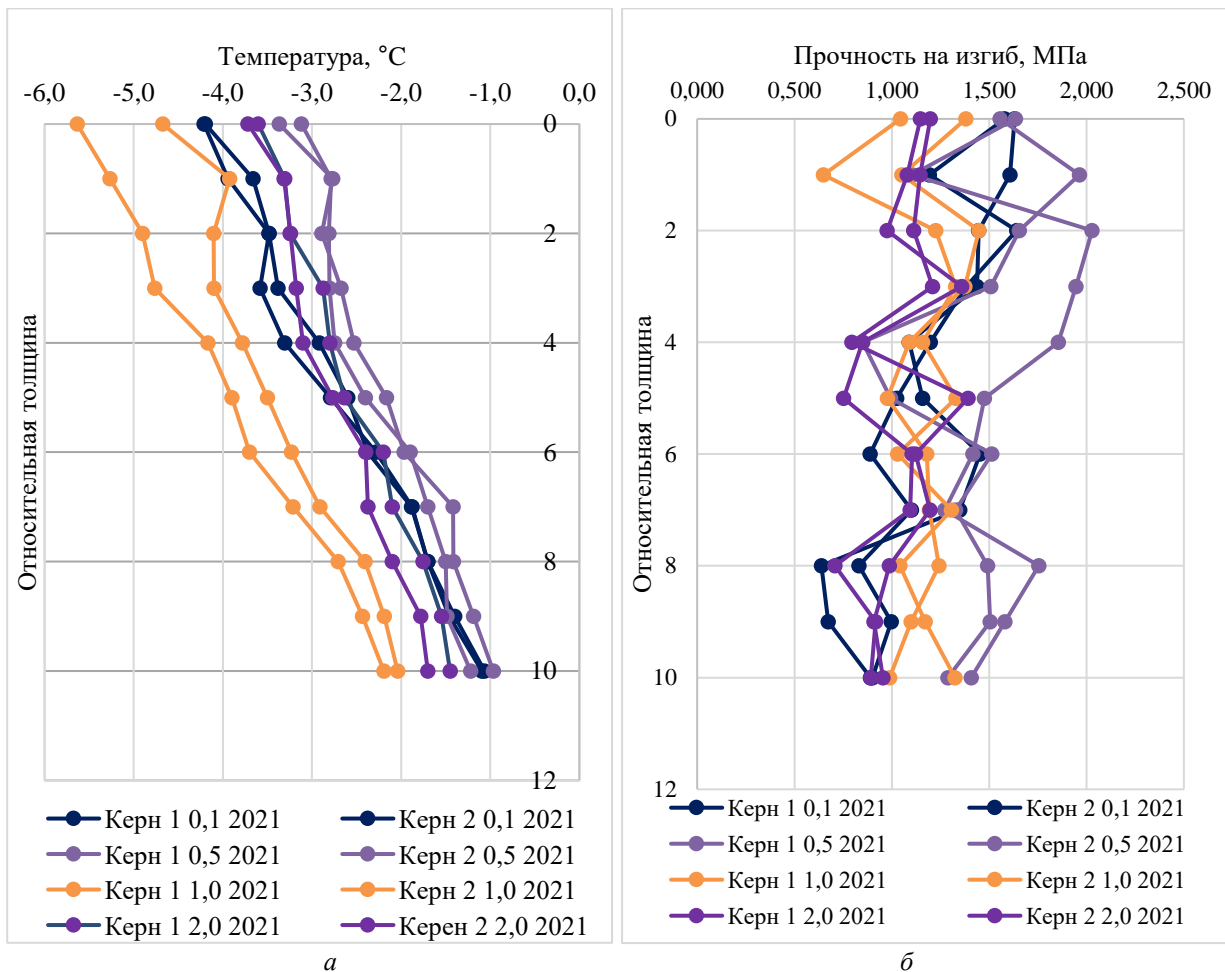


Рис. 2 – Графики зависимости прочности от толщины:
а – с подачей напряжения; б – на разных скоростях

На рисунке 3 представлены зависимости напряжения от температуры на скоростях 0,1 мм/с, 0,5 мм/с, 1 мм/с, 2 мм/с.

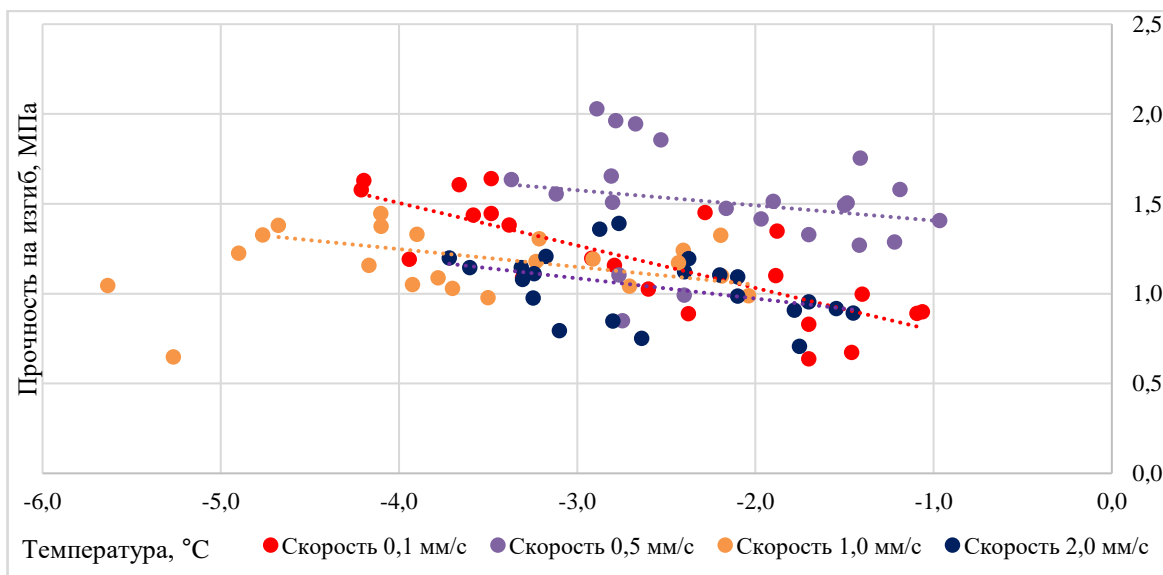


Рис. 3 – Зависимость напряжения от температуры на разных скоростях

Были получены линейные аппроксимации зависимости прочности на изгиб от температуры в кернах:

- 1) $\sigma_{f,p,l} = -0,2366t + 0,5586; R^2 = 0,6059$ – на скорости 0,1 мм/с;
- 2) $\sigma_{f,p,l} = -0,0843t + 1,3228; R^2 = 0,0403$ – на скорости 0,5 мм/с;
- 3) $\sigma_{f,p,l} = -0,0991t + 0,8516; R^2 = 0,2837$ – на скорости 1,0 мм/с;
- 4) $\sigma_{f,p,l} = -0,1127t + 0,7476; R^2 = 0,1838$ – на скорости 2,0 мм/с.

Также была проверена корреляция между напряжением и температурой в кернах. В половине кернов наблюдается довольно тесная обратная связь между прочностью и температурой керна (значения корреляции от -0,5 до -0,8), в половине связь или очень слаба, или практически отсутствует (значения корреляции от -0,1 до -0,4). В таблице 1 представлены по два керна на различных скоростях с разным значением коэффициента корреляции.

Таблица 1 – Корреляция прочности от температуры

№ п/п	Z, см	t, °C	σ, МПа	№ п/п	Z, см	t, °C	σ, МПа
2021 Скорость 0,1 мм/с							
1 керна				2 керна			
0	0,00	-4,2	1,579	0	0,00	-4,2	1,630
1	6,20	-3,9	1,193	1	6,20	-3,7	1,607
2	12,40	-3,5	1,641	2	12,40	-3,5	1,447
...
...
9	55,80	-1,4	0,997	9	55,80	-1,5	0,674
10	62,00	-1,1	0,900	10	62,00	-1,1	0,891
Корреляция:			-0,804	Корреляция:			-0,773
2021 Скорость 0,5 мм/с							
1 керна				2 керна			
0	0,00	-3,1	1,555	0	0	-3,37	1,6
1	6,15	-2,8	1,963	1	6,3	-2,77	1,1
2	12,30	-2,8	1,655	2	12,6	-2,89	2,0
...
...
9	55,35	-1,5	1,505	9	56,70	-1,2	1,581
10	61,50	-1,2	1,288	10	63,00	-1,0	1,407
Корреляция:			-0,134	Корреляция:			-0,321

Данные по внешним погодным условиям взяты с метеорологических станций. Предполагаемая толщина керна при данных погодных условиях была определена по формуле Н. Н. Зубова [1].

Были определены внешние погодные условия для всех точек кернов, проведен корреляционный расчет напряжения от внешней температуры и скорости ветра. Корреляция за 2021 год почти не наблюдается. В таблицах 2 и 3 представлены результаты корреляции прочности двух кернов от температуры воздуха и ветра за 2021 год на различных скоростях.

Таблица 2 – Корреляция прочности от температуры воздуха и ветра за 2021 г. по скорости 0,1 мм/с

№ п/п	Z, см	σ, МПа	T _{наруж} , °C	W, м/с	№ п/п	Z, см	σ, МПа	T _{наруж} , °C	W, м/с
2021 Скорость 0,1 мм/с									
1 керна					2 керна				
0	0,00	1,579	-6,24	3,4	0	0,00	1,630	-6,24	3,4
1	5,05	1,218	-3,61	4,4	1	4,80	1,273	6,07	3,4
2	7,82	1,156	-12,61	6,6	2	6,82	1,755	-10,81	6,1
...
...
26	57,3 6	0,969	-12,83	4,4	26	55,1 4	0,651	-13,93	3,5
27	62,0 0	0,900	-10,80	5,3	27	62,0 0	0,891	-10,80	5,3
Корреляция σ и T _{наруж} :				0,246	Корреляция σ и T _{наруж} :				0,145
Корреляция σ и W:				-0,165	Корреляция σ и W:				0,044

Таблица 3 – Корреляция прочности от температуры воздуха и ветра за 2021 г. по скорости 0,5 мм/с

№ п/п	Z, см	σ , МПа	T _{наруж} , °С	W, м/с	№ п/п	Z, см	σ , МПа	T _{наруж} , °С	W, м/с
2021 Скорость 0,5 мм/с									
1 керн					2 керн				
0	0,00	1,555	-6,24	3,4	0	0,00	1,635	-6,24	3,4
1	4,60	1,449	1,21	3,2	1	5,95	1,081	-8,80	5,8
2	6,75	2,163	-10,66	6,1	2	8,07	1,219	-12,84	6,8
...
...
23	52,7 0	1,598	-9,23	5,8	21	47,9 1	1,823	-5,86	6,5
24	61,5 0	1,288	-8,53	7,2	22	63,0 0	1,407	-8,10	6,3
Корреляция σ и T _{наруж} :				0,235	Корреляция σ и T _{наруж} :				0,173
Корреляция σ и W:				0,008	Корреляция σ и W:				-0,071

Заключение

В данном исследовании мы пытались выявить факторы, которые оказывают влияние на изменение прочности льда на изгиб.

Было выявлено, что прочность льда на изгиб довольно тесно зависит от толщины льда, но эта зависимость имеет переменчивый характер направленности, чего не должно быть.

Уменьшение температуры в керне влияет на прочность льда, но тесная обратная зависимость прочности от температуры была подтверждена лишь в половине случаев, что свидетельствует о наличии сторонних общих причинах, влияющих на эти показатели.

Можно заметить, что сильная обратная связь между прочностью и температурой наблюдается только при наличии тесной прямой зависимостью температуры от толщины льда и сильной обратной связи между прочностью и толщиной льда.

Зависимость прочности от внешних метеорологических факторов почти не выявилась.

Проведя анализ данных, мы получили определённые результаты, но их точность достаточно мала поскольку имелась небольшая выборка данных. Для более детального и точного анализа потребуется информация за больший промежуток времени, чтобы учесть хаотичную природу формирования ледяного покрова, и также вероятность ошибочной обработки метеорологических и изыскательных данных.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Богородский В.В. Лед: Физические свойства. Современные методы гляциологии / В.В. Богородский, В.Л. Гаврило. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. – 384 с.
2. Доронин Ю.П. Морской лед / Ю.П. Доронин, Д. Е. Хейсин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.
3. Паундер Э. Физика льда / Пер. с англ. Г.Г. Шинкар; под ред. и с послесл. Б.А. Савельева. – Москва : Мир, 1967. – 189 с.
4. Савельев Б.А. Строение и состав природных льдов : учеб. пособие / Б.А. Савельев. – Москва : Изд-во МГУ, 1980. – 280 с.
5. Цуриков В.Л. Жидкая фаза в морских льдах / В.Л. Цуриков. – Москва : Наука, 1976. – 210 с.
6. Лавров В.В. Деформация и прочность льда / Под ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Яковлева. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. – 206 с.
7. Смирнов В. Н. Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения / В.Н. Смирнов, А.И. Шушлебин, С.М. Ковалев и др. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ ААНИИ, 2011. – 179 с.
8. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) – Введ. 2019-02-17. – Москва : Кодекс.
9. Вершинин С.А. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа / С.А. Вершинин, П.А. Трусков, К.В. Кузмичев. – Москва : Институт Гипростроймост, 2005. – 208 с.
10. Assur A. Composition of sea ice and its strength / A. Assur // Arctic Sea Ice. Natl. Acad. Sci., Nat. Res. Council USA Publ. – 1958. – № 598. P. 106–138.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bogorodskij V.V. Led: Fizicheskie svojstva. Sovremennye metody gljaciologii [Ice: Physical properties. Modern methods of glaciology] / V.V. Bogorodskij, V.L. Gavrilo. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1980. – 384 p. [in Russian]
2. Doronin J.P. Morskoy led [Sea ice] / J.P. Doronin, D.E. Hejsin. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1975. – 318 p. [in Russian]
3. Paunder J. Fizika l'da [Physics of ice] / translated by Shinkar G.G.; edited by Savel'eva B.A. – Moskow : Mir, 1967. – 189 p. [in Russian]

4. Savel'ev B.A. Stroenie i sostav prirodnyh l'dov [The structure and composition of natural ice] / B.A. Savel'ev. – Moscow : publishing house MGU, 1980. – 280 p. [in Russian]
5. Curikov V.L. Zhidkaja faza v morskikh l'dah [Liquid phase in sea ice] / V.L. Curikov. – Moscow : Nauka, 1976. – 210 p. [in Russian]
6. Lavrov V.V. Deformacija i prochnost' l'da [Deformation and strength of ice] / edited by Jakovleva G.N. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1969. – 206 p. [in Russian]
7. Smirnov V.N. Metodicheskoe posobie po izucheniju fiziko-mehaničeskikh harakteristik ledjanyh obrazovanij kak ishodnyh dannyh dlja rasčeta ledovyh nagruzok na berega, dno i morskije sooruzhenija [Methodological manual for the study of the physical and mechanical characteristics of ice formations as initial data for calculating ice loads on the coast, bottom and offshore structures] / V.N. Smirnov, A.I. Shushlebin, S.M. Kovalev et al. ; edited by V.N. Smirnova. – Saint Petersburg : GNC RF AANII, 2011. – 179 p. [in Russian]
8. SP 38.13330.2018 Nagruzki i vozdejstvija na gidrotehničeskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov) [Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ships)] – Introduced 2019.02.17. – Moscow : Kodeks. [in Russian]
9. Vershinin S.A. Vozdejstvie l'da na sooruzhenija Sahalinskogo shel'fa [The impact of ice on the structures of the Sakhalin shelf] / S.A. Vershinin, P.A. Truskov, K.V. Kuzmichev. – Moscow : Institut Giprostrojmost, 2005. – 208 p. [in Russian]
11. Assur A. Composition of sea ice and its strength / A. Assur // Arctic Sea Ice. Natl. Acad. Sci., Nat. Res. Council USA Publ. – 1958. – № 598. P. 106–138.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.003>

УСТРОЙСТВО БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ В УСЛОВИЯХ ОРЕНБУРЖЬЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Научная статья

Бородина Е.Д.^{1,*}, Кузнецова Е.В.²

¹ ORCID: 0000-0001-5283-2149;

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

* Корреспондирующий автор (borodina-ed[at]mail.ru)

Аннотация

В данной работе представлены технологические особенности выполнения буронабивных работ в холодное время года, используемые в условиях Оренбургской области. При помощи практических сведений, в которые входит информация о создании комплекса исходного нагревания бетона, выполнен сравнительный анализ стоимости сырья, применяемого при буронабивных работах и создана методика, при помощи которой возможно крупномасштабное строительство со значительным снижением удельных расходов для фирм, ведущих производственную деятельность в холодное время года с применением буронабивных технологий. Расчёты суммарных затрат на материалы, показали, что приведённые суммарные затраты на выполнение буронабивных работ на 2,5 % ниже, суммарных затрат на материалы при выполнении работ при помощи холодной укладки бетона. При серийных буронабивных работах в холодное время года в Оренбурге, наилучшим вариантом считается применение на стройке поста предварительного нагревания бетона.

Ключевые слова: оптимизация, буронабивные сваи, бетонная смесь, предварительный разогрев, зимнее бетонирование, свайные фундаменты.

BORED PILES STRUCTURE IN THE ORENBURG REGION IN WINTER

Research article

Borodina E.D.^{1,*}, Kuznecova E.V.²

¹ ORCID: 0000-0001-5283-2149;

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

* Corresponding author (borodina-ed[at]mail.ru)

Abstract

The work presents the technological specifics of bore piling operations in the cold season in the Orenburg region. With the help of practical knowledge, which includes information on the creation of an initial concrete heating complex, a comparative analysis of the cost of raw materials used in bore piling operations was carried out, and a method was created, with the help of which large-scale construction is possible with a significant expense reduction for firms conducting bore piling operations in the cold season. Calculations of the sum spent on the materials in total showed that the total cost of the bore piling operations is 2.5% lower than that of the materials when conducting the work with the help of cold application of concrete. In case of multiple bore piling operations in the cold season in Orenburg, the best option is considered to be the use of a concrete preheating station at the construction site.

Keywords: optimization, bore piling operations; concrete blend, preheating, cold water concreting, pile foundation.

Введение

В данной работе проведен анализ себестоимости технологии буронабивных свайных фундаментов, по результатам расчетов определен оптимальный вариант. Представлены технологические особенности выполнения буронабивных работ в холодное время года, используемые в условиях Оренбургской области, исходя из изученной литературы [1], [2], [3].

Целью исследования было выбрать оптимальный вариант фундаментов глубокого заложения, на основании расчётов суммарных затрат на материалы, которые показали, что приведённые суммарные затраты на выполнение буронабивных работ на 2,5 % ниже, суммарных затрат на материалы при выполнении работ при помощи холодной укладки бетона. При серийных буронабивных работах в холодное время года в Оренбурге, наилучшим вариантом считается применение на стройке поста предварительного нагревания бетона.

При помощи практических сведений, в которые входит информация о создании комплекса исходного нагревания бетона, выполнен сравнительный анализ стоимости сырья, применяемого при буронабивных работах и создана методика, при помощи которой возможно крупномасштабное строительство со значительным снижением удельных расходов для фирм, ведущих производственную деятельность в холодное время года с применением буронабивных технологий. В работе использованы материалы статей научных журналов по данной теме, а также информация от предприятий Оренбуржья размещенная на их официальных сайтах.

В последние годы технология буронабивных свайных фундаментов получила широкое применение благодаря следующим достоинствам:

- повышаются нагрузочные возможности фундамента, его осадка становится более равномерной;
- снижаются объёмы выбранной земли под устройство фундаментов и количество бетона;
- имеются возможности опирания на малоподвижную почву, которая залегает на большой глубине;
- возможно применение свай большего сечения;
- строительство ведётся вне зависимости от погоды;
- снижаются затраты на строительную технику;
- строительство ведётся без шума и вибрации от забивания свай, что снижает вред для жителей близлежащих домов и для самих зданий.

Буронабивные сваи применяются на всех почвах, за исключением скальных и крупнообломочных. Технологический процесс изготовления данных свай должен соответствовать требованиям СП 50-102-2003.

Исходя из местных геодезических характеристик в районе монтажа данных конструкций используется 3 метода.

Сухой метод. Используется в твёрдых глинистых почвах, если не применяют усиление скважинных поверхностей. Скважины с требуемыми размерами выполняются с применением шнеков или буров. В некоторых случаях в нижних частях скважин с применением специального оборудования выполняется их разбуривание. Последующее бетонирование проводится с применением опалубки из бетонных труб, которую убирают по мере бетонной заливки. По окончании данного процесса создаётся скелет, который в зимний период следует укрывать теплоизоляцией. Подобным образом монтируют сваи длиной до 30 м и сечением до 1.2 м. Этот метод нельзя применять при наличии агрессивных влажных сред.

Применение глинистых растворов. Данный метод используется при наличии очень влажной почвы. Он базируется на формировании гидравлического напора глинистых растворов $\gamma = 1200 \text{ кг/м}^3$, что даёт возможность исключить применение опалубки. Их приготавливают на рабочей площадке из бентонитовой глины и при помощи специальных штанг закачивают в скважины. Его направляют по стенам в верхнюю зону и через зумпф при помощи перекачивающего устройства подают в буровые штанги, создавая, таким образом, круговое движение. После в скважинах монтируют каркасы из арматуры для наполнения бетоном. В процессе его подачи из скважины плавно выдавливается глинистый раствор и достаётся бетонная труба.

Применение обсадных труб. Данный метод применяется при всех геодезических характеристиках почвы. В скважины обсадные трубы помещают за счёт гидравлических домкратов, при помощи забивания труб или вибрационного погружения, и соединяют друг с другом при помощи сварки либо спец замков. Скважины выполняют при помощи ударного либо вращательного бурения. В целях расширения скважины в основании возможно применение направленных взрывов. В данных целях обсадные трубы подают к низу, не доставая до дна 1,4 м. В нижней части выполняют закладку зарядов соответствующей взрывной способности и с верхней зоны подают бетон. После подрыва создаётся сфера, быстро заполняющаяся бетонной смесью. Направленный в скважину каркас заливается бетоном с использованием трубы, которая передвигается в вертикальном направлении. За счёт специальных домкратов обсадные трубы вращаются, что существенно повышает плотность бетона.

Изучим параметры, от которых зависит себестоимость строительных работ: максимальное расстояние, на которое промерзает в холодное время года, размеры свай, стоимость сырья для их производства [1, С. 3].

Вычисление себестоимости изготовления единицы материала для производства буронабивных работ производится следующим образом:

$$P_c = V_c * P_m + P_n \quad (1)$$

где P_c – себестоимость изготовления каждой сваи, руб.;

V_c – суммарный объём бетона, м^3 ;

P_m – себестоимость бетона, руб.;

P_n – себестоимость строительной операции, руб.

В данном случае себестоимость выполнения буронабивных работ вычисляется следующим образом:

$$P_n = P_a + P_k \quad (2)$$

где P_a – арендная плата за использование строительных машин, руб.;

P_k – оплата труда монтажников, руб.

В случае выполнения строительных операций в любое время года арендная плата за технику, а также оплата труда монтажников и себестоимость металла для производства свай считается постоянной. По этой причине выполним анализ себестоимости изготовления бетона в холодное и тёплое время года. Главной характеристикой себестоимости бетона в зимнее время считается добавка в исходные материалы антизамерзающих компонентов.

В таблице 1 приведена себестоимость изготовления бетона с добавкой антизамерзающих компонентов и без них, для условий применения бетонов типа В15.

Таблица 1 – Себестоимость изготовления бетона в холодное и тёплое время года

№ п.п.	Изготовитель бетона	Марка бетона	Стоимость, руб./ м^3		Увеличение себестоимости, %
			Тёплое время года	Холодное время года (с применением антизамерзающих компонентов)	
1	ЗАО «Новые технологии»	В15	3094	3314	7,1
2	ЗАО «Оренбургбетон»	В15	2950	3050	3,4
3	ЗАО «Бетон-56»	В15	2440	2580	5,7

Согласно информации, которая имеется в таблице 1, имеется возможность вычислить средневзвешенное увеличение себестоимости изготовления бетона в тёплое и холодное время года Q_{cp} следующим образом:

$$Q_{cp} = (Q_1 + Q_2 + Q_3) / n \quad (3)$$

где Q_1 , Q_2 и Q_3 – увеличение себестоимости изготовления бетона у 1-го, 2-го и 3-го производителя соответственно; n – число производителей.

По результатам вычислений при помощи формулы (3), которые имеются в таблице 1, установлено, что средневзвешенное увеличение себестоимости изготовления бетона в холодное время года на 5.4 % выше, относительно изготовления в тёплое время года.

Согласно информации, полученной при помощи сравнительного анализа себестоимости буронабивных работ при возведении ТЦ «Континент», размещённого в: г. Оренбург, ул. Ветеранов труда, д. 16/3, выполнены соответствующие изыскания.

В ходе вышеуказанного строительства монтировался буронабивной фундамент по лицензии DDS для 2-х идентичных зданий по типовому проекту монтажа свай. Расстояние, на которое заглублены эти конструкции ($D_y = 0.52$ м) составляет $L = 25$ м. Число смонтированных конструкций $N = 208$ шт. во всех зданиях. Для производства строительных работ применялось следующее оборудование: бурильный комплекс Bauer BG36, насос для подачи бетона БН-60, передвижной подъёмник МКГ-16М, бетономешалка СБ-92-1 и передвижной генератор мощностью 100 кВт АД-100-Т400. В ходе выполнения монтажа свай на каждом участке работало одинаковое число строителей. Погодный режим был следующим $t = -5 \dots -10$ °С, скорость ветра и влажность – умеренные. Расстояние, на которое промерзает грунт Оренбурге составляет $h_{cp} = 1.5$ м, поверхностный модуль $M_n = 4.22$ м⁻¹ [2, С. 28].

Серийный монтаж строительных конструкций на первом участке выполнялся при помощи холодной технологии на основе бетона с антизамерзающими компонентами. При производстве бетона в заводских условиях придерживаются оптимальной концентрации антизамерзающих компонентов, рассчитанной на основании лабораторных экспериментов на предприятии.

Во время серийного монтажа строительных конструкций, изготовленных из бетона с антизамерзающими компонентами, суммарную себестоимость исходного сырья определяют следующим образом:

$$P_1 = P_{c1} * N_c \quad (4)$$

где P_1 – суммарная себестоимость исходного сырья для свай с антизамерзающими компонентами;

P_{c1} – себестоимость исходного сырья для каждой сваи с антизамерзающими компонентами;

N_c – суммарное число свай.

На 2-м участке создана технология, где применяется бетон, произведённый в заводских условиях с соблюдением норм сохранности степени текучести подогретого бетона на время, необходимое для закачки в заранее подготовленную зону, грелся до требуемого значения на месте производства работ. Водоцементный коэффициент устанавливается на основании исходной текучести бетона и располагается в диапазоне от 0,19 м до 0,21 м осадения типового конуса. В данном случае поверхностный модуль $M_n < 5$ м⁻¹, т. к. при указанном значении затвердевание бетона в скважине происходит за большее время, что положительно сказывается на прочностных характеристиках конструкции.

При выполнении монтажа в подобной ситуации создана технология предварительного нагревания бетона в рабочем пространстве насоса. Главными составляющими комплекса считаются: фундамент для нагревателя с электротрансформатором ТСДЗ-40М. На ригелях (4) смонтирована система предварительного нагревания бетона (3). К выгрузной эстакаде (1) подъезжают бетономешалки (2) и производится выгрузка бетона. С другой стороны, при помощи насоса, бетон перекачивают в предварительно подготовленное пространство [3, С. 34].

Суммарная себестоимость изготовления поста предварительного нагревания приведена в таблице 2.

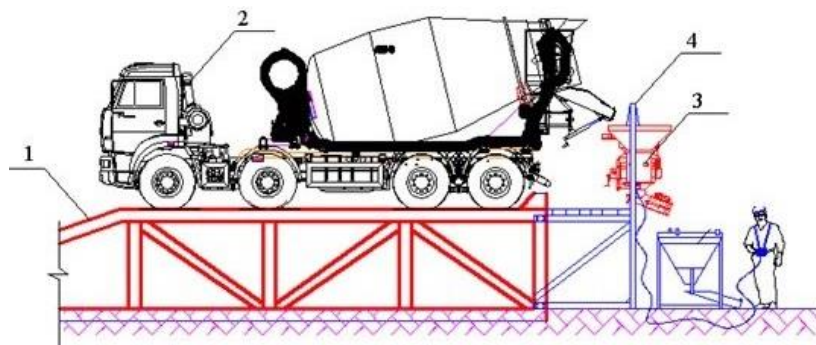


Рис. 1 – Устройство пункта предварительного нагревания бетона:

1 – выгрузная эстакада; 2 – бетономешалка;

3 – установка предварительного нагревания бетона; 4 – ригельная конструкция

Таблица 2 – Расчёт стоимости изготовления поста предварительного нагревания бетона

№ п.п.	Наименование	Ед. изм.	Стоимость, руб.	Суммарный объём	Суммарная цена, руб.
1	Уголок равнополочный 125x125x12 мм	мп	852,6	148,0	126187,8
2	Лист 4x1500x3000 мм	шт.	9387,9	12,0	112654,2
3	Электротрансформатор для нагревания бетона ТСДЗ-40М	шт.	67000,0	1,0	67000,0
4	Зарплата рабочих	р/час	100,0	672,0	67200,0
5	Цена электроэнергии	р/Квт·ч	2,5	83904,0	209760,0
Итого					582802,0

При серийном монтаже строительных конструкций, произведённых с предварительным нагреванием бетона, суммарная цена исходных материалов определяется следующим образом:

$$P_2 = P_{c2} * N_c + P_{ев} \quad (5)$$

где P_2 – суммарная цена исходных материалов свай, руб.;

P_{c2} – цена материалов для каждой конструкции без введения антизамерзающих компонентов, руб.;

N_c – суммарное число свайных конструкций, шт.;

$P_{ев}$ – себестоимость устройства и эксплуатации поста предварительного нагревания бетона, руб.

Себестоимость устройства и эксплуатации поста предварительного нагревания бетона определяется следующим образом:

$$P_{ев} = P_r + P_w + P_e \quad (6)$$

где P_r – суммарная цена материалов, которые требуются для устройства поста предварительного нагревания бетона, руб.;

P_w – зарплата машиниста пункта предварительного нагревания бетона, руб.;

P_e – суммарная цена электроэнергии, руб.

Затраты на электроэнергию P_e определяются исходя из установленной мощности оборудования поста предварительного нагревания бетона. Количество энергии для нагревания 1 м³ бетона на цементе марки М400 при температуре окружающей среды $t = -10$ °С и поверхностном модуле $M < 6$ составляет $q = 76$ кВт*ч. Количество бетона, которое следует предварительно нагреть, определяется следующим образом:

$$V_a = V_{c1} * N_c \quad (7)$$

где V_{c1} – объём каждой конструкции, м³;

N_c – число конструкций, м³.

$$V_a = 3.14 * 0.26^2 * 25 * 208 = 1104 \text{ м}^3.$$

Суммарный расход электричества, который требуется для нагревания бетона, определяется следующим образом:

$$Q_a = V_a * q = 1104 * 76 = 83904 \text{ кВт*ч} \quad (8)$$

Усреднённый тариф за 1 кВт*ч в Оренбурге – 2,5 руб., следовательно, суммарные затраты электроэнергии составляют:

$$P_e = 2.5 * 83904 = 209706 \text{ руб.}$$

Результаты

Результаты сравнительного анализа суммарных затрат при выполнении буронабивных работ с добавкой антизамерзающих компонентов и с применением постов предварительного нагревания бетона приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ затрат на материалы для исследуемых методов выполнения буронабивных работ в г. Оренбург

Способ производства работ	Общее число свай, шт.	Объём каждой конструкции, м ³	Себестоимость бетона, р/м ³	Себестоимость поста предварительного нагревания бетона, руб.	Суммарные затраты на материалы, руб.
С добавкой антизамерзающих компонентов	208	20	3314	-	13798303
С применением поста предварительного нагревания бетона	208	30	3094	582802	13465104

По результатам расчётов суммарных затрат на материалы, которые приведены в таблице 3 можно прийти к выводу, что приведённые суммарные затраты на выполнение буронабивных работ на 2,5 % ниже, суммарных затрат на материалы при выполнении работ при помощи холодной укладке бетона.

Заключение

В ходе сравнительного анализа затрат на материалы для серийного выполнения буронабивных работ в холодное время года установлено:

- В случае применения антизамерзающих компонентов в холодное время года относительно тёплого периода суммарные затраты увеличиваются на 5.4 %.

• В целях понижения суммарных затрат на выполнение буронабивных работ, при серийных буронабивных работах в холодное время года в Оренбурге, наилучшим вариантом считается применение на стройке поста предварительного нагревания бетона, о котором говорится в настоящей работе. Этот способ производства работ даст возможности строительным фирмам, снизить финансовые расходы на выполнение буронабивных работ примерно на 2.5 %.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Андриевский С.Н. Совершенствование технологии зимнего бетонирования конструктивных элементов монолитных каркасов здания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Андриевский – Новосибирск, 2019. – 163 с.
2. Иванов К.Ю. Оптимизация производства работ при устройстве буронабивных свай в зимний период строительства в Оренбурге / К.Ю. Иванов // Молодой ученый. – 2015. – № 24(104). – С. 134 – 138.
3. Сбитнев А.В. Несущая способность свай, выполненных по технологии вытеснения в слабых грунтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Сбитнев – Санкт-Петербург, 2019 – 121 с.
4. СП 50-102-2003. Свод правил. Проектирование и устройство свайных фундаментов – Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85: введен 21.06.2003. – Минстрой России, 2012 – 87 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294844/4294844883.pdf> – 05.04.2022. (дата обращения: 12.02.2022)
5. СП 24.13330.2011. Свод правил. Свайные фундаменты. – Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85: введен 20.05.2011. – Минстрой России, 2016 – 112 с. [Электронный ресурс] URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293811/4293811646.pdf> – 05.04.2022. (дата обращения: 12.02.2022)
6. СП 63.13330.2012. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003: введен 01.01.2013. – Минстрой России, 2015 – 168 с. [Электронный ресурс] URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801835.pdf> – 05.04.2022. (дата обращения: 12.02.2022)
7. Кузнецова Е.В. Анализ методов зимнего бетонирования монолитных конструкций / Е.В. Кузнецова, Е.О. Скворцова // Междисциплинарные исследования. Современное состояние и перспективы развития: материалы XXIV Междунар. студен. науч.-практ. конф. / отв. ред. С.В. Кусов. – Екатеринбург : ИМПРУВ, 2018. – С. 10–25.
8. Проектирование свайных фундаментов с использованием набивных свай: [методические указания для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлению 08.03.01 Строительство] / сост. Д.А. Украинченко – Оренбург : ОГУ, 2021. – 16 с.
9. Разработка свайных фундаментов с использованием буронабивных свай: [методические указания для обучающихся по программам высшего образования по направлению 08.03.01 Строительство] / сост. Д.А. Украинченко. – Оренбург : ОГУ, 2021. – 26 с.
10. Гарипов В.С. Обзор особенностей производства бетонных работ в зимнее время / В.С. Гарипов, М.А. Панагасов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф. (с междунар. участием) / Оренбург : ОГУ, 2020. – С. 67–71.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Andrievskij S.N. Sovershenstvovanie tehnologii zimnego betonirovaniya konstruktivnyh jelementov monolitnyh karkasov zdaniya [Improving the technology of winter concreting of structural elements of monolithic building frames]: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences / S.N. Andrievskij – Novosibirsk, 2019. – 163 p. [in Russian]
2. Ivanov K.J. Optimizacija proizvodstva rabot pri ustrojstve buronabivnyh svaj v zimnij period stroitel'stva v Orenburge [Optimization of the production of works during the installation of bored piles during the winter construction period in Orenburg] / K.Ju. Ivanov // Molodoj uchenyj. – 2015. – № 24(104). – P. 134–138. [in Russian]
3. Sbitnev A.V. Nesushhaja sposobnost' svaj, vypolnennyh po tehnologii vytesnenija v slabyh gruntah [Bearing capacity of piles made using displacement technology in weak soils]: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences / A.V. Sbitnev – Sankt-Peterburg, 2019 – 121 p. [in Russian]
4. SP 50-102-2003. Svod pravil. Proektirovanie i ustrojstvo svajnyh fundamentov – Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.02.03-85 [SP 50-102-2003. A set of rules. Design and installation of pile foundations – Updated version of SNiP 2.02.03-85]: introduced 21.06.2003. – Ministry of Construction of Russia, 2012 – 87 p. [Electronic resource]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294844/4294844883.pdf> – 05.04.2022. (accessed: 12.02.2022) [in Russian]
5. SP 24.13330.2011. Svod pravil. Svajnye fundamenty. – Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.02.03-85 [SP 24.13330.2011. A set of rules. Pile foundations. – Updated version of SNiP 2.02.03-85]: introduced 20.05.2011. – Ministry of Construction of Russia, 2016 – 112 p. [Electronic resource]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293811/4293811646.pdf> – 05.04.2022. (accessed: 12.02.2022) [in Russian]
6. SP 63.13330.2012. Svod pravil. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija. – Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-01-2003 [SP 63.13330.2012. A set of rules. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. – Updated version of SNiP 52-01-2003]: introduced 01.01.2013. – Ministry of Construction of Russia, 2015 – 168 p. [Electronic resource]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801835.pdf> – 05.04.2022. (accessed: 12.02.2022) [in Russian]
7. Kuznecova E.V. Analiz metodov zimnego betonirovaniya monolitnyh konstrukcij [Analysis of methods of winter concreting of monolithic structures] / E.V. Kuznecova, E.O. Skvorcova // Mezhdisciplinarnye issledovaniya. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija: materialy XXIV Mezhdunar. studen. nauch.-prakt. konf. [Interdisciplinary research. The current state and prospects of development: materials of the XXIV International Student. scientific and practical conference] / edited by S.V. Kusov. – Ekaterinburg : IMPRUV, 2018. – P. 10–25. [in Russian]
8. Proektirovanie svajnyh fundamentov s ispol'zovaniem nabivnyh svaj: [metodicheskie ukazaniya dlja obuchajushhihsja po obrazovatel'nym programmam vysshego obrazovanija po napravleniju 08.03.01 Stroitel'stvo] [Design of pile foundations using

stuffed piles: methodological guidelines for students of educational programs of higher education in the direction of 08.03.01 Construction] / compiled by D.A. Ukrainchenko – Orenburg : OGU, 2021. – 16 p. [in Russian]

9. Razrabotka svajnyh fundamentov s ispol'zovaniem buronabivnyh svaj: [metodicheskie ukazaniya dlja obuchajushhihsja po programmam vysshego obrazovanija po napravleniju 08.03.01 Stroitel'stvo] [Development of pile foundations using bored piles: methodological guidelines for students of higher education programs in the direction of 08.03.01 Construction] / compiled by D.A. Ukrainchenko. – Orenburg : OGU, 2021. – 26 p. [in Russian]

10. Garipov V.S. Obzor osobennostej proizvodstva betonnyh rabot v zimnee vremja [Overview of the features of the production of concrete works in winter] / V.S. Garipov, M.A. Panagasov // Universitetskij kompleks kak regional'nyj centr obrazovanija, nauki i kul'tury: materialy Vseros. nauch.-metod. konf. (s mezhdunar. uchastiem) [University complex as a regional center of education, science and culture: materials of the All-Russian Scientific method. conf. (with the international participation)] / Orenburg : OGU, 2020. – P. 67–71. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.004>**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КАПЕЛЬНОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ**

Научная статья

Васильев П.С.^{1,*}, Рева Л.С.², Шурак А.А.³¹ORCID: 0000-0003-0262-686X;^{1, 2, 3} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

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

Аннотация

Обоснована актуальность разработки новых способов промышленной реализации процесса кипения как эффективного метода отвода теплоты. Показано, что капельное кипение – значительно более эффективный процесс, не сопровождающийся при этом нежелательными технологическими последствиями. Установлено, что на интенсивность теплоотдачи при капельном кипении жидкости значительно влияет состояние теплообменной поверхности, и поставлена задача количественной оценки этого влияния. Представлено подробное описание экспериментальной установки для исследования процесса капельного кипения, приведено уравнение для определения его коэффициента теплоотдачи и основные результаты корреляционного и регрессионного анализа полученных экспериментальных данных. Изложена основная идея и последовательность реализации метода количественной оценки физико-химических свойств теплообменной поверхности, приведены примеры и проанализированы полученные результаты. Предложены аналитические зависимости для определения относительной опорной длины профиля теплообменной поверхности. Сделаны выводы, подтверждающие научную и практическую значимость разработанного на основе положений математической статистики метода для инженерного проектирования высокоэффективных аппаратов, работающих по технологии капельного кипения.

Ключевые слова: капельное кипение, теплоотдача, теплообменная поверхность, шероховатость, степень смачивания, статистический анализ.

**ASSESSING THE IMPACT OF THE STATE OF THE HEAT-EXCHANGE SURFACE
ON THE HEAT TRANSFER INTENSITY DURING DROPLET BOILING**

Research article

Vasilyev P.S.^{1,*}, Reva L.S.², Shurak A.A.³¹ORCID: 0000-0003-0262-686X;^{1, 2, 3} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

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

Abstract

This article justifies the relevance of the development of new methods for the industrial implementation of boiling as an effective heat removal method. The authors show that droplet boiling is a much more efficient process, which is not accompanied by undesirable technological consequences. It has been established that the heat transfer intensity during droplet boiling is significantly affected by the state of the heat-exchange surface, and the authors aim to quantify this effect. The article presents a detailed description of the experimental setup for the study of droplet boiling, as well as the equation for the determination of its heat transfer coefficient, and the main results of the correlation and regression analyses of the obtained experimental data. The authors outline the main idea and the implementation sequence of the quantitative assessment method for the physical and chemical properties of the heat-exchange surface, provide examples, and analyze the results. The article presents some analytical dependencies to determine the relative support length of the heat exchange surface profile. Conclusions are drawn confirming the scientific and practical significance of the method developed based on the mathematical statistics methods for the engineering design of high-efficiency devices operating based on the droplet boiling technology.

Keywords: droplet boiling, heat transfer, heat exchange surface, roughness, degree of wetting, statistical analysis.

Introduction

Boiling is a highly efficient heat removal method. The key advantage of using boiling is that it can remove greater heat currents from the heat-exchange surface without increasing its temperature and assuring a high power rating of the processing equipment. This process is used in many evaporation and rectification plants in the chemical, oil refining, heat and power, and other industries when generating steam in boilers at power plants and in many other modern devices.

For instance, volumetric water boiling features the following maximum values of the key process parameters: a 20–30 °C temperature drop, a 12–13 kW/(m²·°C) heat transfer coefficient, and a 0.7–0.8 MW/m² heat current [1].

The boiling of liquid in a volume restricted by the walls of the vessel is associated with such unwanted effects as the rapid drop of the heat transfer coefficient, heat-exchange surface overheating, and steam explosion [2].

Since the intensity of heat transfer during boiling determines the performance, dimensions, and price of processing equipment, the development of new and efficient implementation technologies for it is a relevant problem.

Droplet boiling stands for the evaporation during the boiling of a liquid fed on the heat-exchange surface regularly as droplets. It is one of the most efficient modern ways of increasing the intensity of heat transfer.

Even though this physical phenomenon has been under analysis for a long time [3], [4], [5] multiple research works by various authors [6], [10], [18], [23] practically do not cover the intensity of heat transfer during the droplet boiling of a liquid, the data on which are only provided in singular sources [9], [10], [11], [23].

The droplet boiling of water features the following maximum values of the key process parameters: a 140–160 °C temperature drop, a 90–100 kW/(m²·°C) heat transfer coefficient, and a 10–12 MW/m² heat current [9], [10], [23].

This process lacks the unwanted effects typical of the volumetric boiling restricted by the walls of the vessel. Besides, droplet boiling almost completely lacks heat retention as boiling stops almost immediately when the feeding of the droplets of evaporated liquid to the processing apparatus stops due to the short evaporation times [11], [23].

Experimental research [21], [22], [23] produced equations to determine the droplet evaporation time on the heat-exchange surface, the contact patch diameter of the boiling droplet and the heat-exchange surface, the heat transfer coefficient, and the temperature at which the droplet begins to shift into the spheroidal state, which was used to integrate the erratic experimental data from different authors.

These situations allow us to view droplet boiling as an efficient processing technology.

However, to design the hardware for the industrial implementation of the droplet boiling technology, it is necessary to provide recommendations to account for the impact of the heat-exchange surface state on the heat transfer intensity.

In [7], [15], [19], [23] the authors demonstrate that the values of the key parameters of droplet boiling are determined by the heat-exchange surface material, its treatment grade, i.e. Roughness, and the degree of wetting with the liquid in question. The same is true for the nanostructured surfaces, where process parameters depend heavily on their state [16], [17].

In [18], the authors note that the use of porous heat-exchange surfaces allows increasing the temperature at which droplets shift to the spheroidal state by 1.5–2.5 times.

Thus, any heat-exchange surfaces feature uneven distribution (anisotropy) of their physical and chemical properties, namely roughness and degree of wetting, which has to be accounted for to assess the intensity of the heat transfer adequately when designing the hardware employing the droplet boiling technology.

Due to this, the development of the quantification method for the anisotropy of the physical and chemical properties of the heat-exchange surface is the goal of this work.

The experimental setup for the studying of droplet boiling

To study the heat transfer intensity during droplet boiling, we developed and manufactured an experimental setup comprised of the experimental device with a 550×82×8 mm carbon steel heat-exchange surface. This plate did not receive any extra treatment and had the same roughness as a rolled sheet.

The temperature of the plate was measured using the caulked-in chromel-copel thermocouples, the one on the outer surface and one on the inner surface, whose EMF was measured accurate to a tenth of a millivolt with high-precision digital millivoltmeters. The plate temperature was also measured using an infrared thermometer/pyrometer for non-contact measurements. A set of metering devices including thermocouples, high-precision millivoltmeters, and a pyrometer allows for reliable monitoring of the heat-exchange surface temperature of the experimental device for various measurement ranges.

An electric-heater coil was installed inside the thermally insulated case of the experimental device. It was powered from the alternating current mains via the laboratory autotransformer. The amount of heat generated by the electric heater, i.e. its output, was monitored using a digital electronic voltmeter and amperemeter. To feed the liquid to the heat-exchange surface in the form of separate droplets, the experimental setup used a drip feeder with exchangeable calibrated nozzles.

All the high-speed experiments were recorded on a high-speed camera with the maximum framing rate of 5000 fps connected to a computer with special software installed to determine the key parameters of droplet boiling like the timing and required linear dimensions in seconds and millimeters respectively accurate to three decimal places.

To study this process on heat-exchange surfaces with different roughness and wetting parameters, we set exchangeable Petri dishes (flat discs of 62–64 mm in diameter with a bottom thickness of 2.5–3 mm and a 3 mm collar along the edge) on the experimental device plate. These dishes were made of lathed carbon steel, aluminum alloy, and brass and featured different roughness parameters. The surface temperature of exchangeable dishes at respective times was assumed equal to the temperature readings from the thermocouples in the experimental device. It was also monitored using a non-contact pyrometer. We must note that the readings of the pyrometer for aluminum and brass dishes corresponded with the thermocouple readings, while the readings for the steel dishes varied by up to 0.5 °C.

The roughness parameters of all the heat-exchange surfaces were measured separately using the profilograph/profilometer based on GOST 19300-86, and their degree of wetting was calculated using the water contact angle for liquid inleakage determined with the reading microscope. Table 1 shows the average numerical values of roughness and the degree of wetting for the heat-exchange surfaces used in experiments.

Table 1 – The average numerical values of roughness and the degree of wetting for heat-exchange surfaces

Heat-exchange surface material	Roughness		Degree of wetting
	R_a , um	S_m , um	$\cos\theta$, deg.
Carbon steel:			
device plate	2,269	17,4	0,6976
exchangeable dish 1	0,374	28,7	0,5064
exchangeable dish 2	8,964	255,5	0,1735
Aluminum alloy:			
exchangeable dish 3	6,603	359,3	0,5832
exchangeable dish 4	16,943	551,5	0,5685
Brass:			
exchangeable dish 5	6,312	409,5	0,2488

In the experiments, all the heat-exchange surfaces were positioned horizontally, and their temperatures ranged between 100 °C and 260–280 °C at an interval of 10–20 °C.

The experiments were carried out at atmospheric pressure using the droplets of distilled water whose geometry and weight parameters were determined as average: 2.333 mm, 2.567 mm, 2.800 mm, 3.783 mm, 4.234 mm, 4.840 mm, 5.692 mm.

The initial liquid temperature of the droplet was 20, 50, 80 and 95 °C. The drop height of the droplet changed at increments approximately equal to the droplet radius (so-called “soft” feed of droplets on the heat-exchange surface) until it reached 350–400 mm.

The experimental procedures are detailed in our referenced sources [21], [22].

The equation to calculate the heat transfer coefficient of droplet boiling

Based on the results of the experimental research of droplet boiling, we obtained an equation to calculate the heat transfer coefficient, the parameter that determines the intensity of the process [23]:

$$Nu = 2,924 \cdot 10^9 \cdot Ra^{0.906} \cdot Oh^{3.688} \cdot Re^{-0.073} \cdot \left(\frac{t_b - t_{in}}{\Delta t} \right)^{-0.106} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{-0.138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_c} \right)^{0.700} \quad (1)$$

where $Nu = \frac{\alpha \cdot d_k}{\lambda}$ is Nusselt similarity number;

α is the heat transfer coefficient, W/(m²·°C);

d_k is the droplet diameter, m;

$Ra = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot \beta \cdot d_k^3}{\mu \cdot \lambda} \cdot \Delta t$ is Rayleigh similarity number;

$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot d_k}}$ is Ohnesorge similarity number;

$Re = \frac{w \cdot d_k \cdot \rho}{\mu}$ is Reynolds similarity number;

$\frac{t_b - t_{in}}{\Delta t}$ is the similarity simplex accounting for the impact of temperature factors;

$\frac{S_m}{R_a}$ is the similarity simplex accounting for the impact of heat-exchange surface roughness;

$\frac{W_a}{W_c}$ is the similarity simplex accounting for the impact of heat-exchange surface wetting degree;

w is the fall rate of the droplets of the liquid when they hit the heat-exchange surface, m/s;

t_{in} is the initial temperature of the droplet liquid, °C;

$\Delta t = t_s - t_b$ is thermal head, °C;

t_s is the temperature of the heat-exchange surface, °C;

R_a is the average deviation of the heat-exchange surface profile, um;

S_m is the roughness pitch of the heat-exchange surface profile against the midline, um;

$W_a = \sigma \cdot (1 + \cos \theta)$ is the work of adhesion, J/m²;

$W_c = 2 \cdot \sigma$ is the work of cohesion, J/m²;

θ is the water contact angle of the heat-exchange surface during the liquid inleakage, deg.;

the thermal and physical properties of the liquid measured at its boiling temperature t_b ;

ρ is the density, kg/m³;

μ is the dynamic viscosity coefficient, Pa·s;

β is the volumetric expansion coefficient, °C⁻¹;

c_p is the specific mass heat capacity, J/(kg·°C);

λ is the thermal conductivity factor, W/(m·°C);

σ is the surface tension coefficient, J/m².

Table 2 shows the key results of the correlation and regression analyses of the obtained experimental data. For Student’s test, the least calculated value out of the seven obtained for each of the regression equation (1) coefficients is stated. The significance level for the calculation of statistical criteria was set at 0.05.

Table 2 – The values of the statistical parameters for equation (1)

Statistical parameter	Value
Mean relative error δ_{me} , %	11,29
Minimum relative error δ_{min} , %	– 33,19
Maximum relative error δ_{max} , %	+ 31,64
Linear multiple correlation coefficient $r_{y,1-6}$	0,9789

End of the table 2 – The values of the statistical parameters for equation (1)

Statistical parameter	Value
The calculated value of Cochran's test Q_{cal}	0,0027
The critical value of Cochran's test Q_{crit}	0,0238
The calculated value of Student's test t_{cal}	≥ 976
The critical value of Student's test t_{crit}	1,9632
The calculated value of Fisher's test F_{cal}	1,0731
The critical value of Fisher's test F_{crit}	1,1581

The comparison of the calculated and critical values of the statistical criteria in Table 2 allows us to conclude that regression equation (1) is adequate and all of its coefficients are significant.

However, it is impossible to tell what proportion of random deviations from the forecast values of equation (1) is determined by the anisotropy of the physical and chemical properties of the heat-exchange surface, which presents a great academic and practical interest.

The quantification method for the anisotropy of the physical and chemical properties of the heat-exchange surface

The main idea of the suggested method is that the values of the minimum and maximum roughness deviations R_a and S_m at the basic distance from the average values of the heat-exchange values are, from the point of view of mathematical statistics, the minimum and maximum limits of the confidence interval of individual values of the relative profile bearing length [24], [25].

This method is implemented as follows.

We used the profilograph/profilometer to measure the roughness of the heat-exchange surface and plot the growth line of the bearing length of its profile. For each of the standard profile section levels (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 %), we determined the deviation (rest):

$$u_i = p_i - t_{pi} \quad (2)$$

where p_i is the profile section level, %;

t_i is the relative profile bearing length, %.

The adequacy of the distribution of the obtained deviations u_i is verified using the Shapiro-Wilk's test and the Epps-Pulley's test featuring the highest statistical power [26], [27] because the distribution of any roughness parameters has to be adequate at the outset [28].

We calculated the percent deviation of roughness (for the significance of 0.05) as follows [29]:

$$\Delta = 1.96 \cdot s_u \quad (3)$$

where $s_u = \sqrt{\frac{1}{11} \cdot \sum_{i=1}^{12} (u_i - \bar{u})^2}$ is the standard deviation for rest u_i based on an unbiased dispersion estimate;

\bar{u} is the average rest u_i .

Then we determined the numerical values of the anisotropy of the physical and chemical properties of the heat-exchange surface: roughness parameters $R_a \cdot \left(1 \pm \frac{\Delta}{100}\right)$, $S_m \cdot \left(1 \pm \frac{\Delta}{100}\right)$ and the wetting degree $\cos \theta \cdot \left(1 \pm \frac{\Delta}{100}\right)$ because the latter is proportional to roughness [30].

By varying the obtained minimum and maximum roughness values R_a , S_m , as well as the wetting degree $\cos \theta$, and inserting them in equation (1), we get:

$$Nu = 2,924 \cdot 10^9 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Ra^{0.906} \cdot Oh^{3.688} \cdot Re^{-0.073} \cdot \left(\frac{t_b - t_{in}}{\Delta t}\right)^{-0.106} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-0.138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_c}\right)^{0.700} \quad (4)$$

where $K_1 \in \left\{ \left[\left(\frac{S_m}{R_a}\right)_{\max} / \left(\frac{S_m}{R_a}\right) \right]^{-0.138} ; \left[\left(\frac{S_m}{R_a}\right)_{\min} / \left(\frac{S_m}{R_a}\right) \right]^{-0.138} \right\}$ is the roughness anisotropy coefficient;

$K_2 \in \left\{ \left[\left(\frac{W_a}{W_c}\right)_{\min} / \left(\frac{W_a}{W_c}\right) \right]^{0.700} ; \left[\left(\frac{W_a}{W_c}\right)_{\max} / \left(\frac{W_a}{W_c}\right) \right]^{0.700} \right\}$ is the wetting degree anisotropy coefficient.

The Figure shows the growth line of the bearing length for the carbon steel heat-exchange surface profile (exchangeable dish 1 in Table 1), for which the roughness deviation amounted to $\Delta = 36.02$ %. At the same time, the calculated value of the Shapiro-Wilk's test is 0.893 and the critical value is 0.859; the calculated value of the Epps-Pulley's test is 0.270 and the critical value is 0.361, which confirms the adequacy of the distribution of u_i deviations [26], [27].

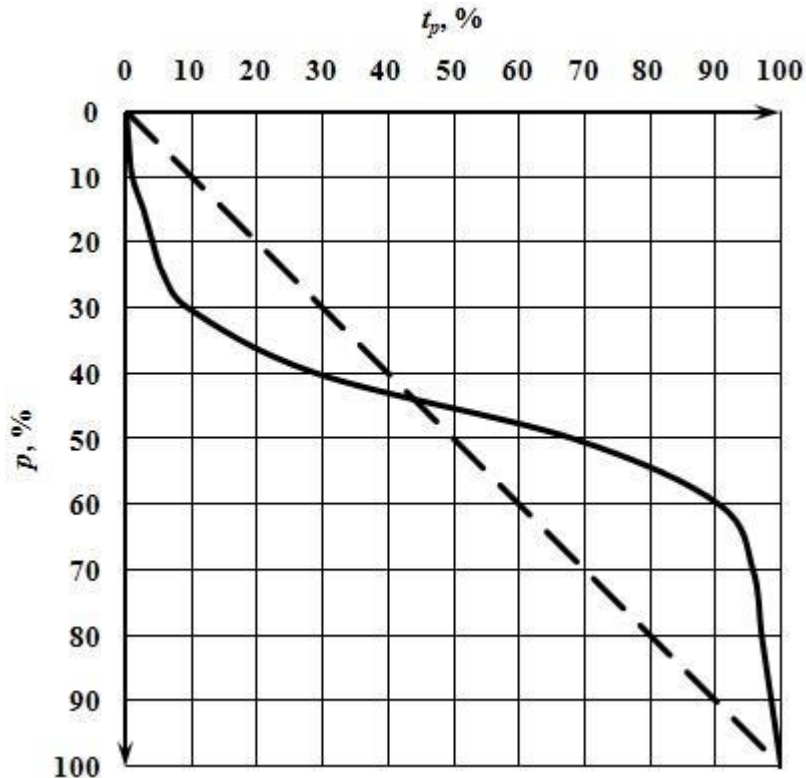


Fig. 1 – The growth line of the bearing length for the carbon steel heat-exchange surface profile (exchangeable dish 1 in Table 1).

Table 3 shows the value ranges for the anisotropy coefficients of the physical and chemical properties of all heat-exchange surfaces used in the experiments calculated using equation (4).

As we can see from Table 3, the anisotropy of the physical and chemical properties has the greatest impact on the carbon steel heat-exchange surface with minimum roughness (exchangeable dish 1 in Table 1). Its heat transfer intensity change during droplet boiling reaches $\pm 16.79\%$ on average, which exceeds the average relative error of equation (1) and makes the process the least controllable from the engineering viewpoint.

The anisotropy of the physical and chemical properties has the greatest impact on the aluminum alloy heat-exchange surface with maximum roughness (exchangeable dish 4 in Table 1). Its heat transfer intensity change during droplet boiling reaches $\pm 4.45\%$ on average, which assures the optimal implementation conditions from the engineering viewpoint.

Table 3 – The values of the anisotropy coefficients of the physical and chemical properties of the heat-exchange surfaces

Heat-exchange surface material	Anisotropy coefficients for	
	roughness K_1	degree of wetting K_2
<u>Carbon steel</u>		
device plate	0,942 – 1,062	0,938 – 1,061
exchangeable dish 1	0,912 – 1,096	0,923 – 1,074
exchangeable dish 2	0,953 – 1,049	0,982 – 1,018
<u>Aluminum alloy</u>		
exchangeable dish 3	0,938 – 1,066	0,941 – 1,058
exchangeable dish 4	0,977 – 1,024	0,978 – 1,022
<u>Brass</u>		
exchangeable dish 5	0,926 – 1,079	0,962 – 1,037

When using the suggested method in engineering design to determine the relative profile bearing length without metering the roughness of the heat-exchange surface in advance, we suggest using the following equations:

- for $p_i < t_m = 31.63\%$:

$$t_{pi} = t_m \cdot \left[\frac{p_i \cdot R_{max}}{100 \cdot R_z} \right] \left(\frac{t_m \cdot R_{max}}{100 \cdot R_a} + 1 \right) \quad (5)$$

- for $p_i > t_m = 31.63\%$:

$$t_{pi} = 100 - t_m \cdot \left[\frac{100 - p_i}{50} \right] \cdot \left(\frac{100 \cdot R_z - t_m \cdot R_{\max}}{100 \cdot R_a} \right) \quad (6)$$

where R_z is the height of heat-exchange surface profile roughness at 10 points, μm ;

R_{\max} is the maximum height of the heat-exchange surface profile roughness, μm .

Equations (5) and (6) were constructed by the authors of this work based on the common dependencies, and they feature the accuracy acceptable for engineering calculations. For these equations, parameters R_z and R_{\max} for various types and modes of mechanical processing of the heat-exchange surface are presented in reference sources, e.g. in [24], [25].

Conclusion

Based on the conducted research and using the methods of mathematical statistics, we developed an original quantification method for the impact of the anisotropy of the physical and chemical properties of the heat-exchange surface on the heat transfer intensity during the droplet boiling of a liquid.

The method is easy to implement and highly accurate, and it allows for the use of experimental and analytical methods to determine the values of anisotropy coefficients for roughness and wetting degree for any heat exchange surface. This, in its turn, helps provide a numerical assessment of the heat transfer intensity changes for the droplet boiling of a liquid on a specific heat-exchange surface.

The obtained results help us select the heat-exchange surface material, as well as the type and mode of its mechanical treatment, assuring the optimal conditions for this process, which can be interesting for the engineering design of high-efficiency devices employing the droplet boiling technology.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1603.2022.4.

Funding

This research was supported by the grant of the President of the Russian Federation МК-1603.2022.4.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Овсянник А.В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А.В. Овсянник. – Гомель : ГТТУ им. П.О. Сухого, 2012. – 284 с.
2. Баранов П.А. Предупреждение аварий паровых котлов / П.А. Баранов. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
3. Боришанский В.М. Некоторые данные об испарении жидкости, находящейся в сфероидальном состоянии / В.М. Боришанский, С.С. Кутателадзе // ЖТФ. – 1947. – Т. 17. – № 8. – С. 891–902.
4. Gottfried B.S. The Leidenfrost Phenomenon: film boiling of liquid droplets on a flat plate / B.S. Gottfried, C.J. Lee, K.J. Bell // Int. J. Heat Mass Transf. – 1966. – Vol. 9. – P. 1167–1188.
5. Mizomoto M. Evaporation and ignition of a fuel droplet on a hot surface / M. Mizomoto, H. Hayano, S. Ikai // JSME. – 1978. – Vol. 21. – № 162. – P. 1765–1771.
6. Кутателадзе С.С. Теплообмен и волны в газожидкостных системах / С.С. Кутателадзе, В.Е. Накоряков. – Новосибирск : Наука, 1984. – 302 с.
7. Скрипов В.П. Капля на горячей плите: появление 1/f-шума при переходе к сфероидальной форме / В.П. Скрипов, А.В. Виноградов, В. Н. Скоков и др. // ЖТФ. – 2003. – Т. 73. – № 6. – С. 21–23.
8. Lu G. An experimental investigation on spreading of droplets with evaporation and nucleation / G. Lu, X.-F. Peng, X.-D. Wang // Heat Tran. Asian Res. – 2009. – Vol. 38. – is. 1. – P. 40–50.
9. Стырикович М.А. О пространственно-временной структуре теплового взаимодействия при кратковременном контакте капли жидкости с сильно перегретой поверхностью / А.М. Стырикович, Д.И. Ламден, М.Е. Костановская // ТВТ. – 1986. – Т. 24 – № 4. – С. 753–761.
10. Xiong T.Y. Evaporation of a liquid droplet on a hot plate / T.Y. Xiong, M.C. Yuen // Int. J. Heat Mass Transf. – 1991. – Vol. 34 – № 7. – P. 1881–1894.
11. Kim. S. Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF / S. Kim, H.D. Kim, H. Kim et al. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2010. – Vol. 34. – P. 487–495.
12. Abu-Zaid M. An experimental study of the evaporation characteristics of emulsified liquid droplets / M. Abu-Zaid // Heat Mass Transf. – 2004. – Vol. 40. – P. 737–741.
13. Takamasa T. Radiation induced surface activation on Leidenfrost and quenching phenomena / T. Takamasa, T. Hazuku, K. Okamoto et al. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2005. – Vol. 29. – P. 267–274.
14. Cossali G.E. Secondary atomization produced by single drop vertical impacts onto heated surfaces / G.E. Cossali, M. Marengo, M. Santini // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2005. – Vol. 29. – P. 937–946.
15. Takata Y. Evaporation of water drop on a plasma-irradiated hydrophilic surface / Y. Takata, S. Hidaka, A. Yamashita et al. // Int. J. Heat Fluid Fl. – 2004. – Vol. 25. – P. 320–328.
16. Kim H. Effects of micro/nano-scale surface characteristics on Leidenfrost Point temperature of water / H. Kim, B. Truong, J. Buongiorno et al // J. Therm. Sci. Tech. – 2012. – Vol. 7. – № 3. – P. 453–462.

17. Kim S.H. Experimental study of water droplets on over-heated nano/microstructured zirconium surfaces / S.H. Kim, H. S. Ahn, J. Kim et al. // Nucl. Eng. Des. – 2014. – Vol. 278. – P. 367–376.
18. Avedisian C.T. Leidenfrost boiling of methanol droplets on hot porous/ceramic surfaces / C.T. Avedisian, J. Koplik // Int. J. Heat Mass Transf. – 1987. – Vol. 30. – № 2. – P. 379–393.
19. Manzello S.L. On the collision dynamics of a water droplet containing an additive on a heated solid surface / S.L. Manzello, J.C. Yang // Proc. R. Soc. Lond. A. – 2002. – Vol. 458. – P. 2417–2444.
20. Mehdi-Nejad V. Air bubble entrapment under an impacting droplet / V. Mehdi-Nejad, J. Mostaghimi, S. Chandra // Phys. Fluids. – 2003. – Vol. 15. – № 1. – P. 173–183.
21. Васильев П.С. Определение времени испарения кипящей на поверхности нагрева капли / П.С. Васильев, Л.С. Рева, С.Л. Рева и др. // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 5. – С. 121–126.
22. Васильев П.С. Определение площади пятна контакта кипящей на поверхности нагрева капли жидкости / П.С. Васильев, Л.С. Рева, С.Л. Рева и др. // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 13. – С. 116–123.
23. Васильев П.С. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении капли жидкости на поверхности нагрева / П.С. Васильев, Л.С. Рева, С.Л. Рева и др. // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 22. – С. 28–33.
24. Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. – 2-е изд., доп. – Москва : Высшая школа, 2006. – 800 с.
25. Палей М.А. Допуски и посадки / М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 8-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Политехника, 2001. – 576 с.
26. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
27. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. – Введ. 22–01–02. – Москва : Издательство стандартов, 2002. – 31 с.
28. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – Москва : Наука, 1975. – 344 с.
29. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов / Э. Фёрстер, Б. Рёниц; пер. с нем. В.М. Ивановой. – Москва : Финансы и статистика, 1983. – 303 с.
30. Сумм Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – Москва : Химия, 1976. – 232 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ovsjannik A.V. Modelirovanie processov teploobmena pri kipenii zhidkostej [Modeling heat-exchange processes during the boiling of liquids] / A.V. Ovsjannik. – Gomel : Sukhoi State Technical University of Gomel, 2012. – 284 p. [in Russian]
2. Baranov P.A. Preduprezhdenie avarij parovyh kotlov [Preventing steam boiler accidents] / P.A. Baranov. – Moskva : Jenergoatomizdat, 1991. – 272 p. [in Russian]
3. Borishanskij V.M. Nekotorye dannye ob isparenii zhidkosti, nahodjashhejsja v sferoidal'nom sostojanii [Some data on the evaporation of a liquid in the spheroidal state] / V.M. Borishanskij, S.S. Kutateladze // ZhTF. – 1947. – Vol. 17. – № 8. – Pp. 891–902. [in Russian]
4. Gottfried B.S. The Leidenfrost Phenomenon: film boiling of liquid droplets on a flat plate / B.S. Gottfried, C.J. Lee, K.J. Bell // Int. J. Heat Mass Transf. – 1966. – Vol. 9. – Pp. 1167–1188.
5. Mizomoto M. Evaporation and ignition of a fuel droplet on a hot surface / M. Mizomoto, H. Hayano, S. Ikai // JSME. – 1978. – Vol. 21. – № 162. – Pp. 1765–1771.
6. Kutateladze S.S. Teplomassoobmen i volny v gazozhidkostnyh sistemah [Heat-mass exchange and waves in liquid-gas system] / S.S. Kutateladze, V.E. Nakorjakov. – Novosibirsk : Nauka, 1984. – 302 p. [in Russian]
7. Skripov V.P. Kaplja na gorjachej plite: pojavlenie 1/f-shuma pri perehode k sferoidal'noj forme [A droplet on a hot plate: the appearance of 1/f noise during the shift towards the spheroidal form] / V.P. Skripov, A.V. Vinogradov, V. N. Skokov et al. // ZhTF. – 2003. – Vol. 73. – № 6. – Pp. 21–23. [in Russian]
8. Lu G. An experimental investigation on spreading of droplets with evaporation and nucleation / G. Lu, X.-F. Peng, X.-D. Wang // Heat Tran. Asian Res. – 2009. – Vol. 38. – is. 1. – Pp. 40–50.
9. Styrikovich M.A. O prostranstvenno-vremennoj strukture teplovogo vzaimodejstvija pri kratkovremennom kontakte kapli zhidkosti s sil'no peregretoj poverhnost'ju [On the spatial and temporal structure of the thermal interaction during the short-term contact of a liquid droplet and a superheated surface] / A.M. Styrikovich, D.I. Lamden, M.E. Kostanovskaja // TVT. – 1986. – Vol. 24 – № 4. – Pp. 753–761. [in Russian]
10. Xiong T.Y. Evaporation of a liquid droplet on a hot plate / T.Y. Xiong, M.C. Yuen // Int. J. Heat Mass Transf. – 1991. – Vol. 34 – № 7. – P. 1881–1894.
11. Kim. S. Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF / S. Kim, H.D. Kim, H. Kim et al. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2010. – Vol. 34. – P. 487–495.
12. Abu-Zaid M. An experimental study of the evaporation characteristics of emulsified liquid droplets / M. Abu-Zaid // Heat Mass Transf. – 2004. – Vol. 40. – P. 737–741.
13. Takamasa T. Radiation induced surface activation on Leidenfrost and quenching phenomena / T. Takamasa, T. Hazuku, K. Okamoto et al. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2005. – Vol. 29. – P. 267–274.
14. Cossali G.E. Secondary atomization produced by single drop vertical impacts onto heated surfaces / G.E. Cossali, M. Marengo, M. Santini // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2005. – Vol. 29. – P. 937–946.
15. Takata Y. Evaporation of water drop on a plasma-irradiated hydrophilic surface / Y. Takata, S. Hidaka, A. Yamashita et al. // Int. J. Heat Fluid Fl. – 2004. – Vol. 25. – P. 320–328.

16. Kim H. Effects of micro/nano-scale surface characteristics on Leidenfrost Point temperature of water / H. Kim, B. Truong, J. Buongiorno et al // J. Therm. Sci. Tech. – 2012. – Vol. 7. – № 3. – P. 453–462.
17. Kim S.H. Experimental study of water droplets on over-heated nano/microstructured zirconium surfaces / S.H. Kim, H. S. Ahn, J. Kim et al. // Nucl. Eng. Des. – 2014. – Vol. 278. – P. 367–376.
18. Avedisian C.T. Leidenfrost boiling of methanol droplets on hot porous/ceramic surfaces / C.T. Avedisian, J. Koplik // Int. J. Heat Mass Transf. – 1987. – Vol. 30. – № 2. – P. 379–393.
19. Manzello S.L. On the collision dynamics of a water droplet containing an additive on a heated solid surface / S.L. Manzello, J.C. Yang // Proc. R. Soc. Lond. A. – 2002. – Vol. 458. – P. 2417–2444.
20. Mehdi-Nejad V. Air bubble entrapment under an impacting droplet / V. Mehdi-Nejad, J. Mostaghimi, S. Chandra // Phys. Fluids. – 2003. – Vol. 15. – № 1. – P. 173–183.
21. Vasil'ev P.S. Opređenje vremena isparenija kapi na površnosti zagreva kapli [The calculation of the evaporation time for a droplet boiling on a heated surface] / P.S. Vasil'ev, L.S. Reva, S.L. Reva et al. // Vestnik tehnološkog universiteta [Bulletin of the Technological University]. – 2016. – Vol. 19. – № 5. – Pp. 121–126. [in Russian]
22. Vasil'ev P.S. Opređenje plošhadi pjatna kontakta kapi na površnosti zagreva kapli [The calculation of the area of the contact patch of the liquid droplet boiling on a heated surface] / P.S. Vasil'ev, L.S. Reva, S.L. Reva et al. // Vestnik tehnološkog universiteta [Bulletin of the Technological University]. – 2016. – Vol. 19. – № 13. – Pp. 116–123. [in Russian]
23. Vasil'ev P.S. Jeksperimental'noe issledovanie teplootdachi pri kipeńii kapli zhidkosti na površnosti zagreva [The experimental research of the heat transfer during the boiling of a liquid droplet on the heated surface] / P.S. Vasil'ev, L.S. Reva, S.L. Reva et al. // Vestnik tehnološkog universiteta [Bulletin of the Technological University]. – 2017. – Vol. 20. – № 22. – Pp. 28–33. [in Russian]
24. Radkevich J.M. Metrologija, standartizacija i sertifikacija [Metrology, standardization, and certification] / J.M. Radkevich, A.G. Shirladze, B.I. Laktionov. – 2nd ed., amended. – Moscow : Vysshaja shkola, 2006. – 800 p. [in Russian]
25. Palej M.A. Dopuski i posadki [Adjustment and allowances] / M.A. Palej, A.B. Romanov, V.A. Braginskij. – 8th edition revised and augmented. – St. Petersburg : Politehnika, 2001. – 576 p. [in Russian]
26. Kobzar' A.I. Prikladnaja matematičeskaja statistika. Dlja inženerov i nauchnyh rabotnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers] / A.I. Kobzar'. – Moscow : FIZMATLIT, 2006. – 816 p. [in Russian]
27. GOST R ISO 5479-2002. Statističeskie metody. Proverka otklonenija raspredelenija verojatnostej ot normal'nogo raspredelenija [Statistical methods. Testing the probability distribution deviation from the normal distribution.]. – Introduced. 22–01–02. – Moscow : publishing house standartov, 2002. – 31 p. [in Russian]
28. Husu A.P. Sherohovatost' površnostej (teoretiko-verojatnostnyj podhod) [Surface roughness (probability-theoretic approach)] / A.P. Husu, J.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov. – Moscow : Nauka, 1975. – 344 p. [in Russian]
29. Fjorster Je. Metody korreljacionnogo i regressionnogo analiza. Rukovodstvo dlja jekonomistov [Methods of correlation and regression analysis. A guidebook for economists] / Je. Fjorster, B. Rjonc; per. s nem. V.M. Ivanovoj. – Moscow : Finansy i statistika, 1983. – 303 p. [in Russian]
30. Summ B.D. Fiziko-himičeskie osnovy smachivanja i rastekanija [The physical and chemical bases of wetting and spreading] / B.D. Summ, Ju.V. Gorjunov. – Moscow : Himija, 1976. – 232 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.005>

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ПРИМЕРЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОЯЩЕГОСЯ ЗДАНИЯ

Научная статья

Вдовенко А.В.^{1,*}, Вдовенко В.А.², Егоров П.И.³, Эунап Р.А.⁴, Кашина Ж.В.⁵

¹ ORCID 0000-0002-9543-1369;

^{1, 2, 3, 4, 5} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

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

Аннотация

В статье описан ход выполнения работ по контролю вертикальности и форм деформации монолитных железобетонных конструкций в строящемся здании. Предложен концептуальный подход к программе выполнения аналогичных работ, где последовательность действий разделена на этапы: выбора характерных сечений, сбора пространственных данных и автоматизированной постобработки с выводом заключения о соответствии нормативным требованиям. В процессе выполнения работы данные собираются в единую цифровую модель для всего здания, которая представляет собой облако точек похожее на результаты 3D сканирования, но выполненное с меньшей разрешающей способностью и избыточностью. Для оценки вертикальности несущих элементов используются полуавтоматические алгоритмы на основе аппроксимаций методами наименьших квадратов, написанные на языке AutoLisp.

Ключевые слова: деформации, контроль, безотражательный тахеометр, алгоритм, цифровая модель.

MODERN METHODS OF GEODETIC CONTROL ON THE EXAMPLE OF VERTICALITY DETERMINATION OF ELEMENTS OF A BUILDING UNDER CONSTRUCTION

Research article

Vdovenko A.V.^{1,*}, Vdovenko V.A.², Egorov P.I.³, Eunap R.A.⁴, Kashina Zh.V.⁵

¹ ORCID 0000-0002-9543-1369

^{1,2,3,4,5} Pacific National University, Khabarovsk, Russia

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

Abstract

The article describes work progress on vertical control and forms of deformation of reinforced concrete structures in a building under construction. A conceptual approach to the program of similar work is proposed, where the sequence of actions is divided into stages: selection of characteristic cross-sections, spatial data and automated post-processing collection with conclusion on compliance with regulatory requirements. In the work process, the data is collected into a single digital model for the entire building in the form of a cloud of dots similar to the results of 3D scanning, but with less resolution capability and redundancy. For the evaluation of the bearing component verticality, algorithms based on least-squares fitting written in AutoLisp are used.

Keywords: deformations, control, reflectorless total station, algorithms, digital model.

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации промышленных и гражданских зданий, ответственных инженерных сооружений достигается проведением мониторинга, включая инженерно-геодезические работы на этапе строительства. Оценка деформационного состояния зданий и сооружений является одной из областей применения высокоточных геодезических способов и средств измерений.

Разработке и совершенствованию методов и средств геодезических измерений с целью определения деформаций конструкций зданий и инженерных сооружений посвящено достаточное количество научных публикаций [1], [2], [3], [4]. Значительный вклад в разработку геодезических способов, технологических схем геодезического обеспечения процесса строительства зданий и сооружений, внесли отечественные и зарубежные ученые, такие как Асташенков Г.Г., Брайт П.И., Васютинский И.Ю., Рязанцев Г.Е., Ганьшин В.Н., Донских И.Е., Жуков Б.Н., Зайцев А.К., Ключин Е.Б., Левчук Г.П., Михелев Д.Ш., Новак В.В., Ямбаев Х.К., Шторм В.В. и другие.

Совершенствование существующих и разработка новых методик геодезических измерений для контроля геометрических параметров зданий и сооружений в процессе строительства является актуальной научно-технической задачей [5], [6], [7].

Методологическая и теоретическая основа работы включает в себя использование методов статистической обработки результатов измерений, а также теории математической обработки геодезических данных для анализа результатов производимых измерений.

Перед исследователями была поставлена задача: осуществить контроль вертикальности и взаимного (проектного) расположения, включая сдвиги и повороты центрального сечения в уровнях перекрытий, монолитных несущих железобетонных конструкций (колонны, пилоны, стены) строящегося здания, где первые три этажа (включая подвал) являются монолитным железобетонным сооружением. Верхние этажи, начиная с четвертого, представлены сборными железобетонными конструкциями переменной этажности.

Основные результаты и обсуждение

Контролируемые железобетонные конструкции представлены в трех видах: колонны, пилоны, стены (рисунок 1). Колонны в данном сооружении – это монолитные вертикальные конструкции высотой 10,5 метров проходящие сквозь все три этажа (4+4+2,5)м и возводимые в несколько этапов с сооружением монолитных перекрытий; в поперечном

сечении прямоугольные с соотношением сторон в среднем 2 : 1. Пилоны – то же, что и колонны с разницей в том, что соотношение сторон поперечного сечения 5 : 1 и более. Все колонны и пилоны ориентированы «широкой» стороной в направлении запад-восток, поперечно основному фасаду. Монолитные стены представлены в двух вариантах: это ограждающие/несущие стены лифтовой шахты и незадымляемой лестницы высотой 10,5 метров и подпорные стены первого (подвального) этажа высотой 2,5 метра, не воспринимающие значительных вертикальных нагрузок.

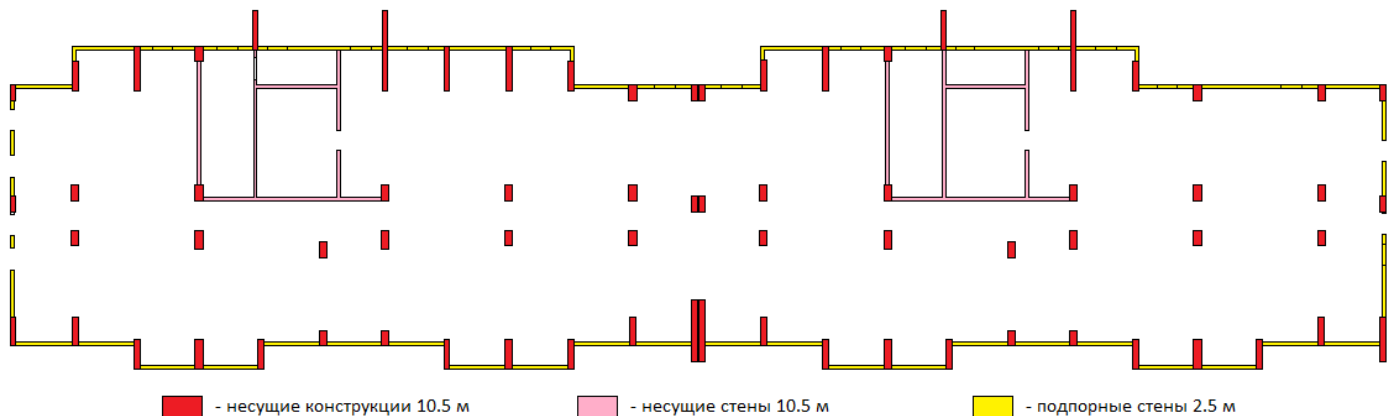


Рис. 1 – План контролируемых монолитных железобетонных конструкций

В развитии результатов предыдущих работ [8], для решения задачи предложен способ, при котором на первом этапе происходит анализ конструкции и выбираются характерные сечения (рис.2а), на втором этапе происходит сбор пространственных данных, а на третьем этапе выполняется автоматическая обработка данных по предложенному алгоритму и вывод отчета с заключением о соответствии нормативным требованиям [9], [10].

В связи с конструктивными особенностями здания, основное внимание было уделено вертикальности «широких» сторон основных несущих элементов (колонн и пилонов), так как отклонения по отношению к малой толщине элементов в этом направлении вносят более весомый вклад в надежность сооружения в целом.

Контролируемые параметры для колонн и пилонов включают: общий крен конструкции, крен в отдельных плоскостях и гранях, а также смещения и повороты центрального сечения в уровне перекрытий и в общем виде представлены на схеме (рис. 2в, 2г).

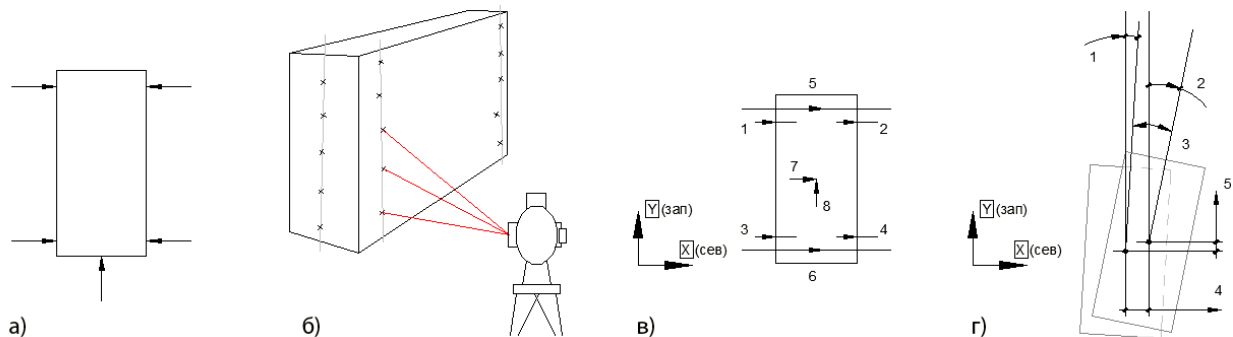


Рис. 2 – Схемы выполнения работ и контролируемых параметров:

а – общий крен конструкции; б – крен в отдельных плоскостях и гранях; в – смещения центрального сечения; г – повороты центрального сечения

Для сбора исходных данных использовался тахеометр Sokkia 530g в высокоточном безотражательном режиме. Для выполнения съемки предварительно нанесены высокоточные базовые стенные метки (световозвращающий грунт и тонкое перекрестье по трафарету) на выступающие колонны в торцевых частях секций каждого этажа (всего 12), а также метки в средней части перекрытий внутри межэтажных технологических отверстий под трубопровод и канализацию (продухи).

Схема измерений построена таким образом, что тахеометр устанавливается на характерных точках по центральной линии здания так, чтобы первые три точки, снимаемые в режиме высокой точности, были одни и те же для всех измерений в пределах данной секции этажа, а также с высокой точностью выполнялось наблюдение меток в межэтажных технических отверстиях (рис. 3).

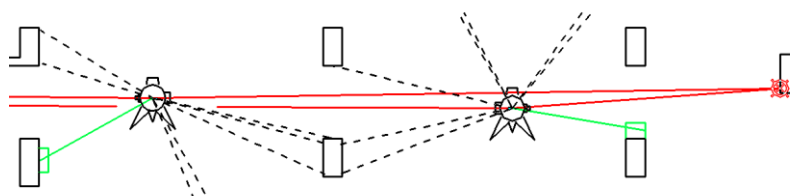


Рис. 3 – Схема плановой и высотной привязки станций

Остальные измерения с данной станции выполнялись без визирования в оптическую систему «от руки по лучу» по характерным сечениям с равными промежутками (рис.2б). В дальнейшем разрозненные облака точек с каждой станции сводились в единое облако данного этажа/секции по первым трем общим точкам, а сами этажи – в единое облако здания по общим межэтажным меткам. Конечным результатом второго этапа работ является единое облако точек по характерным сечениям, в общем виде напоминающее результаты 3D сканирования, но выполненное с меньшей разрешающей способностью и избыточностью (рис. 4).

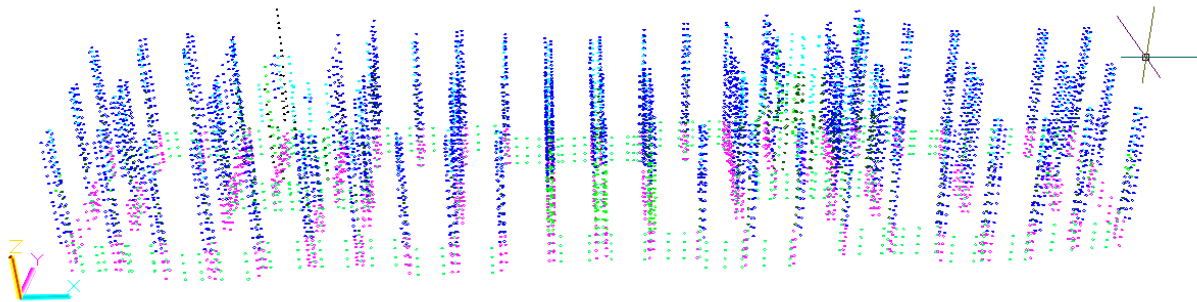


Рис. 4 – Облако точек (перспективная проекция)

Для реализации третьего этапа в программном комплексе Autocad на языке AutoLisp были написаны подпрограммы, выполняющие анализ, визуализацию и выгрузку в таблицу отчета состояния контролируемого элемента. Входными данными для подпрограммы «колонна/пилон» являются пять групп точек выделяемые при разметке на видовом экране «план». После окончания «разметки» текущего элемента, подпрограмма строит профиль для каждого сечения и выполняет анализ на основе аппроксимаций методами наименьших квадратов, контролируя как общий крен конструкции, так и крен и взаимное смещение секций на уровне каждого этажа по предварительно заданным высотам уровней перекрытий (рис. 5). По завершению вычислений подпрограмма предложит выполнить разметку следующего элемента.

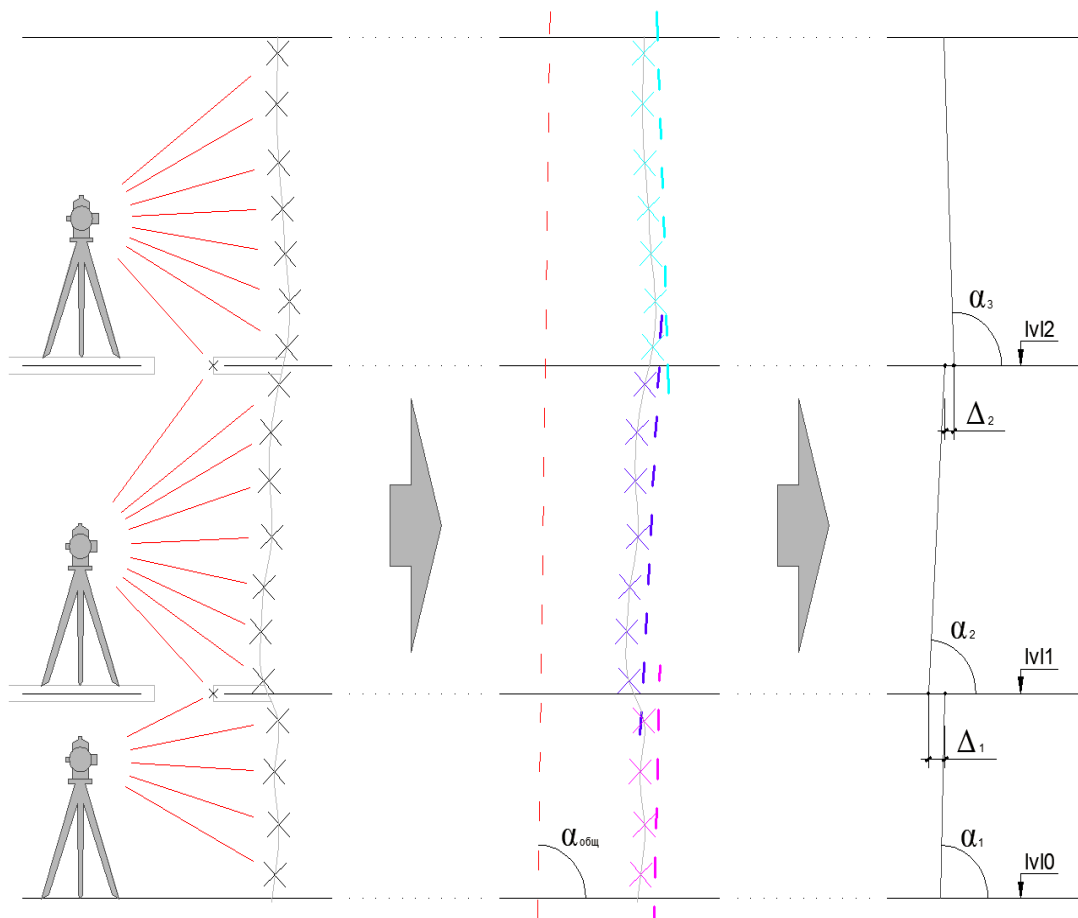


Рис. 5 – Схема алгоритма оценки состояния несущих конструкций здания

Подпрограмма «стена» действует похожим образом за исключением того, что в ней не выполняется контроль продольных смещений.

Схематичное изображение процессов предлагаемой концепции и использованный параметроизвлекающий алгоритм представлены на рисунке 6.

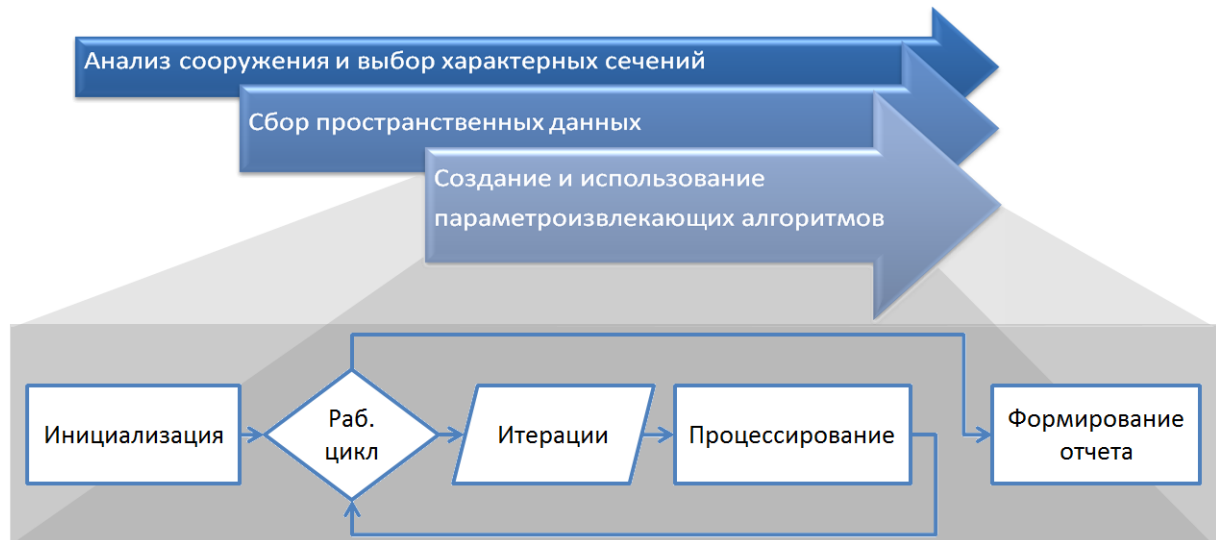


Рис. 6 – Схема процессов и параметроизвлекающего алгоритма

При этом конкретизируем этапы алгоритма:

- инициализация: указание основных параметров (уровни перекрытий, базисный горизонтальный угол);
- итерации: именование элемента, разметка элемента (выбор пяти групп профилообразующих точек);
- процессирование: для каждого сечения (как в целом, так и для каждой его межуровневой части) методом наименьших квадратов вычисляются параметры функции

$$y = kx + b$$

k – тангенс угла наклона аппроксимируемой конструкции ($\alpha_{\text{общ}}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$);

b – смещение положения основания.

По разнице параметров $blv10, blv11, blv12$ (после приведения их к общему основанию) вычисляются параметры $\Delta 1, \Delta 2$ – сдвиг плоскости грани колонны.

Получив результаты для всех пяти сечений, из попарных сечений северной и южной граней вычисляются их основные параметры, такие как средний наклон, средние смещения в районе перекрытий, а также горизонтальный угол.

Далее противоположные грани приводятся к общей оси конструктивного элемента для вычисления параметров крена и смещений.

В конце статьи приведен детализированный фрагмент отчета (рис. 7) на один из проблемных элементов (крайнего пилона в торце здания), у которого вследствие ошибки установки опалубочных щитов и их оползания наблюдались сильные отклонения от вертикальности (до 70мм на высоту элемента по одной из граней).

Заключение

Предложенный в данном исследовании метод геодезического контроля с использованием безотражательного тахеометра и автоматизированных алгоритмов постобработки может быть использован при выполнении аналогичных работ при строительстве промышленных и гражданских зданий. При этом предлагаемая технология выполнения работ является достаточно гибкой и позволяет оперативно вносить изменения в случае добавления новых инженерных задач, как на этапе сбора данных, выполняя их «дополнение» по известному съемочному основанию с добавлением новых сечений, так и на этапе создания параметроизвлекающих алгоритмов, когда исследователям могут потребоваться дополнительные сведения о сооружении.

Например, так было и в данном случае, когда представитель заказчика по окончании основного цикла работ попросил рассмотреть возможность предоставления ведомости плановых отклонений центральных осей элементов от проектных значений. Для этого потребовалась лишь увязка съемочного основания с разбивочной сетью строительного объекта.

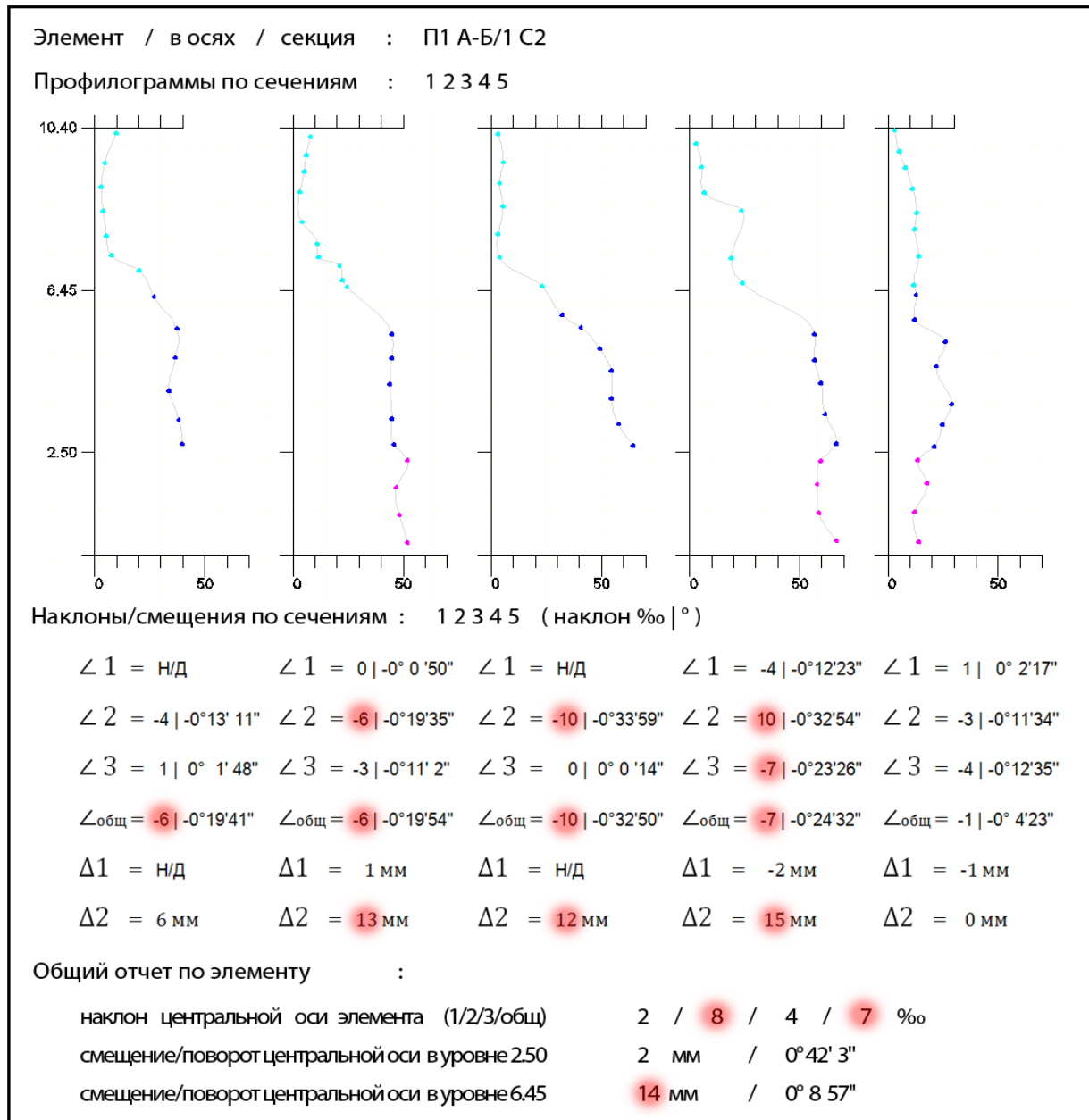


Рис. 7 – Фрагмент отчета для проблемного конструктивного элемента здания

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Скрипникова М.А. Возможности применения автоматизированных высокоточных электронных тахеометров при измерении деформаций инженерных сооружений / М.А. Скрипникова // ГЕО-Сибирь-2010 : сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. – Новосибирск : СГГА, 2010. – Т. 1, ч. 1. – С. 131–134.
2. Мазуров Б.Т. Анализ геодезических измерений с учетом динамики объектов мониторинга / Б.Т. Мазуров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 18–21.
3. Михайлов В.И. Опыт применения электронного тахеометра для измерения вертикальности стен / В. И. Михайлов, С.И. Кононович, Ю.Н. Чиберкуч // Главный инженер в строительстве. – 2013. – № 9. – С. 26–31.
4. Шеховцов Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2009. – 156 с.
5. Никитин А.В. Способ определения крена сооружений цилиндрической формы / А.В. Никитин // Геодезия и картография. – 2008. – Вып. 6. – С. 15–17.
6. Комиссаров А.В. Системное представление лазерного сканирования / А.В. Комиссаров // Геодезия и картография. – 2015. – №. 7 – С. 18–23
7. Никонов А.В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме / А.В. Никонов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1(29). – С. 43–53.
8. Вдовенко А.В. Решение задачи определения вертикальности строительных конструкций с помощью современных технологий на примере четырехгранной колонны / А.В. Вдовенко, В.А. Вдовенко, И.Ю. Трофимов и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 3-1(105). – С. 27-32.

9. СП 126.13330.2017 Свод правил «Геодезические работы в строительстве». – Утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 октября 2017 г. N 1469/пр

10. Руководство по определению кренов инженерных сооружений башенного типа геодезическими методами. – Москва : Стройиздат, 1981. – 56 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Skripnikova M.A. Vozmozhnosti primeneniya avtomatizirovannykh vysokotochnykh elektronnykh takheometrov pri izmerenii deformatsiy inzhenernykh sooruzheniy [Possibilities of using high-precision Automated Motorized Total Stations in measuring the deformations of engineering structures] / M.A. Skripnikov // GEO-Sibir'-2010 : sb. materialov VI Mezhdunar. nauch. Kongr [collection of materials of the VI International Scientific Congress]. – Novosibirsk : SGGa, 2010. – Vol. 1, ch. 1. – Pp. 131–134. [in Russian]

2. Mazurov B.T. Analiz geodezicheskikh izmereniy s uchetom dinamiki ob"yektov monitoringa [Analysis of geodetic measurements taking into account the dynamics of monitoring objects] / B.T. Mazurov // Izv. universitets. Geodeziya i aerofotos"yemka [Geodesy and aerial photography]. – 2012. – No. 2/1. – Pp. 18–21. [in Russian]

3. Mikhailov V. I. Opyt primeneniya elektronnoy takheometra dlya izmereniya vertikal'nosti sten [Experience of using an electronic total station to measure the verticality of walls] / V. I. Mikhailov, S. I. Kononovich, Yu.N. Chiberkuch // Glavnyy inzhener v stroitel'stve [Chief Engineer in Construction]. – 2013. – No. 9. – Pp. 26–31. [in Russian]

4. Shekhovtsov G.A. Sovremennyye geodezicheskiye metody opredeleniya deformatsiy inzhenernykh sooruzheniy [Modern geodetic methods for determining the deformations of engineering structures] / G.A. Shekhovtsov, R.P. Shekhovtsova // – Nizhniy Novgorod : NNGASU, 2009. – 156 p. [in Russian]

5. Nikitin A.V. Sposob opredeleniya krena sooruzheniy tsilindricheskoy formy [A method for determining the roll of cylindrical structures] / A.V. Nikitin // Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]. – 2008. – Vol. 6. – Pp. 15–17. [in Russian]

6. Komissarov A.V. Sistemnoye predstavleniye lazernogo skanirovaniya [System representation of laser scanning] / A.V. Komissarov // Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]. – 2015. – № 7 – pp. 18-23. [in Russian]

7. Nikonov A.V. Issledovaniye tochnosti izmereniya rasstoyaniy elektronnyimi takheometrami v bezotrazhatel'nom rezhime [Investigation of the accuracy of measuring distances by electronic total stations in reflectorless mode] / A.V. Nikonov // Vestnik SGUGiT. – 2015. – Vol. 1(29). – Pp. 43–53. [in Russian]

8. Vdovenko A.V. Resheniye zadachi opredeleniya vertikal'nosti stroitel'nykh konstruksiy s pomoshch'yu sovremennykh tekhnologiy na primere chetyrekhgrannoy kolonny [Solving the problem of determining the verticality of building structures using modern technologies on the example of a tetrahedral column] / A.V. Vdovenko, V.A. Vdovenko, I.Y. Trofimov et al // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]. – 2021. – № 3-1(105). – Pp. 27-32. [in Russian]

9. SP 126.13330.2017 Svod pravil Geodezicheskiye raboty v stroitel'stve. – Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 24 oktyabrya 2017 g. N 1469/pr [Code of practice Geodetic works in building. – Approved. by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation of October 24, 2017 N 1469 / pr]. [in Russian]

10. Rukovodstvo po opredeleniyu krenov inzhenernykh sooruzheniy bashennogo tipa geodezicheskimi metodami [Guidelines for determining the heels of tower-type engineering structures by geodetic methods]. – Moscow : Stroyizdat, 1981. – 56 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.006>

**ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ROCK-EVAL
ДЛЯ ОЦЕНКИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИТИТАНАТОВ КАЛИЯ ПРИ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИПРОПИЛЕНА**

Научная статья

Жердецккий Н.А.¹, Гороховский А.В.² *

² ORCID: 0000-0002-4210-3169;

^{1,2} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

* Корреспондирующий автор (algo54[at]mail.ru)

Аннотация

С использованием пиролизического метода Rock-Eval исследовано влияние добавок полититаната калия (ПТК), модифицированного в водных растворах солей меди и хрома, на процессы термokatалитического крекинга вторичного полипропилена (ПП). Установлено, что все исследованные образцы (Cu/ПТК, Cr/ПТК (Cu,Cr)/ПТК) обладают каталитической активностью в процессе крекинга полипропилена, о чем свидетельствует снижение температуры максимального выделения углеводородов на 24-28°C. При этом, сопоставление данных, полученных методом Rock-Eval для термической и термokatалитической деструкции ПП, позволяет предположить, что исследованные титанаты оказывают каталитическое действие как на реакции дегидрогенизации, так и на реакции окисления. О первом свидетельствует увеличение количества коксового остатка, смещение максимума скорости выделения паров углеводородов в область более низких температур и снижение водородного индекса, а о втором – увеличение выхода CO и CO₂ и рост кислородного индекса.

Ключевые слова: полипропилен, катализаторы, каталитический крекинг, полититанат калия.

**APPLICATION OF THE PYROLYTIC ROCK-EVAL METHOD FOR EVALUATING THE CATALYTIC
ACTIVITY OF MODIFIED POTASSIUM POLYTITANATES IN POLYPROPYLENE DESTRUCTION**

Research article

ZHerdeckij N.A.¹, Gorohovskij A.V.² *

² ORCID: 0000-0002-4210-3169;

^{1,2} Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

* Corresponding author (algo54[at]mail.ru)

Abstract

The impact of potassium polytitanate supplements (PTS), modified in aqueous solutions of copper and chromium salts, on the processes of thermocatalytic cracking of recycled polypropylene (RP), has been studied using the pyrolytic Rock-Eval method. All tested specimens (Cu/PTC, Cr/PCC (Cu, Cr)/PTC) have been found to have catalytic activity during polypropylene cracking, as evidenced by a decrease in the maximum hydrocarbon emissions temperature of 24-28°C. At the same time, the comparison of data obtained by the Rock-Eval method for thermal and thermocatalytic destruction of PP suggests that the studied titanates have a catalytic effect on both dehydrogenation and oxidation reactions. The first factor is evident in the increase in the amount of coke residue, in the shift in the maximum rate of hydrocarbon vapour release to the lower temperature and the decrease in the hydrogen index, and the second is seen through the increase in the CO and CO₂ emissions and the growth of the oxygen index.

Keywords: polypropene, catalysts, catalytic cracking, potassium polytitanate.

Введение

Полимерные материалы широко применяются в инновационных продуктах в области строительства, медицины, техники, упаковки и т.д. Однако, инертность пластиковых отходов и долгий период их разложения в окружающей среде (450-500 лет) способствуют накоплению колоссального количества отходов.

Термокатализическая переработка полимеров является перспективным способом переработки полимерных отходов в ценные углеводородные продукты обогащенные изопарафиновыми и олефиновыми углеводородами, что позволяет рассматривать получаемые катализаты в качестве альтернативных моторных топлив.

Широкое применение и распространение пластиков в повседневной жизни обусловлено их относительно низкой плотностью и стоимостью, механической прочностью, устойчивостью в агрессивных средах [1]. Однако, большая часть произведённых полимеров находится на свалках и в окружающей среде, тем самым оказывая необратимые негативные воздействия на биогеоценозы [2]. Наиболее рациональным способом переработки полимеров являются термодеструктивные методы, которые позволяют получать в качестве продуктов углеводородные дистилляты, аналогичные по составу лёгкой, малосернистой нефти [3].

В качестве гетерогенных катализаторов крекинга полимеров чаще всего применяются цеолиты, алюмосиликаты, флюидизированные катализаторы FCC, цеолитные природные катализаторы (глинозёмы), оксиды алюминия Al₂O₃. Так, в качестве катализаторов используются протонированные цеолиты типа HZSM-5, ультрастабилизированный цеолит HUSY, цеолит типа морденит HMOR, цеолит H-β и цеолит H-Y [4], [5], [9], [10]. При этом, отличительной чертой цеолитных катализаторов является постепенное снижение их каталитической активности ввиду отложения кокса за счет протекания бимолекулярных реакций олигомеризации и конденсации олефинов в порах.

В работах [11], [12], [13] в реакциях каталитического крекинга была исследована каталитическая активность оксидов алюминия Al₂O₃, γ-Al₂O₃, силикагеля (SiO₂F₄), алюмосиликатов SAHA ([Al₂O₃] = 24,2 мас.%) и SALA ([Al₂O₃] = 13,2 мас.%). Наибольший выход дистиллятных продуктов в ходе крекинга полипропилена при 400 °C достигается на

алюмосиликатах: SALA – 86 мас.%, SAHA – 81 мас.%, выход жидких продуктов, по сравнению с термическим крекингом, увеличивается на 75 и 70 масс.%, соответственно. В то же время, оксиды алюминия и силикагель проявили незначительную каталитическую активность.

Общим свойством катализаторов крекинга полимеров, представленных в литературе, является высокая концентрация Льюисовских кислотных центров, хорошо развитая поверхность, мезопористая структура и термостабильность. Однако, технологии их гидротермального синтеза являются многостадийными, продолжительными и высокочувствительными. При этом, получаемые катализаторы отравляются при контакте с влагой, в условиях промышленных процессов и их необходимо периодически подкислять, путём введения хлорорганических соединений (обычно CCl_4); они также нуждаются в периодической активации и регенерации, путём прокалывания в температурном интервале 500 – 710 °C в восстановительной или инертной атмосфере.

Исходя из вышесказанного, поиск нового типа катализаторов крекинга вторичных полимеров представляется актуальной задачей.

В настоящее время отсутствуют сведения о применении полупроводниковых материалов в качестве катализаторов крекинга полимеров. Между тем, известно, что полупроводниковые катализаторы устойчивы к действию ядов [15], что особенно важно при крекинге полимеров, входящих в состав твердых коммунальных отходов.

Исследуемые в настоящей работе полититанаты калия и их производные, в отличие от цеолитных материалов, просты в синтезе, и недороги, относятся к широкозонным полупроводниковыми материалами. Модифицированные полититанаты калия типа Cu/ПТК, Cr/ПТК и (Cu,Cr)/ПТК являются нанокомпозитными материалами и, благодаря высокой удельной поверхности (100-130 м²/г) и наличию множественных гетеропереходов (*p-n* переходы), сформированных наночастицами оксидов меди и хрома, декорирующими поверхность чешуйчатых частиц ПТК являются высокоэффективными катализаторами, в частности – для окислительно-восстановительных процессов [16].

Таким образом, исследование каталитических свойств модифицированных полититанатов калия в условиях крекинга полимеров целесообразно и актуально.

С другой стороны, целью проведенного исследования было изучение возможности исследования процессов термического и термокаталитического крекинга полимерных материалов с помощью пиролитического метода Rock-Eval, широко распространенного для анализа горных пород, содержащих углеводороды (горючие сланцы, бурые угли и др.), и с использованием специально разработанного для этих целей калиброванного оборудования.

Методы и принципы исследования

В качестве сырья каталитического крекинга был выбран вторичный полипропилен (ПП). Полититанаты калия (ПТК) применялись в качестве катализаторов.

Порошки ПТК получали путём термической обработки (500 °C, 2 ч) смеси порошков TiO₂, KOH и KNO₃, взятых в массовых соотношениях 30:30:40 [16], [17]. Получаемый в результате синтеза полититанат калия промывали водой до получения значения водородного показателя водной дисперсии pH = 10,5, высушивали при температуре 50 °C в течение 10 часов и подвергались диспергированию в шаровой мельнице.

Измельчённые порошки ПТК модифицировались путем обработки в 0,02M водных растворах сульфатов меди (II) и хрома (III) с последующим фильтрованием, промывкой дистиллированной водой, высушиванием (50 °C, 4 ч) и диспергированием на шаровой мельнице [17].

Введение катализатора в образцы ПП проводили путём плавления вторичного полимера в муфельной печи при температуре 270 °C на воздухе в течение 30 минут с последующим введением в расплав ПТК в количестве 10 масс.%. Получаемый расплав гомогенизировался механической мешалкой и далее охлаждался до комнатной температуры. После отверждения полипропилен (смесь ПП с катализатором) механически измельчали в крошку и подвергали термодеструкции.

Процесс термодеструкции проводили и исследовали с использованием пиролитического метода Rock-Eval® [18], [19]. Анализ проводился на приборе Rock-Eval 6 Turbo (Vinci Technologies), в котором образец исследуемого материала последовательно помещается в печь пиролиза (проводится в потоке инертного газа, Ar), а затем в печь дожигания (проводится в атмосфере воздуха).

Навески образцов полимера или его смеси с катализатором общей массой 15–20 мг анализировались в режиме «Reservoir» [19]. Особенность данного режима заключается в проведении пиролиза в потоке аргона с предварительной изотермической выдержкой образцов в течение 10 минут при 180 °C. На этом этапе из пробы высвобождаются примеси лёгких углеводородов (в случае их присутствия) и адсорбированная влага, которые током инертного газа подаются в пламенно-ионизационный детектор и таким образом формируется пик S1r (мг УВ/г). Далее стадия пиролиза проводится при нагреве пробы в атмосфере инертного газа от 180 до 650 °C. Образующиеся в результате термического разложения углеводороды идентифицируются пламенно-ионизационным детектором. При этом формируется двойной пик S2a (мг УВ/г) и S2b (мг УВ/г), соответствующий количеству углеводородов, выделяющихся из образца в диапазоне температур от 180 до 350 °C (пик S2a) и в диапазоне 350–650 °C (пик S2b).

При прохождении пиролиза на приборе Rock-Eval 6 Turbo в режиме реального времени также проводится анализ выделяющихся в ходе пиролиза оксидов углерода (CO и CO₂). Для этого используются инфракрасные датчики регистрации. Регистрация CO и CO₂ на стадии пиролиза позволяет получить информацию о степени оголённости исследуемого объекта. Количество выделившихся оксидов углерода выражено в мг CO₂ и CO на 1 г образца, обозначаемым как S3(CO₂) и S3(CO), соответственно.

После стадии пиролиза образец автоматически переносится в печь окисления, где он нагревается до 850 °C на воздухе, что необходимо для дожигания остаточного углерода в образце. На этом этапе количество выделяющихся при сгорании остаточного углерода CO и CO₂ измеряется интерактивными инфракрасными (ИК) детекторами.

В геологических и геохимических исследованиях, при анализе пород, пики S1r соответствуют испарению низкомолекулярных соединений, содержащихся в пробе и имеющих температуру кипения ниже 180 °C, а пики S2b и

S2a – испарению паров углеводородов, образующихся при пиролизе углеводородных компонентов породы (сланцев, углей и др.) [18], [19].

С учетом того, что приготовление пробы ПП, содержащей 10% катализатора и подвергаемой каталитическому пиролизу на приборе Rock-Eval 6, проводилось при температуре 270 °С, пик S1г можно определить как результат испарения влаги, адсорбированной на измельченном порошке полимера, а пик S2a – как соответствующий количеству лёгких углеводородов, выделяемых в температурном диапазоне 270-350 °С. В то же время, пик S2b соответствует выделению углеводородов при термической деструкции (пиролизе) полипропилена в температурном интервале 350–650 °С.

Температура, соответствующая максимальной скорости выделения углеводородов при формировании пика S2b, обозначена как T_{\max} (°С).

Дополнительная стадия дожига в ходе термической обработки позволяет рассчитать значения водородного (НI, мг УВ/г С) и кислородного (ОI, мг CO₂/г С) индексов, а также долю в анализируемой пробе углерода, выделившегося при пиролизе в виде паров углеводородов (ТОС, масс. %), а также и остаточного углерода (CR, масс. %), содержащегося в образце после его выдержки в печи пиролиза и превратившегося в СО и СО₂ в печи дожига при последующей обработке. При этом, в расчетах учитывалась масса катализатора (10 масс.%) в предположении, химической стабильности ПТК/Ме в температурном диапазоне 25-650 °С [17].

Основные результаты и их обсуждение

Результаты исследования термического поведения образцов ПП, содержащих добавки (10 масс.%) различных потенциальных катализаторов полученные методом Rock-Eval представлены в таблице 1.

Как видим, во всех образцах присутствует адсорбированная влага (0,4 – 0,7 % от массы ПП), которые выделяются на начальной стадии термической обработки (изотермическая выдержка при 180 °С в течение 10 минут, пик S1г).

Пики S2a и S2b, показывают, что присутствие исследованных катализаторов несколько увеличивает выход продуктов пиролиза (углеводороды) в низкотемпературном диапазоне (180-350 °С) и снижает его в высокотемпературном диапазоне (350-650 °С).

Величина пиков S3(CO₂) и S3(CO) указывает на то, что использованные катализаторы способствуют протеканию реакции окисления ПП в низкотемпературном диапазоне (180-350 °С) (стадия пиролиза). Это подтверждает и увеличение значения общего кислородного индекса (ОI) рассчитанное методом Rock-Eval. При этом, наибольшую каталитическую активность в процессе окисления ПП проявляют медьсодержащие катализаторы исследованной системы.

Таблица 1 – Параметры пиролитического поведения ПП в присутствии различных потенциальных катализаторов пиролиза, полученных при модифицировании ПТК в водных растворах меди и хрома; содержание катализатора в образце ПП – 10 масс.%

Образец	Регистрируемый параметр									
	S1г	S2a УВ	S2b УВ	S3 CO ₂	S3 CO	T_{\max}	ТОС	CR	НI УВ	ОI CO ₂
	мг/г ПП					°С	масс.%		мг/г С	
ПП	4,5	10,8	957,2	3,4	24,1	468	97,0	3,0	986,9	3,5
ПП + Cu/ПТК	4,3	16,5	824,9	6,9	47,5	444	85,3	4,7	967,1	8,0
ПП + Cr/ПТК	3,8	15,5	827,2	4,5	49,0	440	86,8	3,2	953,4	5,1
ПП + Cu/ПТК,Cr	7,6	23,2	803,7	4,7	60,8	444	87,2	3,8	922,1	5,3

Однако, наиболее важным результатом является то, что исследованные модификации ПТК способствуют каталитическому крекингу полипропилена с выделением паров углеводородов при температурах выше 350 °С. Пик S2b, соответствующий максимальной скорости выделения паров углеводородов при пиролизе, в присутствии исследованных катализаторов смещается в область более низких температур. Значения T_{\max} снижается на 30–35 °С, при этом использование Cu/ПТК и (Cu, Cr)ПТК несколько более эффективно.

С другой стороны, присутствие исследованных катализаторов увеличивает образование кокса и смол (остаточный углерод после окончания пиролиза) и несколько снижает выход паров углеводородов, на что указывает увеличение значения параметра SR и снижение водородного индекса НI, а также общего количества газообразных соединений углерода (величина ТОС снижается от 97 до ~86 %).

Исходя из полученных результатов, можно предположить, что в ходе термокаталитической деструкции полимера в присутствии исследованных добавок катализаторов более высокую роль, в сравнении с аналогичными процессами, протекающими в их отсутствие, играют процессы дегидрогенизации, в результате которых образуются ненасыщенные углеводороды. Данное предположение подтверждается повышенным выходом кокса/смол в присутствии модифицированных полититанатов калия, так как известно, что к коксообразованию склонны ненасыщенные, циклические и ароматические углеводороды [20].

Согласно полученным результатам, все исследованные виды модифицированного полититаната калия обладают каталитической активностью в реакциях термического разложения полипропилена, при этом, предположительно, увеличивая выход ненасыщенных углеводородов, склонных к поликонденсации, о чем свидетельствует увеличение количества коксового остатка. Среди исследованных видов модифицированных полититанатов калия состав Cu/ПТК обладает более высокой каталитической активностью, обеспечивая наиболее высокий выход углеводородов – продуктов крекинга (имеет наибольшую величину водородного индекса).

Проведённые исследования позволили качественно оценить каталитическую активность модифицированных полититанатов калия в условиях крекинга полипропилена. В дальнейших исследованиях планируется проведение

каталитического крекинга ПП с использованием катализаторов группы ПТК/Ме на стендовых установках со сбором и анализом получаемых продуктов и их детальным анализом.

Заключение

В результате проведенных исследований нами установлено, что:

1. Пиролитический метод Rock-Eval применим для качественной оценки активности катализаторов в процессе каталитического крекинга полиолефинов.

2. Полититанаты калия (ПТК) модифицированные в водных растворах солей меди и хрома проявляют каталитическую активность в процессах пиролитической обработки полипропилена (ПП), проявляющуюся в снижении температуры наиболее эффективного протекания процесса термической деструкции ПП, а также изменении количества и характера образующихся продуктов.

3. Использование добавок катализатора состава Cu/ПТК, обеспечивает максимальный выход продуктов деструкции в форме углеводородов при минимальном выходе продуктов окисления, однако, увеличивает количество коксового остатка.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

- Singhabhandhu A. The waste-to-energy framework for integrated multi-waste utilization: waste cooking oil, waste lubricating oil, and waste plastics / A. Singhabhandhu, T. Tezuka // *Energy*. – 2010. – Vol. 35. – №. 6. – Pp. 2544–2551.
- Geyer R. Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law // *Sci. Adv.* – 2017. – Vol. 3. – №. 7. – P. e1700782.
- Ahmad I. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products / I. Ahmad, M. Khan, H. Khan et al // *Int. J. Green Energy*. – 2015. – Vol.12. – №. 7. – Pp. 663–671.
- Encinar J.M. Pyrolysis of synthetic polymers and plastic wastes. Kinetic study / J.M. Encinar, J.F.González // *Fuel Process. Technol.* – 2015. – Vol.89. – №.7. – Pp. 678–686.
- Marcilla A. Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions / A. Marcilla, M.I. Beltran, R. Navarro // *Appl. Catal. B*. – 2009. – Vol. 86. – №. 1–2. – Pp. 78–86.
- Artetxe M. Cracking of high density polyethylene pyrolysis waxes on HZSM-5 catalysts of different acidity / M. Artetxe, G. Lopez, M. Amutio et al // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2013. – Vol. 52. – №. 31. – Pp. 10637–10645.
- Serrano D.P. Influence of nanocrystalline HZSM-5 external surface on the catalytic cracking of polyolefins / D.P. Serrano, J. Aguado, J.M. Escola et al // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. – 2005. – Vol. 74. – Pp. 353–360.
- Aguado J. Catalytic conversion of polyolefins into fuels over zeolite beta / J. Aguado, D.P. Serrano, J.M. Escola et al // *Polym. Degrad. Stab.* – 2000. – Vol. 69. – №. 1. – Pp. 11–16.
- Elordi G. Effect of the acidity of the HZSM-5 zeolite catalyst on the cracking of high density polyethylene in a conical spouted bed reactor / G. Elordi, M. Olazar, M. Artetxe et al // *Appl. Catal. A*. – 2012. – Vol. 415. – Pp. 89–95.
- Aguado J. Analysis of Products Generated from the Thermal and Catalytic Degradation of Pure and Waste Polyolefins using Py-GC/MS / J. Aguado, D.P. Serrano, G. San Miguel. // *J. Polym. Environ.* – 2007. – Vol. 15. – №. 2. – Pp. 107–118.
- Caldeira V.P.S. Properties of hierarchical Beta zeolites prepared from protozeolitic nanounits for the catalytic cracking of high density polyethylene / V.P.S. Caldeira, A. Peral, M. Linares et al // *Appl. Catal. A*. – 2017. – Vol.531. – P.187–196.
- Rodriguez E. Co-cracking of high-density polyethylene (HDPE) and vacuum gasoil (VGO) under refinery conditions / E. Rodriguez, A. Gutierrez, R. Palos et al // *Chem. Eng. J.* – 2020. – Vol.382. – Pp.122–602.
- Uddin M.A. Thermal structurally and catalytic degradation of different types of polyethylene into fuel oil / M.A. Uddin, K. Koizumi, K. Murata et al // *Polym. Degrad. Stab.* – 1997. – Vol. 56. – №. 1. – Pp. 37–44.
- Erkiaga A. HDPE pyrolysis-steam reforming in a tandem spouted bed-fixed bed reactor for H₂ production / A. Erkiaga, G. Lopez, I. Barbarias et al // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. – 2015. – Vol. 116. – Pp. 34–41.
- Védrine J.C. Heterogeneous Catalysis on Metal Oxides / Védrine J.C. // *Catalysts*. – 2017. – Vol. 7. – №. 11. – Pp. 341.
- Tretyachenko E.V. Adsorption and photo-catalytic properties of layered lepidocrocite-like quasiamorphous compounds based on modified potassium polytitanates / E.V.Tretyachenko, A.V.Gorokhovskiy, G.Yu.Yurko et al // *Particology*. – 2014. – Vol. 17. – Pp.22–28.
- Gorokhovskiy A.V. Modified amorphous layered titanates as precursor materials to produce heterostructured nanopowders and ceramic nanocomposites / A.V. Gorokhovskiy, E.V. Tretyachenko, J.I. Escalante-Garcia et al // *J. Alloy. Compd.* – 2014. – Vol.586. – Pp. S494–S497.
- Sanei H. Petrological changes occurring in organic matter from Recent lacustrine sediments during thermal alteration by Rock-Eval pyrolysis / H. Sanei, L.D. Stasiuk, F. Goodarzi // *Org. Geochem.* – 2005. – Vol. 36. – №. 8. – Pp. 1190–1203.
- Romero-Sarmiento M.-F. Polymer quantification using the Rock-Eval® device for identification of plastics in sediments / M.-F. Romero-Sarmiento, H. Ravelojaona, D. Pillot et al // *Sci. Total Environ.* – 2022. – Vol. 807. – P. 151068.
- Van Speybroeck V. Modeling elementary reactions in coke formation from first principles / V. Van Speybroeck, K. Hemelsoet, B. Minner et al // *Mol. Simulation*. – 2007. – Vol.33. – №. 9–10. – P. 879–887.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.001>

**ПЕРЦЕПТИВНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАТТЕРНЫ – СПОСОБ БЫСТРОГО ТРЕКИНГА ЗРАЧКА
НА ОСНОВЕ ОТКЛИКА ANN-MLP ПЕРСЕПТРОНА И МОДИФИЦИРОВАННОГО
ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ**

Научная статья

Грушко Ю.В.*

ORCID: 0000-0002-3663-0018,

Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

* Корреспондирующий автор (neuralpill[at]gmail.com)

Аннотация

В статье предлагается быстрая и точная модель регистрации и трекинга зрачка глаза «RAPID-AN» в задаче видеоокулографии для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом (слабые персональные компьютеры, встраиваемые системы на базе архитектуры ARM) с целью снижения стоимости технологии для индивидуального использования людьми с ограниченными возможностями здоровья и медицинскими учреждениями. В основу модели легла идея представления процесса регистрации зрачка в кадре (поиск координат центра и размера региона, наиболее полно аппроксимирующего зрачок) как задачи глобальной многомерной оптимизации. Целевая функция формализована как значение отклика ANN-MLP перцептрона над интегральными паттернами, в яркостном смысле схожими со структурой искомого объекта (зрачок-радужка) – концепция перцептивных интегральных паттернов. С целью улучшения сходимости к экстремуму предложена модификация метода дифференциальной эволюции, в основе которой лежит процесс формирования генетических изоляций популяции решений в окрестностях всех локальных и глобальных экстремумов целевой функции, с последующим ростом наиболее приспособленной изоляции (рядом с глобальным экстремумом) и вырождением иных, в соответствии с дифференциальным уравнением Ферхюльста-Пирла. Данное поведение делает метод поиска менее «жадным» и дает возможность корректно выделять зрачок из полного кадра.

Модель решает задачу регистрации зрачка с ошибкой не более 1 – 2% на тестовых датасетах и высокой скоростью ~ 8,35 мс. в режиме трекинга на архитектуре BCM2837 ARM Cortex-A53 1200 МГц (встраиваемые системы).

Проведен сравнительный анализ и показана эффективность модели в сравнении с некоторыми существующими детекторами: сверточные нейронные сети архитектуры Tiny Yolo v3, метод Виолы-Джонса (Хаар-Каскады) и др.

Ключевые слова: видеоокулография, нейронная сеть, дифференциальная эволюция, детектор.

**PERCEPTUAL INTEGRAL PATTERNS AS A METHOD FOR RAPID PUPIL TRACKING
BASED ON ANN-MLP PERCEPTRON RESPONSE AND A MODIFIED NUMERICAL METHOD
OF DIFFERENTIAL EVOLUTION**

Research article

Grushko Yu.V.*

ORCID: 0000-0002-3663-0018,

Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

* Corresponding author (neuralpill[at]gmail.com)

Abstract

The article offers a fast and accurate model of registration and tracking of pupils «RAPID-AN» in the task of video-oculography for devices with a limited computing resource (weak personal computers, embedded systems based on ARM architecture), to reduce the technology cost for individual use by disabled people and by health facilities. The model was based on the idea of the pupil registration process in the frame (finding the center coordinates and the region size most fully capturing the pupil) as a global, multifaceted optimization task. The target function is formalized as the meaning of ANN-MLP response perceptor over integral patterns, in a vivid sense similar to the desired object structure (pupil-iris) – the concept of perceptual integral patterns. In order to improve the convergence to extremum, a modification of differential evolution method is proposed, based on the process of forming the genetic isolation of solutions population in the vicinity of all local and global extremes of the target function, with subsequent growth of the most adapted insulation (next to the global extremum) and the degeneration of others, according to the Verhulst-Pierre differential equation. This behavior makes the search method less «greedy» and makes it possible to correctly extract a pupil from the full frame.

The model solves the problem of pupils registration with an error of not more than 1 – 2% on test datasets and a high speed of ~ 8.35 ms. in tracking mode on the architecture of BCM2837 ARM Cortex-A53 1200 MHz (embedded systems).

The comparative analysis was conducted, and performance of the model in comparison with some existing detectors was shown: Tiny Yolo v3, Viola-Jones (Haar-Cascade) method, etc.

Keywords: video-oculography, neural net, differential evolution, detector.

Введение

Видеоокулография (ВОГ, айтрекинг) – это неинвазивная технология отслеживания положения глаз, имеющая широкое теоретическое и практическое значение: включая медицинские исследования в офтальмологии, мониторинге фотореакции в нейрореанимации посредством пупиллометрии [1], экспресс диагностике наркотической, алкогольной и промышленной интоксикации [2], в наשלемных системах индикации военно-воздушных сил, а также в биометрических системах идентификации по радужке (где первым этапом является поиск зрачка в кадре).

Наиболее актуальной задачей является разработка доступных аппаратно-программных комплексов альтернативной

аугментативной коммуникации (АПК ААК) с использованием ВОГ для медицинских учреждений, реабилитационных центров, людей с болезнями двигательного нейрона и другими заболеваниями центральной нервной системы (ЦНС), такими как латеральный амиотрофический склероз (БАС) МКБ-10 G12, диплегия G 80.1, спинальная мышечная атрофия G12.1, синдром запертого человека G83 и другие.

У пациентов с вышеперечисленными синдромами наблюдается полная потеря речи (афазия), паралич бульбарной и мимической мускулатуры, тетраплегия (потеря функций конечностей), при полной сохранности сознания. При этом остается возможность коммуникации с пациентами с помощью движения глаз.

Так на момент 2016 года было завершено проведение крупного исследования журналом Lancet, показывающего, что только больных с БАС на 2016 г. насчитывается ~ 330 918 человек, а также намечен прирост заболеваемости на 100 000 населения на 4 – 5% за последние 26 лет [3]. Распространенность диплегии в России приходится в среднем от 1.5 – 4 на 1000 новорожденных [4], не говоря про другие заболевания ЦНС, что делает разработку методов трекинга и доступных систем ААК, с использованием ВОГ, актуальной задачей.

Этап регистрации и трекинга зрачка в существующих алгоритмах занимает значительное время и вычислительные ресурсы, требует высокопроизводительного специализированного оборудования (например, Tobii Dynavox), что делает данную технологию недоступной для большинства медицинских учреждений и индивидуального использования пациентами.

Так существующие методы, используемые в ВОГ, можно разбить на несколько классов.

Методы, основанные на пороговой сегментации и математической морфологии, имеют невысокую точность, но вычислительно просты и в своей основе опираются на тот факт, что при использовании инфракрасной (ИК) подсветки, расположенной параллельно оптической оси видеоокулографа, зрачок в кадре становится самой темной областью в кадре (используется в пупиллометрах Neuroptics DP-2000, NPi). Проводится бинаризация кадра. Как результат образуется наибольшее связанное множество точек, яркости которых ниже порога [5]. Лишние объекты, оставшиеся после сегментации: ресницы, темные области на роговице удаляются операторами эрозии (только в том случае, если сгущения ресниц не сливаются со зрачком в одну связанную компоненту, и они меньше зрачка), а оставшаяся область зрачка наращивается морфологической дилатацией с тем же количеством итераций и ядром. В случае попадания бликов на границу зрачка вычисляются минимальные выпуклые оболочки (например, методом Джарвиса), после находится центр масс контура [6]. В [7] используется адаптивная бинаризация на основе исследования процентильной функции. Не менее интересные техники основаны на применении рекурсивной эрозии [8] и морфологической обобщенной функции расстояния. Данные подходы не учитывают особенность функционирования зрительного аппарата – процессы миоза и мидриаза зрачка при ИК-подсветке глаза, что существенно уменьшает их точность.

Методы на основе исследования гранично-ступенчатой модели изображения: преобразования Хафа и модификации [9], RANSAC, Starburst [10], ElSe [11], Swirski [12]. Интуитивный адаптивный метод на основе исследования энтропии градиентов краевых сегментов [13]. Класс обладает хорошей точностью, так преобразование Хафа устойчиво к утере части границы зрачка. Поиск происходит в трехмерном пространстве – центр и радиус зрачка или множество его граничных точек. Недостаток данного класса – большая вычислительная сложность. Методу на основе построения оптимального кругового пути [8] необходимо знать начальную точку, которая должна находиться внутри области интереса зрачка.

Методы, основанные на пространственной свертке и корреляции [12], [14] имеют большую вычислительную сложность, не устойчивы к паразитному освещению, но обладают свойством поиска по определенному паттерну или части изображения. Такие методы в большинстве случаев не нуждаются в использовании ИК-подсветки глаза, что является преимуществом без использования дополнительного оборудования. Наиболее быстрой моделью можно назвать алгоритм Виолы-Джонса [15], основанный на свертках с признаками Хаара (над интегральным представлением изображения), значение которых поступают в каскадный классификатор для принятия решения относительно нахождения объекта.

Применяя сверточные (Yolo) [6] или генеративно-состязательные нейронные сети (U-net, Seg-net) в задаче ВОГ [16] можно добиться высокой точности, учитывая индивидуальные особенности строения зрительного аппарата пациента (например, в случае колобомы радужной оболочки). У сверточных моделей есть большой недостаток – они вычислительно сложны по причине наличия большого числа сверточных фильтров, выделяющих признаки на гранично-ступенчатой модели изображения. Так для достижения 30 FPS для передовой Tiny Yolo, необходимы ресурсы карты GPU Pascal Titan X. Также большинство моделей имеют достаточно сложный жизненный цикл обучения, что потребует работы профильного специалиста в области машинного обучения, увеличивая затраты на использование ВОГ.

В данной работе делается попытка учесть достоинства и недостатки вышеперечисленных методов. Решается задача быстрого и точного выделения зрачка глаза в кадре в условиях ограниченных вычислительных ресурсов (слабые ПК, смартфоны, встраиваемые системы на базе архитектуры ARM) с целью снижения стоимости технологии для индивидуального использования людьми с ОВЗ, медицинскими учреждениями и реабилитационными центрами.

В основу модели легла идея представления процесса регистрации зрачка в кадре – поиск координат центра и размера региона, наиболее полно аппроксимирующего зрачок, как задачи глобальной многомерной оптимизации и ее решение метаэвристическим численным методом дифференциальной эволюции.

Для повышения точности детектирования в качестве целевой функции предлагается использовать значение отклика многослойного перцептрона (ANN-MLP сеть) над интегральными паттернами, в яркостном смысле схожими со структурой искомого объекта (структура зрачок-радужка).

Формализация задачи регистрации зрачка

Будем считать регионом интереса зрачка (ROI) сегментированную область кадра, представляющую зрачок с окружающей его радужной оболочкой.

Правильно найденный ROI зрачка позволит:

1) снизить вычислительные затраты алгоритмов ВОГ – вычислительная сложность уменьшится пропорционально отношению размера кадра к размеру региона;

2) правильно определить величину порога для адаптивной сегментации зрачка (выделения точек зрачка из ROI), «исключая» диапазоны яркости, не принадлежащие зрачку (отсутствует необходимость в анализе гистограммы всего кадра);

3) исключить «шумовые» граничные точки областей, не относящихся к зрачку, что актуально в случае дальнейшего применения методов исследующих гранично-ступенчатую модель изображения;

4) успешно использовать алгоритмы, для которых необходимо или желательно (Starburst, AIPF, [17]) знать начальную точку, принадлежащую компоненте зрачка.

5) радикально ускорить преобразование Хафа за счет уменьшения радиуса области поиска при найденных параметрах ROI.

Так как здоровый зрачок представляет из себя компактную область эллиптической/круглой формы и содержит пиксели, интенсивности которых ниже, чем окружающая его радужная оболочка, а приблизительное соотношение размера зрачка к радужной оболочке составляет 1/3 (средний размер радужки 12 мм., зрачка – 3.25-5 мм.), одновременно учесть все параметры поможет поиск по паттерну.

При разработке алгоритма приходилось учитывать физиологические особенности зрительного аппарата человека: реактивность, миоз – сжатие зрачка (не более 1.1 мм.), как реакция на свет и мидриаз – его расширение (до 8 мм.).

Пусть дан трехканальный кадр $F(u)$, а R, G, B – красный, зеленый и синий каналы соответственно (двумерные матрицы), тогда воспользуемся взвешенным методом $f(u) = 0.299R(u) + 0.587G(u) + 0.114B(u)$ для перевода $F(u)$ в градации серого $f(u)$.

Чтобы определить параметры региона интереса зрачка $f_{roi}(u)$ ($u = (u_1, u_2)$ – точка в двумерном пространстве на изображении) располагающегося в $f(u)$ размером $N \times M$, предлагается дескриптор, однозначно выделяющий точки центра зрачка и его размера из точек изображения.

Перцептивный интегральный паттерн – дескриптор, состоящий из окна поиска w , описываемого точкой τ (τ_1, τ_2 – центр, τ_3 – размер), разделенного на k сегментов таким образом, чтобы наиболее полно аппроксимировать структуру искомого объекта в яркостном смысле, и ANN-MLP нейросети (многослойный перцептрон), принимающей на вход нормализованный вектор значений интенсивностей сегментов окна w . MLP сеть осуществляет задачу бинарной классификации т.е. нейрон выхода возвращает степень уверенности в диапазоне $[0, 1]$, где 1 – соответствует наилучшему положению и размеру (точки экстремума τ^*) паттерна над зрачком (или другим искомым объектом).

Вектор интенсивностей сегментов паттерна можно вычислить, используя интегральную матрицу

$$\delta_{int}(u) = \sum_{i=0, j=0}^{i \leq \tau_1, j \leq \tau_2} f_{brd}(u) \text{ от } f_{brd}(u), \text{ где } f_{brd}(u) \text{ – кадр } f(u) \text{ с реплицированными паддингами размера } \sigma = R_{max} / 2,$$

где R_{max} – максимально допустимый размер поиска объекта. Репликация используется для корректного расчета значения паттерна на краях кадра. Одной из особенностей интегральной матрицы является возможность очень быстро вычислять значение суммарной интенсивности произвольного сегмента паттерна минимум за 3 операции.

Пусть имеется паттерн в точке τ , который разбит на $k=9$ сегментов, расположенных в виде сетки. Тогда вычисление вектора интенсивностей ℓ^τ можно описать Алгоритмом 1.

В случае использования паттернов с более сложной структурой (не в форме сетки), применение вложенных циклов будет невозможно, в этом случае необходимо воспользоваться формулой, представленной в 7-й строке алгоритма, для расчета интенсивностей каждого сегмента отдельно.

Сформировав вектор, передадим его на входной слой MLP сети, которая определит, есть ли над паттерном зрачок.

Алгоритм 1 – Вычисление вектора интенсивностей

$$1: \bar{x} \leftarrow \tau_1 - \frac{\tau_3}{2}, \bar{y} \leftarrow \tau_2 - \frac{\tau_3}{2}, s \leftarrow \frac{\tau_3}{\sqrt{k}}$$

$$2: i \leftarrow 0, \max \leftarrow 0$$

$$4: \text{For } y \leftarrow \bar{y} \text{ to } y < \bar{y} + \tau_3 - s \text{ step } y \leftarrow y + s \text{ do}$$

$$5: \quad \text{For } x \leftarrow \bar{x} \text{ to } x < \bar{x} + \tau_3 - s \text{ step } x \leftarrow x + s \text{ do}$$

$$6: \quad \quad d \leftarrow (x, y), u \leftarrow (x + s, y), p \leftarrow (x + s, y + s), q \leftarrow (x, y + s)$$

$$7: \quad \quad \ell_i^\tau \leftarrow \delta_{int}(d) + \delta_{int}(p) - \delta_{int}(u) - \delta_{int}(q) \quad \triangleright \text{Вычисление интенсивности сегмента}$$

$$8: \quad \quad \text{If } \ell_i^\tau > \ell_{max} \text{ then}$$

$$9: \quad \quad \quad \max \leftarrow \ell_i^\tau$$

$$10: \quad \quad i \leftarrow i + 1$$

$$11: \text{For } i \leftarrow 0 \text{ to } i < k \text{ step } i \leftarrow i + 1 \text{ do}$$

$$12: \quad \quad \ell_i^\tau \leftarrow \frac{\ell_i^\tau}{\ell_{max}^\tau} \quad \triangleright \text{Нормализация по наибольшему значению вектора}$$

Представим задачу поиска региона, наиболее полно аппроксимирующего зрачок, как задачу максимизации отклика ANN-MLP над паттерном в τ :

$$\tau^*: MLP(\ell^{\tau^*}) = \max_{\tau} MLP(\ell^{\tau}) \in [0,1] \quad (1)$$

где τ^* – точка глобального максимума, описывающая найденный регион зрачка $f_{roi}(u)$ в кадре, ℓ^{τ} – нормализованный вектор интенсивностей сегментов паттерна в точке (нормализация убирает взаимосвязь между размером окна паттерна и значениями интенсивностей) MLP – многослойный перцептрон.

В таблице 1 представлена структура сети, для задачи (1).

Таблица 1 – Структура ANN-MLP для рассматриваемой задачи

Слой	Размер	Функция активации	Входящие веса
Flatten-слой, преобразует 2D матрицу w в 1D вектор + нормализация	9	нет	
Входной слой			
Полносвязный скрытый слой 1	15	ReLU	150
Полносвязный скрытый слой 2	5	Softmax (вероятностное распределение от 0 до 1)	80
Выходной слой, диапазоне $[0,1]$	1	нет	6

Примечание: количество тренируемых параметров – 236 (совместно с bias-весами)

Увеличение размеров первого скрытого слоя уменьшило влияние сигналов входа друг на друга, а также увеличило количество тренируемых весовых коэффициентов, что положительно сказалось на точности работы сети.

Модель разработана и обучена в библиотеке Keras на языке Python 3.10, и затем переведена на C++17 в формат.model (использовался keras2cpp модуль [18]) для использования в режиме реального времени.

В лаборатории КамГУ им. Витуса Беринга были разработаны обучающие и тестовые выборки из видеорядов: изображения глаз в инфракрасном диапазоне (IR) и в видимом диапазоне (NIR). Сами выборки представлены в виде текстовых файлов с наборами векторов вида $\bar{\ell} = [\ell, P]$ размером $k+1$, где P – вероятность принадлежности вектора зрачку (0 или 1).

В качестве видеоокулографов, для создания выборок, использовались: Web-камера (0.3 МП, 30 Гц), с удаленным ИК-фильтром, и двумя SMD ИК-диодами (ближнего спектра ~940 нм. подключенные параллельно через резисторы номиналом 120 Ом к VCC и GND каналам камеры) для регистрации методом темного зрачка; камера смартфона 8 МП – регистрация зрачка в видимом спектре.

На рисунке 1 продемонстрированы графики обучения нейросети для (1).

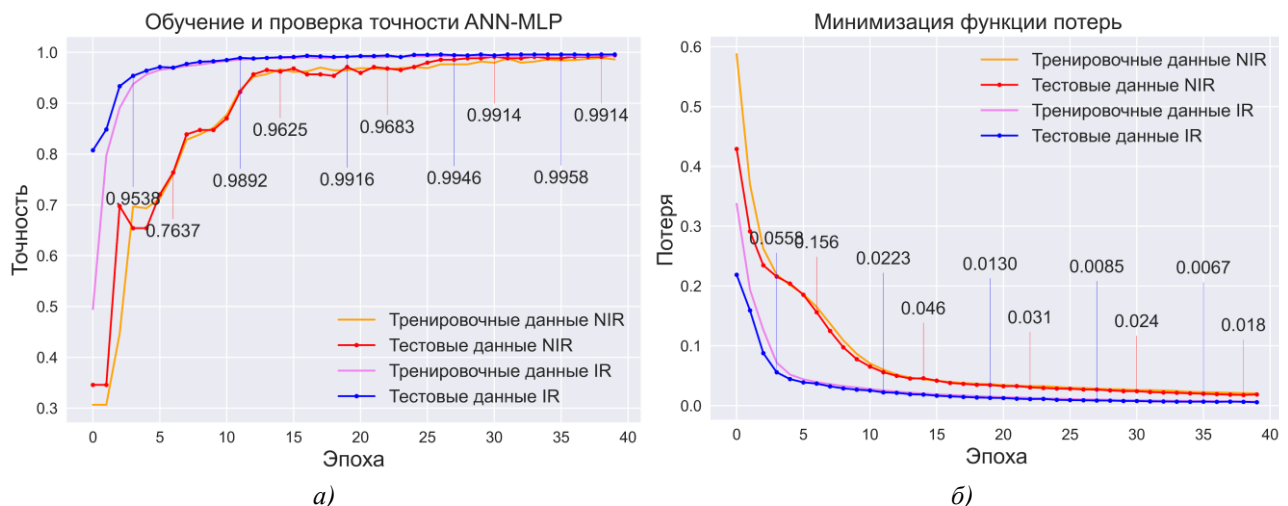


Рис. 1 – Процесс обучения ANN-MLP для поиска зрачка с помощью перцептивных интегральных паттернов: а – график точности распознавания на тренировочных и тестовых наборах данных; б – ошибка распознавания

Для итеративного обновления весов сети на обучающих данных был использован алгоритм Adam показавший высокую эффективность [19] в задачах глубокого обучения. При обучении сети выполняется минимизация функции потерь, в качестве которой выступила бинарная кросс-энтропия:

$$H_p = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell_{i,k+1} \log(p(\bar{\ell}_{i,k+1})) + (1 - \bar{\ell}_{i,k+1}) \log(1 - p(\bar{\ell}_{i,k+1})),$$

где $\bar{\ell}_{i,k+1}$ – крайний элемент i -го вектора выборки, означающий реальную вероятность (1 – паттерн, описываемый вектором точно над зрачком, 0 – в противном случае), $p(\bar{\ell}_{i,k+1})$ – прогнозируемая вероятность, N – размер выборки. На каждую эпоху, в процессе обучения, используется по 15 векторов из тренировочной части выборки (размер батча). Как видно, в процессе обучения средняя ошибка снижается (ось «Потеря»), в то время как точность распознавания (ось «Точность») доходит до ~99.5%.

Кривые точности тестовых датасетов хорошо аппроксимируют кривые тренировочных (не уходя вниз), показывая отсутствие переобучения сети – ситуаций, когда построенная модель хорошо прогнозирует примеры из обучающей выборки, но не работает на примерах из тестовых выборок.

Для выбора методики решения поставленной задачи, необходимо произвести полный расчет целевой функции (просчитать куб, по всем трем измерениям) на изображениях глаз, взятых из баз CASIA-IrisV4 [20] Института автоматизации Китайской академии наук и LPW [21]. Анализ (1) представлен в таблице 2.

Примеры проекций целевых функций (в точке максимума) по оси τ_3 представлены на рисунке 2 (изображения созданы в Matplotlib и Python 3.10).

Таблица 2 – Характеристика целевой функции (1)

Характеристика (1)	Интерпретация в рассматриваемой задаче
Нелинейная	Значение функции формируется нелинейной моделью нейросети; содержание кадра изменяется во времени; наличие аддитивного Гауссова шума.
Многомерная	Поиск региона осуществляется по 3-м координатам, центр и его размер. Размерность: $\tau_1 \in [0, 640]$, $\tau_2 \in [0, 480]$, $\tau_3 \in [0, 240]$
Мультимодальная	Локальные экстремумы в областях бровей, сгущений ресниц, если модель недостаточно хорошо обучена (рисунок 2б);
Недифференцируемая, дискретная	Представлена набором конечных значений в пикселях, взять производную возможно только конечно-разностными схемами.
Малое пространство допустимых решений	В случае если модель сети однозначно выделяет зрачок в кадре возникает проблема – множество точек, описывающих центр и размер искомого объекта существенно мало в сравнении с исходным кадром (рисунок 3в).
Принимаемая область значений экстремума	Будем считать, что регион со зрачком даст отклик в диапазоне $[0.85, 1]$

Сравнительный анализ метаэвристик в задаче регистрации зрачка

Для решения (1) воспользуемся метаэвристическими численными методами глобальной оптимизации. Были изучены и протестированы: дифференциальная эволюция (ДЭ) [22], [23], метод имитации отжига (МИО) [24], [25], [26], генетические алгоритмы (ГА) [27], [28], метод роя частиц (МРЧ) [29]. Рассмотрены работы [30], [31], а также проведен сравнительный анализ к исходной задаче, в результате чего выбран наиболее оптимальный – метод ДЭ.

Дифференциальная эволюция – метод стохастической многомерной глобальной оптимизации, моделирующий процессы мутации, кроссовера и селекции особей в популяции.

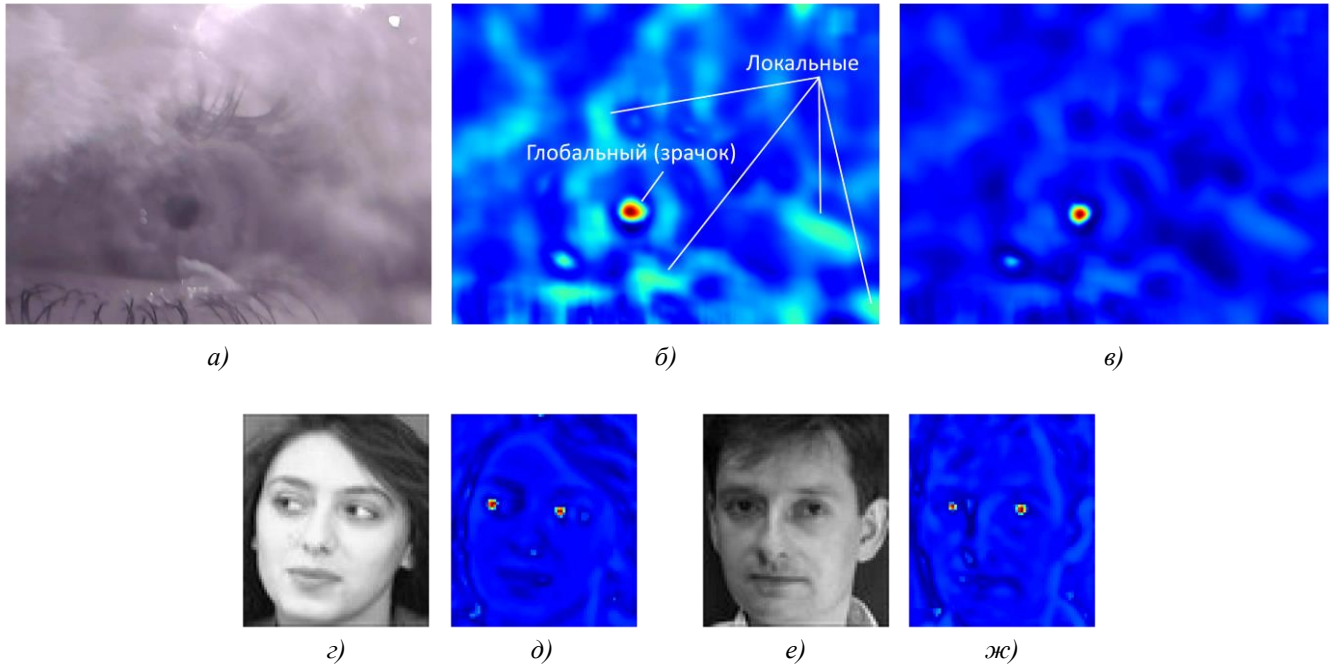


Рис. 2 – Примеры проекций целевых функций:

a – кадр из видеопотока базы LPW; *б* – проекция целевой функции в максимуме $\tau_3 = 118$, генерируемая сетью на 15 эпохе обучения (~96% точности); *в* – на 40 эпохе (~99%); *г*, *е* – тестовые изображения из базы ORL; *д*, *ж* – проекции функции в $\tau_3 = 11$

В процессе исследования ДЭ удалось выявить основные преимущества, благодаря которым метод можно использовать в (1): быстрдействие; робастность; надежность в исследовании нелинейных, мультимодальных функций, без знания пространства поиска (функция зависит от изображения);

Пусть требуется решить (1), исходная популяция решений состоит из n индивидов, $n \geq 3$, а пространство поиска 3-х мерное. Тогда популяция t -го поколения описывается множеством $\zeta(t) = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$, где τ_i – возможное решение, характеризующееся набором генов $\tau_i = (\tau_{i,1}^t, \tau_{i,2}^t, \tau_{i,3}^t)$.

ДЭ на каждой итерации включает три процесса: мутацию, кроссинговер и селекцию наилучшей особи.

В мутации для каждого целевого τ_i^t из $\zeta(t)$ выбираются 2 случайные особи: $\tau_{r_1}^t, \tau_{r_2}^t$ такие, что $\tau_{r_1}^t \neq \tau_{r_2}^t$. С помощью целевого и двух случайных векторов образуется новый вектор мутации v_i^t .

Для применения в практических целях метод должен находить решение с вероятностью близкой к единице (для построения корректных пупиллограмм, управлении ПК взглядом и др.). В случае с ДЭ вероятность сходимости к глобальному максимуму возрастает при увеличении n . С другой стороны, увеличение популяции замедляет скорость сходимости, а соответственно нахождения региона, чего нельзя допустить на устройствах со слабым вычислительным ресурсом (смартфоны, микропроцессорные архитектуры).

Чтобы получить высокую вероятность нахождения глобального решения на мультимодальной функции, сохраняя приемлемую сходимость, предлагаются новые модели мутации, кроссинговера и селекции. Обозначим предложенную модификацию, как стратегию поиска наиболее приспособленной генетической изоляции (Strategy for Finding the most Adapted Genetic Isolation – SFAGi) и формально зададим ее как систему, используя дифференциальное уравнение модели ограниченного роста популяций – Ферхюльста-Пирла [32]:

$$\begin{cases} v_i^t = \left(1 - \frac{P(t)}{n}\right) \tau_i^t + \frac{P(t)\tau_{best}^t}{n} + \xi(\tau_{r_1}^t - \tau_{r_2}^t) \\ \frac{dP(t)}{dt} = \gamma P(t) \left(1 - \frac{P(t)}{n}\right), \quad P(t=0) = P_0, \end{cases} \quad (2)$$

где P – размер изоляции в момент времени t , P_0 – начальный размер изоляции. Аналитическое решение дифференциального уравнения из системы (1) находится путем разделения переменных и интегрирования:

$$\int \frac{dP(t)}{P(1 - P(t)/n)} = \int y dt$$

Поскольку левая часть может быть представлена как:

$$\frac{1}{P(1-P/n)} = \frac{n}{P(n-P)} = \frac{1}{P} + \frac{1}{n-P}$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} \int \frac{dP}{P} + \int \frac{dP}{n-P} &= \int \gamma dt \\ \ln|P| - \ln|n-P| &= \gamma t + C \\ \ln \left| \frac{n-P}{P} \right| &= -\gamma t - C \\ \frac{n-P}{P} &= A e^{-\gamma t} \quad (A = \pm e^{-C}) \end{aligned}$$

Отсюда мы получаем:

$$P(t) = \frac{n}{1 + \left(\frac{n-P_0}{P} \right) e^{-\gamma(t-\eta)}}. \quad (3)$$

Тогда окончательный вид модели мутации, используемый в программном комплексе видеоокулографии, учитывая (2) и (3), записывается как:

$$v_i^t = \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\gamma(t-\eta)}} \right) \tau_i^t + \frac{\tau_{best}^t}{1 + e^{-\gamma(t-\eta)}} + \xi(\tau_{r1}^t - \tau_{r2}^t) = \frac{\tau_{best}^t + \tau_i^t e^{\gamma(\eta-t)}}{1 + e^{\gamma(\eta-t)}} + \xi(\tau_{r1}^t - \tau_{r2}^t), \quad (4)$$

где η – специально включенный коэффициент, задающий время эволюции изоляций (задержка по оси ОХ), γ – удельная скорость роста наилучшей генетической изоляции (Мальтузианский параметр), τ_{best}^t – лучшее найденное положение всей популяцией за t итераций, ξ – сила мутации, амплитуда возмущений, вносимых в генофонд.

В предлагаемой модели, в силу ее стохастической природы, размер наилучшей изоляции задается в виде коэффициента передачи в диапазоне $[0;1]$, где 1 – максимально достигнутая емкость изоляции равная n , а 0 – полное отсутствие особей в изоляции (или очень малое количество особей, попавших в окрестность максимума во время начального распределения).

Первый этап (4) – исследовательский поиск, отвечает за появление генетических изоляций в зависимости от ландшафта функции, т.е. изоляции формируются вокруг всех экстремумов, как локальных, так и глобальных (рисунок 5). С течением η , каждая из изоляций динамически моделирует особенности рельефа функции (так называемого ландшафта приспособленности), подстраивая под них распределение «внутреннего» источника энтропии $\xi(\tau_{r1}^t - \tau_{r2}^t)$, в процессе чего находится наилучшее решение по каждой из изоляций, что исключает «жадность» алгоритма и схождение к локальным решениям.

Второй этап (4) отвечает за динамику роста γ наиболее приспособленной генетической изоляции. Изоляция, имеющая наибольшее значение целевой функции, с течением времени начинает расти, тогда как другие, менее приспособленные – вырождаются. Увеличение популяции решений в наиболее приспособленной изоляции дает более детальный поиск в окрестности $\max_{\tau} MLP(\ell^{\tau})$, а следовательно, и более точную сходимости, в отличие от классической интерпретации ДЭ, что актуально в условиях малого размера начальной популяции.

Модель мутации ведет себя нелинейно (рисунок 3а, б, рисунок 4).

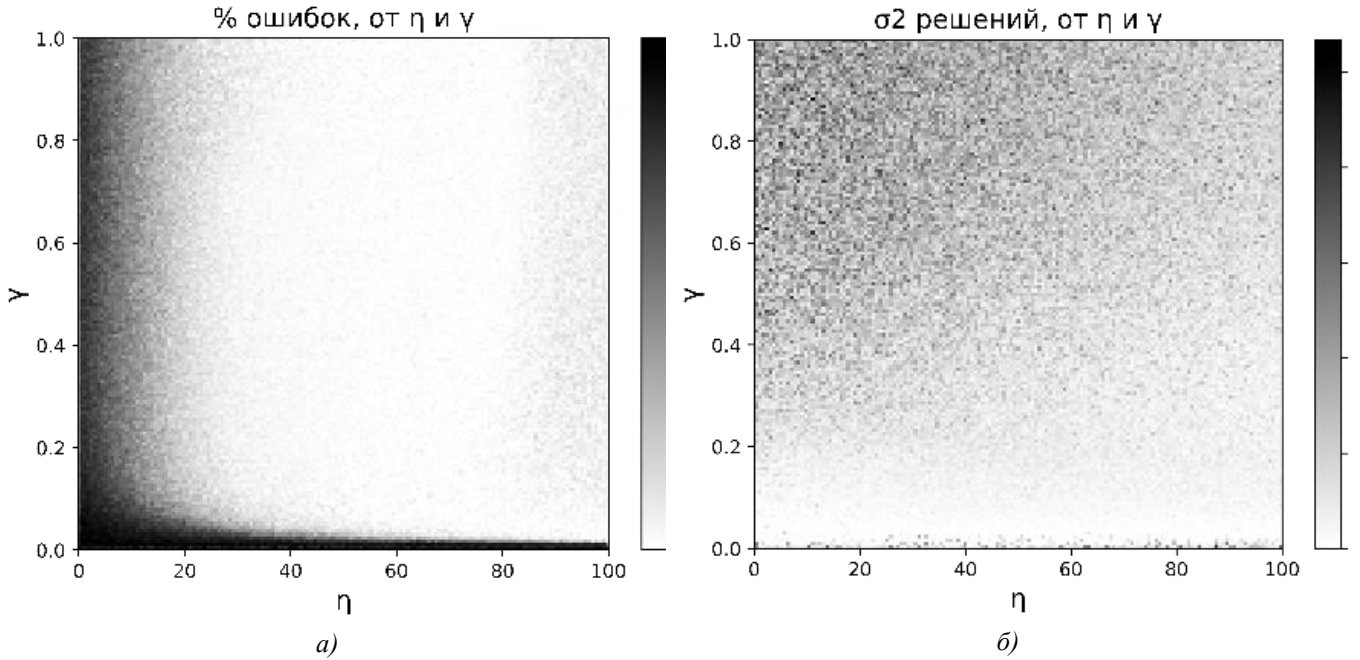


Рис. 3 – Зависимость точности решений модифицированной модели мутации от входных параметров:
 а – процент ошибок; б – разброс решений-кандидатов относительно максимума

В процессе экспериментов было замечено, что увеличение времени эволюции изоляций η гарантирует наиболее точное нахождение области, в которой присутствует глобальный максимум, а уменьшение удельной скорости роста γ , дает наиболее точное приближение к $\max_{\tau} MLP(\ell^{\tau})$, т.е. минимальную дисперсию решений относительно максимума.

По окончании операции мутации, выполним оператор кроссинговера над целевым и мутантным вектором, в результате получим пробный вектор $m_{i,j}^t = (m_{i,1}^t \dots m_{i,D}^t)$, где каждый компонент определяется как:

$$m_{i,j}^t = \begin{cases} v_{i,j}^t, & \text{if } Rd \geq C_r, i = 1..n, j = 1..D \\ \tau_{i,j}^t, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

где C_r – вероятность кроссинговера, Rd – функция, возвращающая случайное число в интервале $[0;1]$.

Для селекции индивида с лучшим значением целевой функции используем следующий оператор:

$$\tau_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} m_{i,j}^t, & \text{if } MLP(\ell^{m_{i,j}^t}) \geq MLP(\ell^{\tau_{i,j}^t}) \\ \tau_{i,j}^t, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (6)$$

Для улучшения скорости сходимости метода было принято решение воспользоваться правилом полигибридного кроссинговера, вместо классических (5), (6). Составим множество H , состоящее из вектора мутации v_i^t и рекомбинантных особей, используя выражение $\prod_{\mu=1}^D (\tau_{i,\mu}^t + v_{i,\mu}^t)$, где D – количество измерений решаемой задачи.

Тогда, каждый одночлен полностью раскрытого выражения можно представить как вектор-индивид множества H (порядок генов по индексу μ важно сохранить).

Оператор селекции выбирает первую особь из H , удовлетворяющую условию $MLP(\ell^h) > MLP(\ell^{\tau_i^t})$, где $h \in H$, и завершает свою работу. Такое поведение операторов делает метод более детерминированным и на каждой итерации гарантирует быстрое сходжение к экстремуму.

В качестве критерия останова для (1) предлагается следующая схема:

$$\sum_{i=1}^n MLP(\ell^{\tau_i^t}) - MLP(\ell^{\tau_{best}^t}) \rightarrow 0. \quad (7)$$

В связи с тем, что отклик MLP нелинеен и принимает различные значения и положения глобального экстремума (зрачка в кадре может не быть или он может быть частично скрыт), предложенная схема показывает лучшие результаты

в процессе детектирования, в сравнении с фиксированным количеством итераций или достижением определенного значения оптимума.

Условие останова напрямую коррелирует с параметрами η и γ – метод гарантированно сойдется за конечное время используя (7).

После достижения условия останова получаем ненормализованные координаты (с учетом паддингов) τ_{best}^t региона интереса зрачка $f_{roi}(u)$ – центр и размер, и нормализованные координаты (в системе координат кадра) $j=1..2 \quad \tau_j^* = \tau_{best,j}^t - \sigma \quad \tau_3^* = \tau_{best,3}^t$.

Был проведен сравнительный анализ следующих метаэвристических методов (рисунок 4):

1. Дифференциальная эволюция SFAGi. Используемые параметры: $\eta = 35$, $\gamma = 0.3$, $\xi = 0.3$, $n = 55$.

2. Метод имитации отжига. Использовался сверхбыстрый отжиг Л.Ингбера [26] для работы в режиме реального времени (отжиг Больцмана [24] и Коши [25] имеют лучшую точность, но не пригодны из-за медленной сходимости); Параметры: начальная температура $T_0 = 1e^4$, конечная температура $T_{end} = 0.1$.

3. Генетический алгоритм вещественного кодирования с оператором инбридинга [27] для концентрации поиска в локальных узлах и BLX-кроссинговером [27]. Для отбора особей в новую популяцию использовался элитизм [28] т.е. отбор 30% наиболее приспособленных особей из получившихся потомков и их родителей в новую популяцию, оставшиеся 70% индивидов генерируются случайно, используя равномерный закон распределения. В результате данной техники метод преодолевает локальные экстремумы, не допускает потерю лучших решений и быстро сходится; Параметры: $n = 55$, элитизм $e = 30\%$.

4. Метод роя частиц [29]. Параметры: весовая доля инерции $\omega = 0.75$, когнитивная весовая доля $c_1 = 1$, социальная весовая доля $c_2 = 0.5$, $n = 55$

В таблице 2 представлен расчет дисперсии – меры разброса решений относительно глобального экстремума. Расчеты показывают, как точно метод находит центр зрачка (колебания детектора по осям абсцисс и ординат) и размер региона интереса (точность аппроксимации зрачка регионом).

Так как методы относятся к классу стохастических, было произведено по 1000 программных пусков для каждого метода. Правильное решение – точка, в окрестности $\tau_i \in (\tau_i^* - 3, \tau_i^* + 3) \quad \forall i = 1..D$.

Таблица 2 – Дисперсия решений метаэвристических методов

$n = 55$ 1000 п.п.	SFAGi полигибридный кроссинговер	SFAGi ДЭ	ГА (элитизм + инбридинг)	МРЧ/ PSO	Моделирование сверхбыстрого отжига
τ_1	0,491184	0,713993	1,10904	1,26829	3,05509
τ_2	0,373293	0,502244	1,1088	1,09756	2,45151
τ_3	0,352212	0,847938	2,64271	5,07317	4,24485

Сравнительный анализ показывает, что модифицированный ДЭ SFAGi сходится на порядок быстрее других метаэвристик, позволяет использовать сравнительно невысокие значения размеров исходной популяции (минимальное $n = 21$, что влияет на общую скорость поиска ROI зрачка), и находить точное значение экстремума в нелинейных мультимодальных функциях, даже в том случае, когда множество допустимых решений функции очень мало.

В процессе тестирования у ГА была замечена требовательность к вычислительным ресурсам – большая часть времени уходит на сортировку индивидов в процессе элитарного отбора и инбридинга.

Особенности модели «RAPID-AN» в режиме трекинга объекта

Описанные выше шаги можно использовать для обработки кадров /медицинских изображений – назовем это режимом детектирования.

В режиме трекинга модель «RAPID-AN» значительно ускоряется без потери точности. Для этого используются некоторые приемы, описанные ниже.

Пусть $f^i(u)$ – текущий кадр, i – индекс кадра, $\tau^{**} = \arg \max_{\tau} MLP^{i-1}(\ell^{\tau})$ – это параметры региона интереса зрачка $f_{roi}^{i-1}(u)$ предыдущего кадра.

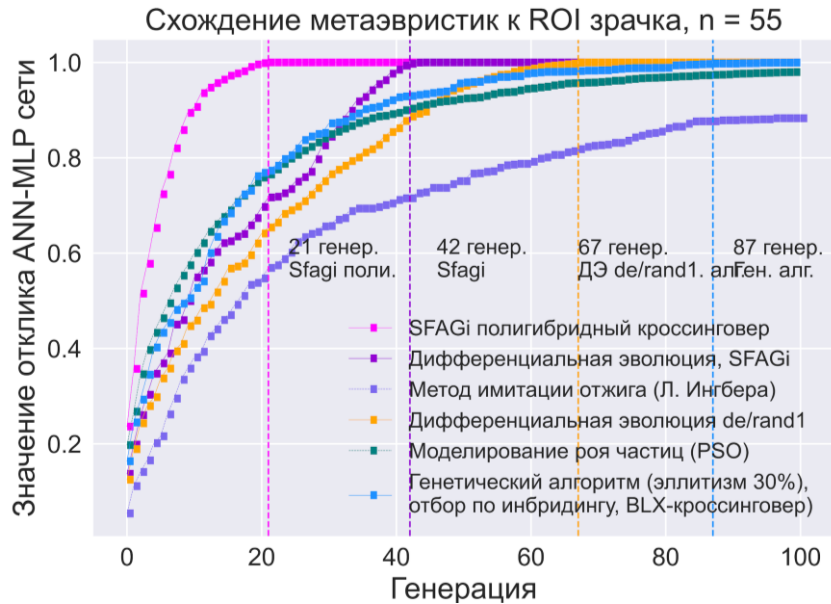


Рис. 4а – Сравнительный анализ метаэвристических методов в задаче (1): усредненные графики схождения к глобальному экстремуму (1000 пусков)

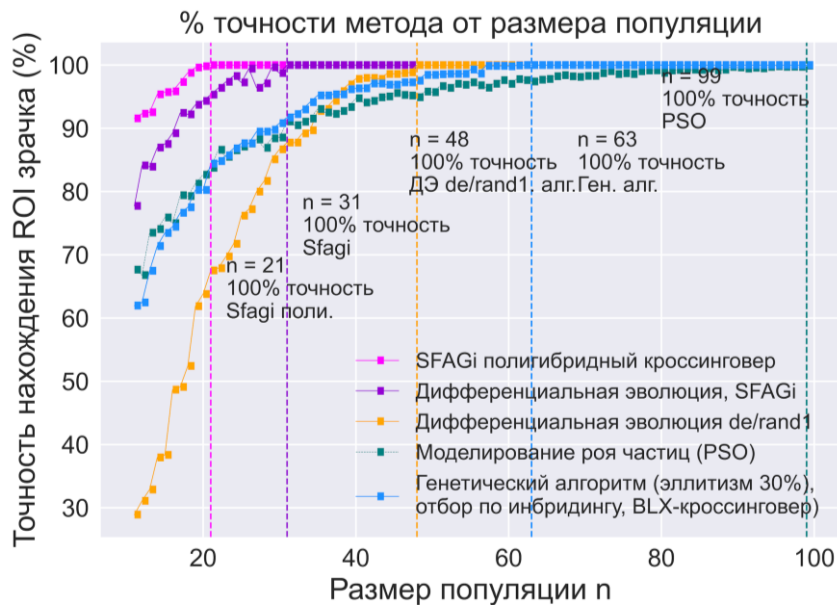


Рис. 4б – Сравнительный анализ метаэвристических методов в задаче (1): % точности найденного ROI от размера популяции метода



Рис. 4в – Сравнительный анализ метаэвристических методов в задаче (1): разброс решений относительно экстремума

1. Вычисление реплицированных паддингов и интегральной δ_{int} матрицы проводится не для всего кадра, а для f_{sub} – безопасный регион поиска, который определяется точкой экстремума предыдущего кадра как $(\tau_1^{**}, \tau_2^{**}, R_{\text{max}})$ и его пересечением (оверлеем) с $f^i(u)$. Представим f_{sub} в виде отдельного кадра, в котором отсутствует вся ненужная информация (белый прямоугольник на рисунке 6в). Таким образом мы ищем параметры зрачка не в кадре размером 640×480 , а в матрице с максимально возможным размером 120×120 , содержащую только зрачок (без потери качества объекта, в отличие от создания пирамиды изображений).

2. Размер паддингов f_{sub} задается как $\sigma = R_{\text{max}} / 2$ (данный вариант более устойчив к изменениям среднего уровня освещенности кадра и изменению размеров зрачка) или же корректируется в зависимости от размера ROI, найденного на предыдущем кадре, т.е. $\sigma = \frac{\tau_3^{**}}{2} + \varepsilon$, где ε – коэффициент компенсирующий увеличение размеров зрачка.

3. Начальная популяция генерируется внутри f_{sub} . Проекция ограничена областью f_{sub} по каждой координате. Такое поведение позволяет игнорировать локальные экстремумы, расположенные далеко от центра зрачка, увеличивая точность (фактически, область f_{sub} содержит только зрачок), в результате чего размер начальной популяции можно сократить до $n \in [5, 11]$. В качестве сверхбыстрого генератора псевдослучайных чисел используется Xorshift128 (G. Marsaglia), генератор сдвигового регистра 128-битной версии.

4. Поскольку поиск происходит в f_{sub} , уменьшается время исследования функции до $\eta \in [10, 20]$ и увеличивается Мальтузианский параметр до $\gamma \in [0.5, 0.7]$, что автоматически уменьшает количество итераций сходимости алгоритма до 30 – 32, без потери точности.

5. После нахождения экстремума τ_{best} , необходимо выполнить его нормализацию в смысле всего кадра (с учетом поиска в матрице f_{sub} и паддингов σ): $j=1..2 \quad \tau_j^* = \tau_j^{**} - \frac{R_{\text{max}}}{2} + (\tau_{\text{best},j} - \sigma) \quad \tau_3^* = \tau_{\text{best},3}$, где τ^* – нормализованные координаты ROI f_{roi} текущего кадра (синий прямоугольник f_{roi} внутри белого f_{sub} на рисунке 6 в).

6. Поскольку модель «RAPID-AN» находит область $f_{\text{roi}}(u)$, наиболее полно аппроксимирующую зрачок (зрачок занимает $\sim 1/2 - 1/3$ от $f_{\text{roi}}(u)$), предлагается следующий вариант сегментации по адаптивному порогу:

$$d = \left(\tau_{\text{best},1} - \frac{\tau_3^*}{2s}, \tau_{\text{best},2} - \frac{\tau_3^*}{2s} \right), p = \left(d_1 + \frac{\tau_3^*}{2}, d_2 \right), q = \left(d_1, d_2 + \frac{\tau_3^*}{2} \right), b = \left(d_1 + \frac{\tau_3^*}{2}, d_2 + \frac{\tau_3^*}{2} \right)$$

$$Q_R = \delta_{\text{int}}(d) + \delta_{\text{int}}(b) - \delta_{\text{int}}(p) - \delta_{\text{int}}(q)$$

$$[\cdot]: \mathbb{B} \rightarrow \{0,1\}, \quad \beta(u) = \left[f_{\text{roi}}(u) \leq \frac{Q_R}{(\tau_3^*/s)^2} \right],$$

где $[\cdot]$ – скобка Айверсона определенная на множестве логических значений, $\beta(u)$ – сегментированный регион, $s=2$ или 3.

7. Поскольку модель основана на нейроотклике, в режиме трекинга можно отслеживать состояние глаза: $S_{\text{eye}} = [MLP(\ell^{t^*}) < T_{\text{eye}}]$, где $[\cdot]$ – скобка Айверсона, $T_{\text{eye}} = 0.8$.

На рисунке 6а,б показан процесс регистрации зрачка в $f^i(u)$. Точки показывают эволюцию распределения популяции решений от синего к белому, вдоль оси итераций t . Белые кластеры – сформированные изоляции в окрестностях локальных и глобальных экстремумов. На рисунке 6в показан процесс трекинга зрачка, поиск региона интереса зрачка $f_{\text{roi}}(u)$ (синий прямоугольник) проходит в области f_{sub} (белый прямоугольник), что значительно увеличивает скорость трекинга.

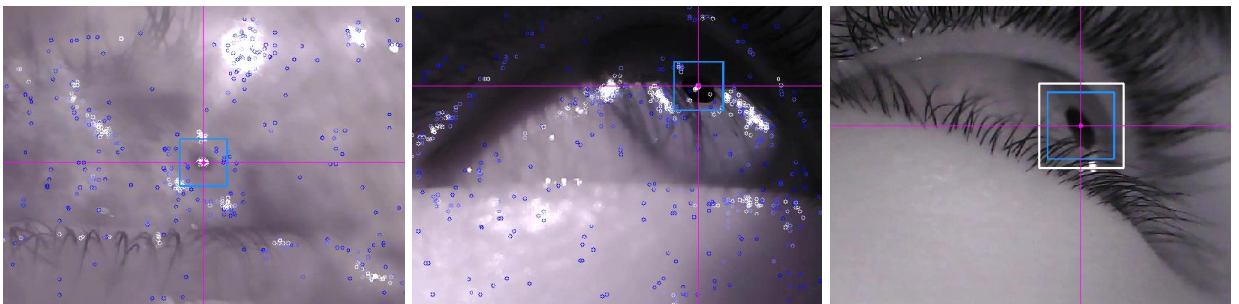


Рис. 5 – Пример работы модели «RAPID-AN»

Разработанный детектор регистрации и трекинга зрачка

Общая схема работы детектора на основе перцептивных интегральных паттернов и модификации численного метода ДЭ представлена на рисунке 6.

Детектор разработан в виде ООП библиотеки RAPID_AN.h/cpp на языке программирования C++17 и выложен под GNU General Public License v3.0 [33] на GitHub.

Данная библиотека может использоваться для разработки программных комплексов аугментативной коммуникации для коммуникации людей с нервнопаралитическими синдромами, а также при разработке новых алгоритмов БОГ в качестве первого быстрого этапа поиска ROI с последующим уточнением координат зрачка и размера в нем.

Предоставляемый основной функционал библиотеки: 1) метод класса `std::vector<int> RAPID::detect(cv::Mat&)` – поиск региона интереса зрачка методом SFAGi и перцептивными паттернами. Возвращаемый вектор τ^* нормализован относительно системы координат кадра. В качестве параметра выступает ссылка на трехканальный кадр $F^i(u)$. 2) Геттер `cv::Mat& RAPID::getROIMat(void)` – возвращает ссылку на $f_{roi}(u)$, матрица может быть использована для дальнейшей обработки компоненты зрачка методами Хафа, RANSAC, математической морфологии, контурного анализа. 3) Геттер `uint8_t RAPID::getAdaptedThresh(void)` – возвращает адаптивный порог в диапазоне $[0..255]$, рассчитанный на основе параметров региона, наиболее полно аппроксимирующего зрачок и корректно выделяющий его из фона.

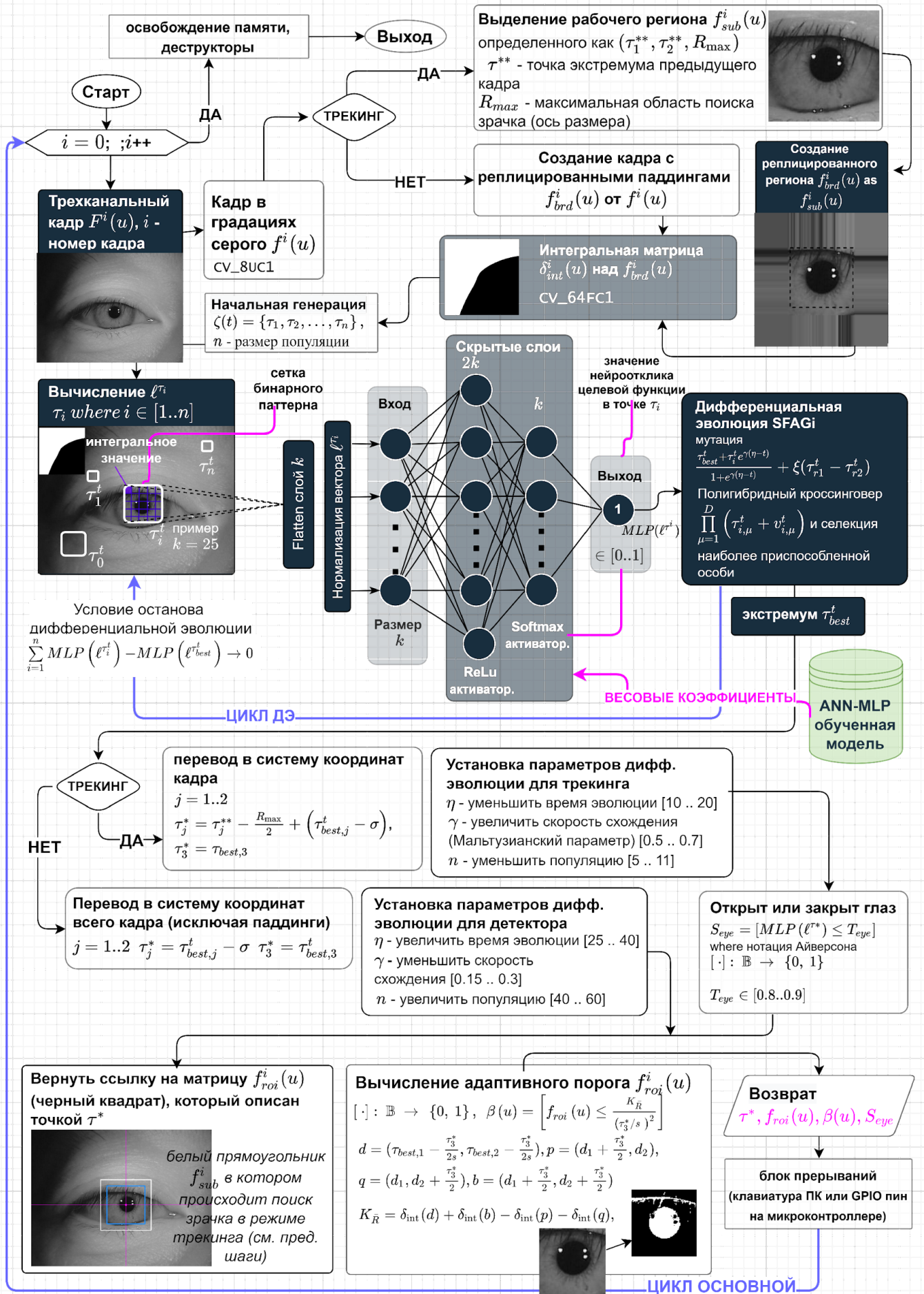


Рис. 6 – Общая схема модели регистрации и трекинга зрачка «RAPID-AN»

4) $int8_t\ RAPID::getEyeState(float)$ – в случае, если поиск зрачка осуществляется посредством перцептивных интегральных паттернов, метод вернет 1 – если глаз открыт (т.е. если точность предсказания ANN-MLP сети больше некоторого порога), 0 – если закрыт, в противном случае -1. 5) $float\ RAPID::getANNConfidence(void)$ – отклик сети в точке $\arg \max_{\tau} MLP(\ell^{\tau})$ в процентах. 6) $long\ long\ int\ RAPID::getNumIteration(void)$ – получение номера итерации схождения алгоритма.

На рисунке 7 представлено окно программного комплекса, разработанного с использованием RAPID_AN.h и Qt 6.0, демонстрирующее работу детектора. Имеется возможность установки параметров движка ДЭ, загрузки обученной модели, просмотра положения и размеров найденного ROI, просмотра времени обработки и результата адаптивной пороговой сегментации, состояния открытия глаза, точности распознавания и др.

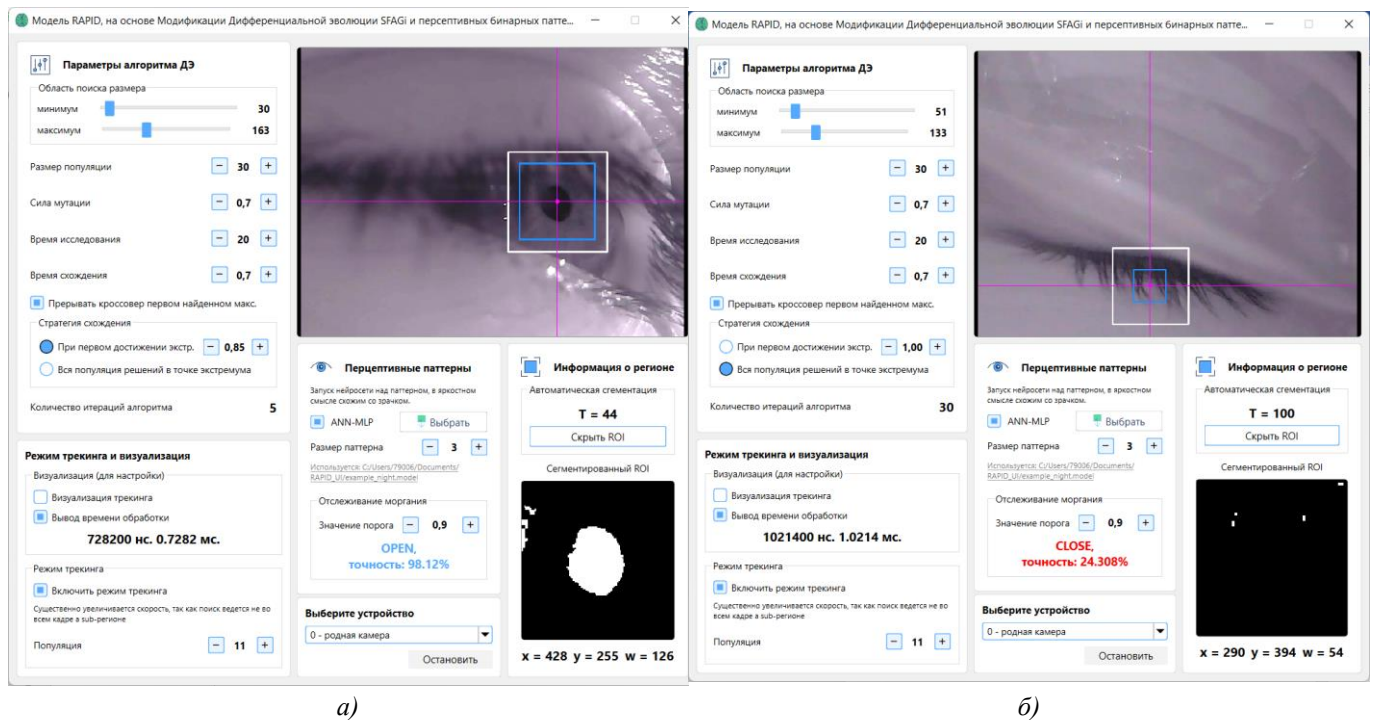


Рис. 7 – Программный комплекс трекинга зрачка:

а – состояние открытого зрачка, сегментированный регион, размер региона и координаты зрачка;
б – состояние закрытого зрачка

На рисунке 6 представлен разработанный визуально-ориентированный конструктор ANN-MLP для задачи (1), с возможностью просмотра структуры сети, загрузки и редактирования обучающей выборки и параметров обучения, а также обучения самой модели (с наглядными графиками). Комплекс разработан на Python 3.10, PySide 2, Keras, TensorFlow и OpenCV 4.5.3.

Сравнительный анализ

Бенчмарк работы предложенной модели на различных архитектурах представлен в таблице 3.

Для замера времени использовалась библиотека `<chrono.h>` и метод `std::chrono::steady_clock::now()`. Для преобразования полученного результата в наносекунды `std::chrono::duration_cast<std::chrono::nanoseconds>()`.

Структура нейронной сети

Входной слой
Количество нейронов: 9

[- 18 +] relu

[- 9 +] softmax

Выходной слой
Количество нейронов: 1

Визуализация структуры сети

input_1	input:	[(None, 9)]	[(None, 9)]
InputLayer	output:		
dense_7	input:	(None, 9)	(None, 18)
Dense relu	output:		
dense_5	input:	(None, 18)	(None, 9)
Dense softmax	output:		
dense_8	input:	(None, 9)	(None, 1)
Dense linear	output:		

Всего тренируемых весов: 361

Параметры обучения

Обучающие и тестовые выборки

Загрузите выборку, затем разделите ее на тестовую и обучающую, рекомендуется на тестовую отводить не более 35%

Загрузить датасет *.txt

Размер тестовой выборки: 35

Выбранный файл: C:/Users/79006/data_night.txt

Колонки: 10, 9 входов float и 1 выход

Всего векторов: 4228

Функция потерь (рекомендовано использовать бинарную кроссэнтропию, СКО): binary_crossentropy

Оптимизатор весовых коэффициентов (рекомендуется Adam): Adam

Выберите размер батча (количество векторов выборки используемые в одной эпохе), количество эпох - время обучения сети, большое число приведет к переобучению сети

Размер батча: 15

Количество эпох: 40

Сохранить ANN / Обучить ANN-MLP

Обучение и проверка точности ANN-MLP

Точность vs Эпоха

Эпоха	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Тренировочные данные	0.9507	0.9824	0.9784	0.9899	0.9973				
Тестовые данные									

Минимизация функции потерь

Потери vs Эпоха

Эпоха	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Тренировочные данные IR	0.098	0.050	0.036	0.025	0.016				
Тестовые данные IR									

1/184 [.....] - ETA: 0s - loss: 0.0000e+00 - accuracy: 1.0000

67/184 [=====>.....] - ETA: 0s - loss: 0.0137 - accuracy: 0.9950

142/184 [=====>.....] - ETA: 0s - loss: 0.0112 - accuracy: 0.9972

184/184 [=====>.....] - 0s 1ms/step - loss: 0.0120 - accuracy: 0.9964 - val_loss: 0.0136 - val_accuracy: 0.9973

Визуально-ориентированный конструктор нейросетевых моделей и их обучения «RAPID-AN learn» для задачи (1)

Выбранный файл: C:/Users/79006/Documents/RAPID_UI/test.png

Создать выборку / Директория / Пред. / Следующий кадр

Имя выборки:

Передвигайте ползунки так, чтобы зеленая рамка наиболее полно аппроксимировала зрачок в загруженном кадре (возможен частичный захват радужной оболочки)

Размер сетки: 5

Регион перекрывает глаз

Копировать / В выборку

0.6361258346527157 0.6940524540510773 0.8600881117918359 0.6648998416741241
 0.7045845666689613 0.7581744338129001 0.5918634267226544 0.45800922420320783
 0.5931369174640325 0.6848970881806292 0.8368210917601707 0.5296344737385558
 n 40564984780064707 n 42747988507881874 n 8772871205341777 n 926757073036415

Были найдены следующие файлы:

C:/Users/79006/Documents/RAPID_UI/low.png
 C:/Users/79006/Documents/RAPID_UI/test.png
 C:/Users/79006/Documents/RAPID_UI/test2.png
 C:/Users/79006/Documents/RAPID_UI/test3.png
 C:/Users/79006/Documents/RAPID_UI/test4.png

Рис. 8 – Визуально-ориентированный конструктор нейросетевых моделей и их обучения «RAPID-AN learn» для задачи (1)

Таблица 3 – Время обработки одного кадра моделью «RAPID-AN» в режиме детектора и трекинга на различных вычислительных архитектурах

Архитектура	Intel(R) Core(TM), i7-9750H, 2.59 ГГц, x64 бит ПК	Intel(R) Core(TM), i7-3517U, 1.7 ГГц, x64 бит ПК	Broadcom BCM2837, ARM Cortex-A53 1200 МГц, , x32 бит, RAM 1024 Мб Микропроцессорная архитектура
Компилятор, флаги, поддержка векторизации	MSVC 2019, флаг приоритета скорости /O2, C++17, (Visual Studio, Qt) поддержка векторизации SSE2, AVX2.		G++, флаг приоритета скорости, /O2, c++17, поддержка векторизации – NEON инструкции
Режим трекинга $n=7$	0,7265 мс,	3,1387 мс,	8,3582 мс,
Режим детектора $n=30$	3,1605 мс,	15,758 мс,	44,2107 мс,

В таблице 4 приводятся результаты анализа детекторов, основанных на часто используемых техниках поиска объекта на изображении.

Таблица 4 – Сравнительный анализ детекторов

Архитектура	«RAPID-AN» Предлагаемая модель		Tiny-Yolo v3 [35] Сверточная нейросеть. Darknet, OpenCV		Преобразование Хафа OpenCV		Хаар-Каскад (Метод Виолы-Джонса). OpenCV.		Гистограммы ориентированных градиентов (HOG) [34], OpenCV.	
	мс.	%	сек	%	мс.	%	мс.	%	сек	%
Broadcom BCM2837, ARM Cortex-A53, 1.2 ГГц.	8,35	99,1	1,042	99,34	50,59	96	64,85	91,3	1,162	85,4
	44,2									

Предложенная модель позволяет подойти к процессу регистрации зрачка пошагово, сначала находится регион, наиболее полно аппроксимирующий зрачок, тем самым удаляются «лишние» объекты, мешающие точному поиску, затем локально, применяется один из методов, основанный на изучении граничной модели изображения, контурного анализа или математической морфологии.

Пример использования модели с различными методиками представлен в таблице 5.

Найденный $f_{roi}(u)$ и его параметры τ^* позволяют значительно уменьшить время и область поиска радиуса зрачка (например, при преобразовании Хафа [9] или рекурсивной морфологической эрозии [8]), а также исключить большинство ложных окружностей. Таким образом область поиска составит $r \in \left[\frac{\tau_3^*/2}{3}, \frac{\tau_3^*/2}{2} \right]$.

Таблица 5 – Сравнительный анализ методов регистрации зрачка

Метод и его характеристика	Точность, %	Среднее время, мс.
Медианный фильтр (5x5) + Канни + Преобразование Хафа (OpenCV) Задача пупиллометрии (окружность)	95,7	50,59 область поиска $r \in [30..70]$
RAPID (режим трекинга) + медианный фильтр + преобразование Хафа (OpenCV) Задача пупиллометрии (окружность)	99,1	17,29 область поиска (см. выше абзац)
Морфологическое закрытие (удаление бликов) + рекурсивная эрозия (OpenCV) + поиск наиболее удаленной точки в кадре Задача трекинга (эллипс)	88,5	370,50
RAPID (режим трекинга) + рекурсивная морфологическая эрозия + поиск наиболее удаленной точки в ROI Задача трекинга (эллипс)	93,1	27,45

Заключение

Предлагаемая модель регистрации и трекинга зрачка глаза «RAPID-AN», основанная на поиске региона, наиболее полно аппроксимирующего зрачок, модифицированным численным методом ДЭ SFAGi и перцептивными интегральными паттернами, была успешно применена в задаче ВОГ с целью снижения вычислительных затрат, что дает возможность применять алгоритмы на неспециализированных устройствах (ПК, оснащенных веб-камерой) и микропроцессорных архитектурах (очки айтрекеры), а также удешевить технологию ВОГ, сделав ее более доступной для людей с ОВЗ и медицинских учреждений.

Сравнительный анализ детекторов показал существенное снижение вычислительных затрат в рассматриваемой задаче, и высокую точность благодаря использованной модификации ДЭ.

Поскольку метод дифференциальной эволюции, используемый в модели «RAPID-AN», относится к классу стохастических, необходимо было уменьшить процент ложных решений в результате спуска к локальным оптимумам и увеличить вероятность точного решения до единицы. В результате был предложен модифицированный численный метод ДЭ основанный на модели ограниченного роста Ферхюльста-Пирла. Кроссинговер и операторы отбора были пересмотрены, что сделало модель более детерминированной и позволило гарантированно двигаться в направлении наилучшего значения на каждой итерации. Определено условие останова метода с учетом особенностей целевой функции. Модификация превзошла существующие методы в рассматриваемой задаче.

Разработанная модель в дальнейшем будет внедрена в АПК ААК на основе технологии ВОГ, описанного в смежной работе [6], а также проведено тестирование комплекса в реабилитационных центрах для лежачих больных после инсульта.

Дополнительно проведен эксперимент по регистрации сложных объектов в режиме реального времени. В теории, увеличив размерность сетки перцептивного паттерна можно аппроксимировать в яркостном смысле любой объект (по аналогии с методом прямоугольников). На рисунке 7 представлен результат эксперимента. Обработка одного кадра заняла 75.34 мс. на BCM2837, ARM Cortex-A53 и 6.15 мс. на Intel Core, i7-9750H.

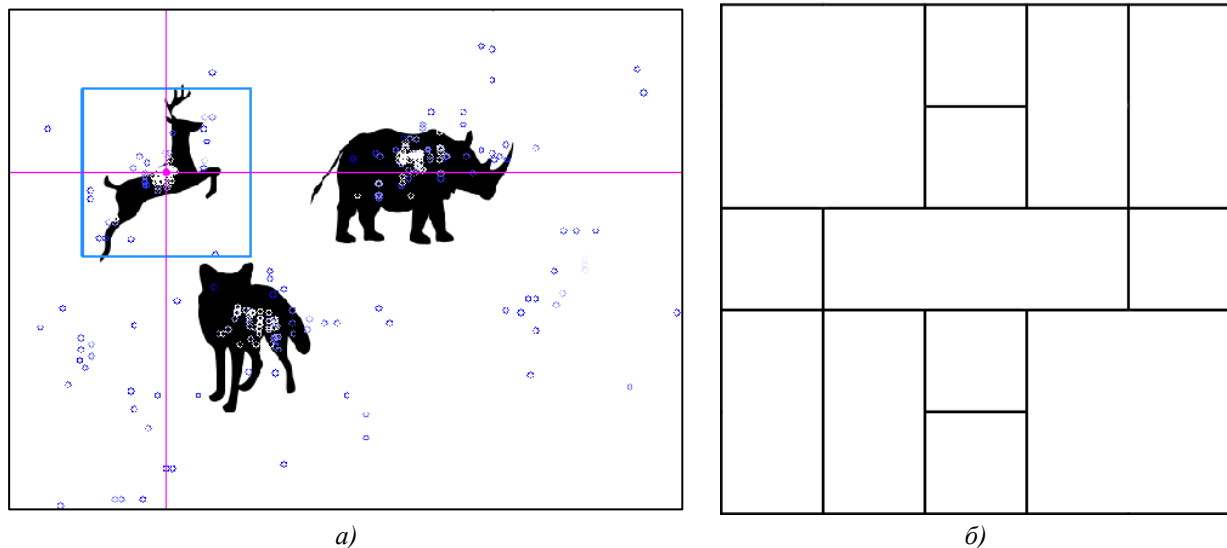


Рис. 7 – Результат эксперимента:

a – поиск силуэта оленя сложным паттерном; *b* – ($k = 13$, двухслойный ANN-MLP: [вход 13]-[25]-[10]-[1 выход], $n = 30$, 50 итераций)

Такой вычислительно простой детектор может применяться и в робототехнике, например, для беспилотного транспорта при распознавании дорожных знаков и разметки т.е. там, где применение сверточных нейронных сетей невозможно или нецелесообразно.

Тема детектирования объектов различных классов с помощью перцептивных паттернов и ДЭ будет раскрыта в дальнейших работах.

Благодарности

Выражаю благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук Паровику Р. И. за замечания, способствовавшие выполнению работы.

Acknowledgement

I express my gratitude to the supervisor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences R.I. Parovik for a number of comments that contributed to the improvement of the presented work.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

- Oshorov A. Pupillometry as a method for monitoring of pupillary light reflex in ICU patients / A. Oshorov, E. Alexandrova, K.R. Muradyan et al. // Issues of N.N. Burdenko Neurosurgery. – 2021. – Vol. 85. – P. 117. DOI: 10.17116/neiro202185031117.
- Куцало А.Л. Пупиллометрия в качестве метода экспресс-диагностики наркотической интоксикации: автореф. дис. канд. мед. наук: 14.00.20: защищена 2004 / Куцало Анатолий Леонидович. – СПб., 2004. – 18 с.
- Logroscino Giancarlo. Global, regional, and national burden of motor neuron diseases 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016 / Piccininni Marco, Marin Benoit, Nichols Emma and others // The Lancet Neurology. – 2018. – Vol. 17. – P. 1083–1097.
- Ткаченко Е.С. Детский церебральный паралич: состояние изученности проблемы / Е.С. Ткаченко, О.П. Голева, Д.В. Щербаков и др. // МиД. – 2019. – №2. – С. 4-9.
- Durna Y. Design of a Binocular Pupil and Gaze Point Detection System Utilizing High Definition Images / Y. Durna, F. Ari // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7. – P. 498.

6. Грушко Ю.В. Аппаратно-программный комплекс аугментативной системы коммуникации на основе технологии Euyetracking / Ю.В. Грушко // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2019. – Т. 27. – №2. – С. 55–73.
7. Bonteanu P. Robust Pupil Detection Algorithm Based on a New Adaptive Thresholding Procedure / P. Bonteanu, A. Cracan, G. Bonteanu et al. // IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering EHB. – 2019. – P. 276.
8. Матвеев И.А. Методы и алгоритмы автоматической обработки изображений радужной оболочки глаза.: дис. ... докт. тех. наук : 05.13.11: защищена 30.10.2014 г. / Матвеев Иван Алексеевич. – М., 2014 – 290 с.
9. Alkuzaay M. Towards Accurate Pupil Detection Based on Morphology and Hough Transform / M. Alkuzaay, E. Alshemmary // Baghdad Science Journal. – 2020. – Vol. 17. – N. 2. – P. 583–590.
10. Dongheng L. A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches / L. Dongheng, D. Winfield, D. J. Parkhurst // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 3. – P. 79.
11. Fuhl W. ElSe: ellipse selection for robust pupil detection in real-world environments / W. Fuhl, T. Santini, T. Kubler et al. // The Ninth Biennial ACM Symposium. – 2016. – P. 123–130.
12. Swirski. L. Robust real-time pupil tracking in highly off-axis images / Bulling. A. Dodgson. N. // Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA). – 2012. – P. 173–176.
13. Topal Cihan. An Adaptive Algorithm for Precise Pupil Boundary Detection using Entropy of Contour Gradients / Topal Cihan, CAKIR Halil, Akinlar Cuneyt. – 2017.
14. Yang Z. Intelligent Evaluation of Strabismus in Videos Based on an Automated Cover Test / Z. Yang // Applied Sciences. – 2019. – P. 59.
15. Paul Viola. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features / Paul Viola. // Conference on computer vision and pattern recognition. – 2001.
16. Fuhl W. The Applicability of Cycle GANs for Pupil and Eyelid Segmentation / Fuhl Wolfgang, Geisler David, Rosenstiel Wolfgang, Kasneci Enkelejda. // Data Generation and Image Refinement. – 2019. – P. 4406–4415.
17. Grushko Y. V. Fast Pupil Tracking based on the Study of a Boundary-stepped Image Model and Multidimensional Optimization Hook-Jives Method / Y. V. Grushko, R. I. Parovik // Informatics and automation. – 2021. – Vol. 2. – P. 435–462.
18. Перевозчиков Г. Keras2cpp [Электронный ресурс] / Г. Перевозчиков // GitHub. – 2019. – URL: <https://github.com/gosha20777/keras2cpp> (дата обращения 21.04.22)
19. Kingma D.A. A Method for Stochastic Optimization / Kingma Diederik, Ba Jimmy // International Conference on Learning Representations. – 2014.
20. Chinese Academy of Sciences Institute of Automation. Iris image database, ver. 4. – 2021. – [Electronic resource] URL: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris20Databases20CH.asp>.
21. Tonsen Marc. Labeled pupils in the wild: A dataset for studying pupil detection in unconstrained environments / Zhang Xucong, Sugano Yusuke, Bulling Andreas // ACM International Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA) – 2016. – P. 139-142 doi:10.1145/2857491.2857520
22. Jeyakumar G. Convergence Analysis of Differential Evolution Variants on Unconstrained Global Optimization Functions / Jeyakumar Gurusamy, C. Shanmugavelayutham // International Journal of Artificial Intelligence and Applications. – 2011.
23. Meera R. FSDE-Forced Strategy Differential Evolution used for data clustering / Meera Ramadas, Ajith Abraham, Sushil Kumar // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2019. – Vol. 31, – N. 1. – P. 52–61.
24. Kirkpatrick S. Optimization by Simulated Annealing / S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi // Science. – 1983. – Vol. 220. – P. 671-680.
25. Szu H. H. Fast Simulated Annealing / H. H. Szu, R. L. Hartley // Physical Letters. – 1987. – Vol. 122. – P. 157-162.
26. Ingber L. Very fast simulated re-annealing / L. Ingber // Mathematical and Computer Modelling. – 1989. – Vol. 12. – P. 967-973.
27. Cervantes A. An empirical comparison of two crossover operators in real-coded genetic algorithms for constrained numerical optimization problems. / Cervantes Adriana, Mezura-Montes Efrén, Coello Carlos. // IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC. – 2015. doi:10.1109/ROPEC.2014.7036347.
28. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / Т.В. Панченко, под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 [3] с.
29. Poli R. Particle Swarm Optimization: An Overview. / Kennedy James, Blackwell Tim // Swarm Intelligence. – 2007.
30. Ковалевич А.А. Исследование стохастических алгоритмов оптимизации для применения в имитационном моделировании систем / А.А. Ковалевич, А.И. Якимов, Д.М. Албкеират // Информационные технологии. – 2011. – № 8. – С. 55-60.
31. Пупков К.А. Алгоритм «Дифференциальной эволюции» для задачи технического проектирования / К.А. Пупков, В.А. Феоктистов // Информационные технологии. – 2004. – № 8. – С. 25-31.
32. Tsoularis A.N. Analysis of Logistic Growth Models / A.N. Tsoularis, Wallace James // Mathematical biosciences. – 2002. – Vol. 179. – P. 21–55.
33. Грушко Ю.В. RAPID [Электронный ресурс] / Грушко Ю. В. // GitHub. – 2022. – URL: <https://github.com/NeuralPill/RAPID> (дата обращения 21.04.22).
34. Dalal N. Histograms of oriented gradients for human detection / N. Dalal, B. Triggs // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2005. – P. 886-893. DOI: 10.1109/CVPR.2005.177.
35. Adarsh P. YOLO v3-Tiny: Object Detection and Recognition using one stage improved model / Adarsh Pranav, Rathi Pratibha, Kumar Manoj. – 2020. – P. 687-694. DOI:10.1109/ICACCS48705.2020.9074315.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Oshorov A. Pupillometry as a method for monitoring of pupillary light reflex in ICU patients / A. Oshorov, E. Alexandrova, K.R. Muradyan et al. // Issues of N.N. Burdenko Neurosurgery. – 2021. – Vol. 85. – P. 117. DOI: 10.17116/neiro202185031117.
2. Kucalo A.L. Pupilometrija v kachestve metoda jekspres-dijagnostiki narkoticheskoj intoksikacii [Pupillometry as a method of rapid diagnosis of drug intoxication]: abstract dis. ... of PhD in Medicine: 14.00.20: defense of the thesis 2004 / Kucalo Anatolij Leonidovich. – SPb., 2004. – 18 p. [in Russian]
3. Logroschino Giancarlo. Global, regional, and national burden of motor neuron diseases 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016 / Piccininni Marco, Marin Benoit, Nichols Emma and others // The Lancet Neurology. – 2018. – Vol. 17. – P. 1083–1097.
4. Tkachenko E.S. Detskij cerebral'nyj paraliz: sostojanie izuchennosti problemy [Cerebral Palsy: State of Research on the Problem] / E.S. Tkachenko, O.P. Goleva, D.V. Shherbakov et al. // MiD [Mother and Child in Kuzbass]. – 2019. – №2. – P. 4-9. [in Russian]
5. Durna Y. Design of a Binocular Pupil and Gaze Point Detection System Utilizing High Definition Images / Y. Durna, F. Ari // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7. – P. 498.
6. Grushko Y.V. Apparato-programmnyj kompleks augmentativnoj sistemy kommunikacii na osnove tehnologii Eyetracking [Hardware-software complex of augmentative communication system based on eyetracking technology] / Y.V. Grushko // Vestnik KRAUNC [Bulletin KRAUNZ]. – 2019. – V. 27. – №2. – P. 55–73. [in Russian]
7. Bonteanu P. Robust Pupil Detection Algorithm Based on a New Adaptive Thresholding Procedure / P. Bonteanu, A. Cracan, G. Bonteanu et al. // IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering EHB. – 2019. – P. 276.
8. Matveev I.A. Metody i algoritmy avtomaticheskoy obrabotki izobrazhenij raduzhnoj obolochki glaza [Methods and algorithms for automatic processing of iris images]: dis. ... of Dr. in Physics and Mathematics: 05.13.11: defense of the thesis 30.10.2014 г. / Matveev Ivan Alekseevich. – M., 2014 – 290 p. [in Russian]
9. Alkuzaay M. Towards Accurate Pupil Detection Based on Morphology and Hough Transform / M. Alkuzaay, E. Alshemmary // Baghdad Science Journal. – 2020. – Vol. 17. – N. 2. – P. 583–590.
10. Dongheng L. A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches / L. Dongheng, D. Winfield, D. J. Parkhurst // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 3. – P. 79.
11. Fuhl W. EISe: ellipse selection for robust pupil detection in real-world environments / W. Fuhl, T. Santini, T. Kubler et al. // The Ninth Biennial ACM Symposium. – 2016. – P. 123–130.
12. Swirski. L. Robust real-time pupil tracking in highly off-axis images / Bulling. A. Dodgson. N. // Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA). – 2012. – P. 173–176.
13. Topal Cihan. An Adaptive Algorithm for Precise Pupil Boundary Detection using Entropy of Contour Gradients / Topal Cihan, CAKIR Halil, Akinlar Cuneyt. – 2017.
14. Yang Z. Intelligent Evaluation of Strabismus in Videos Based on an Automated Cover Test / Z. Yang // Applied Sciences. – 2019. – P. 59.
15. Paul Viola. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features / Paul Viola. // Conference on computer vision and pattern recognition. – 2001.
16. Fuhl W. The Applicability of Cycle GANs for Pupil and Eyelid Segmentation / Fuhl Wolfgang, Geisler David, Rosenstiel Wolfgang, Kasneci Enkelejda. // Data Generation and Image Refinement. – 2019. – P. 4406–4415.
17. Grushko Y.V. Fast Pupil Tracking based on the Study of a Boundary-stepped Image Model and Multidimensional Optimization Hook-Jives Method / Y.V. Grushko, R.I. Parovik // Informatics and automation. – 2021. – Vol. 2. – P. 435–462.
18. Perevozchikov G. Keras2cpp [Keras2cpp] [Electronic resource] / Perevozchikov G. // GitHub. – 2019. – URL: <https://github.com/gosha20777/keras2cpp> (accessed: 21.04.2022). [in Russian]
19. Kingma D.A. A Method for Stochastic Optimization / Kingma Diederik, Ba Jimmy // International Conference on Learning Representations. – 2014.
20. Chinese Academy of Sciences Institute of Automation. Iris image database, ver. 4. – 2021. – [Electronic resource] URL: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris20Databases20CH.asp>.
21. Tonsen Marc. Labeled pupils in the wild: A dataset for studying pupil detection in unconstrained environments / Zhang Xucong, Sugano Yusuke, Bulling Andreas // ACM International Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA) – 2016. – P. 139-142. DOI:10.1145/2857491.2857520
22. Jeyakumar G. Convergence Analysis of Differential Evolution Variants on Unconstrained Global Optimization Functions / Jeyakumar Gurusamy, C. Shanmugavelayutham // International Journal of Artificial Intelligence and Applications. – 2011.
23. Meera R. FSDE-Forced Strategy Differential Evolution used for data clustering / Meera Ramadas, Ajith Abraham, Sushil Kumar // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2019. – Vol. 31, – N. 1. – P. 52–61.
24. Kirkpatrick S. Optimization by Simulated Annealing / S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi // Science. – 1983. – Vol. 220. – P. 671-680.
25. Szu H.H. Fast Simulated Annealing / H.H. Szu, R.L. Hartley // Physical Letters. – 1987. – Vol. 122. – P. 157-162.
26. Ingber L. Very fast simulated re-annealing / L. Ingber // Mathematical and Computer Modelling. – 1989. – Vol. 12. – P. 967-973.
27. Cervantes A. An empirical comparison of two crossover operators in real-coded genetic algorithms for constrained numerical optimization problems. / Cervantes Adriana, Mezura-Montes Efrén, Coello Carlos. // IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC. – 2015. DOI:10.1109/ROPEC.2014.7036347.

28. Panchenko T.V. Geneticheskie algoritmy: uchebno-metodicheskoe posobie [Genetic algorithms: tutorial] / Panchenko, T. V. Edited by Ju. Ju. Tarasevicha. – Astrahan' : Publishing house «Astrahanskij universitet». 2007. – 87 [3] p.
29. Poli R. Particle Swarm Optimization: An Overview. / Kennedy James, Blackwell Tim // Swarm Intelligence. – 2007.
30. Kovalevich, A.A. Issledovanie stohasticheskikh algoritmov optimizacii dlja primenenija v imitacionnom modelirovanii sistem [Study of stochastic optimization algorithms for use in simulation of systems] / A.A. Kovalevich, A.I. Jakimov, D.M. Albkeirat // Informacionnye tehnologii [Information technologies]. – 2011. – № 8. – P. 55-60. [in Russian]
31. Pupkov K.A. Algoritm «Differencial'noj jevoljucii» dlja zadachi tehničeskogo proektirovanija [Algorithm «Differential evolution» for the problem of technical design] / K. A. Pupkov, V. A. Feoktistov // Informacionnye tehnologii [Information technologies]. – 2004. – № 8. – P. 25-31. [in Russian]
32. Tsoularis A. N. Analysis of Logistic Growth Models / A. N. Tsoularis, Wallace James // Mathematical biosciences. – 2002. – Vol. 179. – P. 21–55.
33. Grushko Y.V. RAPID [RAPID] [Electronic resource] / Grushko Y. V. // GitHub. – 2022. – URL: <https://github.com/NeuralPill/RAPID>. (accessed: 21.04.2022). [in Russian]
34. Dalal N. Histograms of oriented gradients for human detection / N. Dalal, B. Triggs // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2005. – P. 886-893. DOI: 10.1109/CVPR.2005.177.
35. Adarsh P. YOLO v3-Tiny: Object Detection and Recognition using one stage improved model / Adarsh Pranav, Rathi Pratibha, Kumar Manoj. – 2020. – P. 687-694. DOI:10.1109/ICACCS48705.2020.9074315.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.007>

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВЫХ СИСТЕМ

Научная статья

Васяева Н.С.¹, Дегаев М.Н.² *

^{1,2} Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

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

Аннотация

В последнее время объём хранимых в информационно-вычислительных сетях данных значительно увеличился; востребованность для конечных пользователей большинства данных приводит к увеличению числа поисковых запросов в сети, что, в свою очередь, увеличивает общий сетевой трафик. В связи с этим в общей концепции информационно-поисковых систем возрастает роль современных информационно-ориентированных сетей (ICN), которые соответствуют шаблону информационно-ориентированных приложений и обеспечивают кэширование внутри сети. В статье приводится формальное представление модели построения индексных структур для «классических» информационно-поисковых систем и используемых в сетях ICN. Полученные модели позволяют проводить оценку прогнозируемого объёма памяти, отводимого под служебные таблицы, используемые в процессе поиска при обоих подходах, и исследовать вопрос о выигрыше использования подхода ICN-сетей.

Ключевые слова: информационно-поисковая система, информационно-ориентированная сеть, ICN, инвертированный индекс, иерархическое префиксное именование.

FORMALIZATION OF AN INDEX CONSTRUCTION MODEL FOR SEARCH ENGINES

Research article

Vasyaeva N.S.¹, Degaev M.N.² *

^{1,2} Volga State University of Technology Yoshkar-Ola, Russia

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

Abstract

Recently, the amount of data stored in information computer network has increased significantly; the demand of most data for the end client leads to an increase in the number of search requests in the network, which in turn increases the overall network traffic. In this regard, the overall concept of search engines increases the role of modern information-oriented networks (ICN), which correspond to the template of information-oriented applications and facilitate caching within the network. The article provides a formal representation of the index structures construction model for «classical» search engines used in ICN networks. The obtained models allow estimating the predicted amount of memory allocated for service charts used in the search process for both approaches, and studying the question of the benefit from the use of the ICN-network approach.

Keywords: search engine, information-oriented network, ICN, inverted index, hierarchical prefix naming.

Введение

Эффективность поиска информации в информационно-поисковых системах (ИПС) напрямую зависит от способа индексации хранимых данных, которых на сегодняшний день существует достаточно много. Одни из них показывают хорошие характеристики при поиске полнотекстовой информации, например, инвертированный индекс, другие – при поиске файлов с изображениями, например, RF-метод [1].

Для ICN-сетей используются другие подходы, основные из которых базируются на применении префиксного именования запросов и использовании специальных таблиц, обеспечивающих одновременно и поиск запрашиваемой информации по префиксам и маршрутизацию запросов и ответов в сети [4].

Многие исследователи в области традиционных ИПС выделяют главные проблемы, возникающие при проектировании таких систем [2]:

- время отклика системы на поисковый запрос пользователя;
- эффективное хранение образа объекта в виде поискового индекса.

Причем первая проблема напрямую зависит от второй. В настоящее время при реализации на практике ICN-сетей обозначенные проблемы еще более усугубляются из-за увеличивающегося объема хранимой информации в кэше и неоптимальных алгоритмов построения индекса [3].

Данная статья посвящена вопросу формализации модели построения индексов для поисковых систем с целью оценки объема памяти, требуемого для хранения индексных структур.

Для оценки индекса в «традиционных» ИПС взят инвертированный индекс, поскольку он является самым популярным в настоящее время для полнотекстового поиска [1]. Данной модели сопоставляется подход иерархического префиксного именования, как наиболее известного в сетях ICN [4], [6].

Формализация модели инвертированного индекса

С точки зрения теории множеств инвертированный индекс можно представить в виде множества пост-листов, сопоставляемых набором термов (рис. 1).

Для описания формального представления модели инвертируемого индекса используются следующие условные обозначения:

- T – множество термов;
- IDoc – множество документов;

Pos – множество пост листов;

N – общее число термов тезауруса;

T_i – i-ый терм;

M_{T_i} – общее число документов, соответствующих i-ому терму T_i ;

M_{T_N} – общее число документов, соответствующих N-ому терму T_N ;

$IDdoc_j^i$ – j-ый документ, соответствующий i-ому терму T_i ;

p – текущая позиция встречаемости термина в документе;

$Pos_{M_{T_i}}^i$ – список позиций документа $IDdoc_{M_{T_i}}$, соответствующего i-му терму T_i ;

$Pos_{M_{T_i},p}^i$ – p-ая позиция встречаемости термина T_i в документе $IDdoc_{M_{T_i}}$;

P_{T_i} – максимальный номер позиции встречаемости термина T_i в документе.

С учетом принятых обозначений формально опишем инвертируемый индекс. Здесь рассматривается модель инвертируемого индекса в чистом виде без использования оптимизации.

Пусть T – множество термов, представляющее собой тезаурус поисковой системы

$$T = (\overline{T_1, T_N}) \quad (1)$$

где N- мощность этого множества.

Каждому терму T_i из этого множества соответствует множество документов, представленных идентификаторами $IDdoc$

$$IDdoc^i = (\overline{IDdoc_1^i, IDdoc_{M_{T_i}}^i}) \quad (2)$$

где M_{T_i} - мощность множества документов, связанных с термом T_i .

Каждый документ представлен списком позиций встречаемости в нем термина T_i

$$Pos_{M_{T_i}}^i = (\overline{Pos_1^i, Pos_{P_{T_i}}^i}) \quad (3)$$

где P_{T_i} - мощность множества позиций встречаемости i-го термина в документе $IDdoc_{M_{T_i}}^i$, т.е. число элементов пост-листа.

Из представленного выше следует, что мощность множества документов поисковой системы составляет

$$IDdoc = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_{T_i}} IDdoc_j^i \quad (4)$$

элементов, а мощность множества пост-листов для каждого i-го термина можно рассчитать, как

$$Pos = \sum_{j=1}^{M_{T_i}} \sum_{p=1}^{P_{T_i}} Pos_{j,p}^i \quad (5)$$

Следовательно, мощность множества всех пост-листов поисковой системы определяется выражением

$$Pos = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_{T_i}} \sum_{p=1}^{P_{T_i}} Pos_{j,p}^i \quad (6)$$

Если принять, что при хранении в памяти пост-листов под каждую позицию встречаемости выделяется один байт, то выражение (6) позволяет оценить объем памяти, требуемой под хранение индекса.

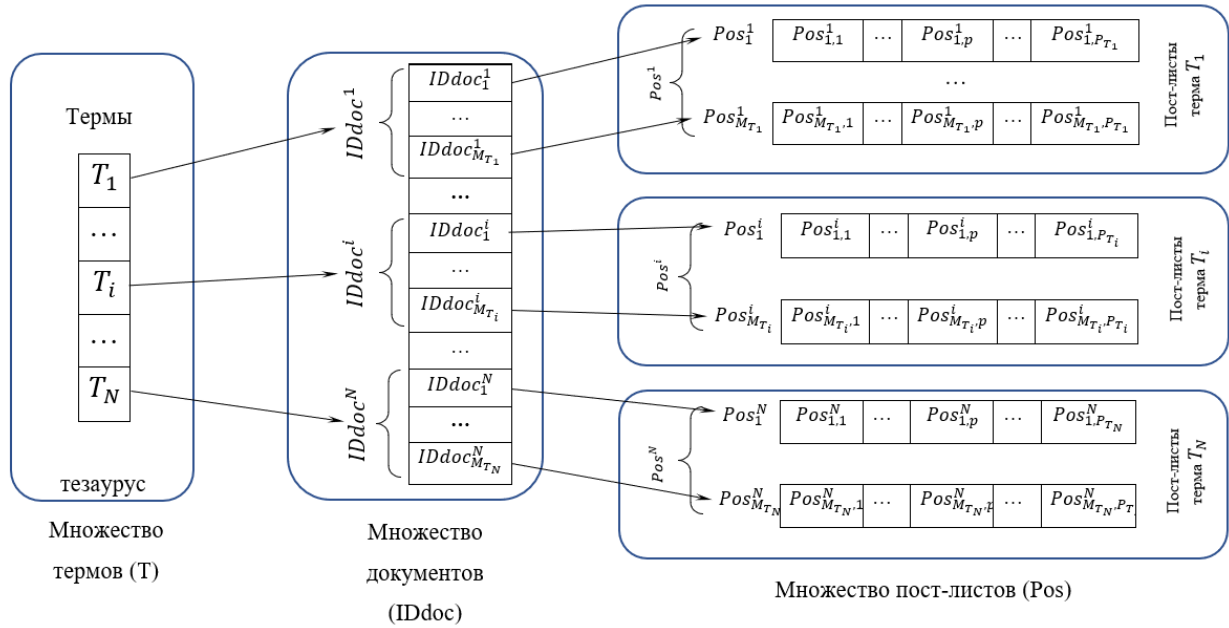


Рис. 1 – Представление инвертированного индекса множествами

Формализация модели иерархического префиксного именования для ICN сетей

При любой архитектуре ICN сетей (архитектура NDN, Pursuit, SAIL, DONA [4]) для поиска информации в каждом узле сети, участвующем в поиске данных, называемых *Content Router*, используются три базовые структуры (рис. 2):

- таблица пересылки (FIT);
- таблица интересов (PIT);
- таблица хранилищ контента (CS).

Таблица пересылки (таблица информации пересылки) – **FIT** – связывает запрос или его часть (префикс) с адресом следующего узла сети, которому нужно переслать запрос.

Таблица интересов (ожидающая таблица интересов) – **PIT** – связывает запрос с адресом источника запроса.

Таблица хранилищ контента (хранилище контента) – **CS** – связывает запрос с адресом контента в кэш-памяти узла.

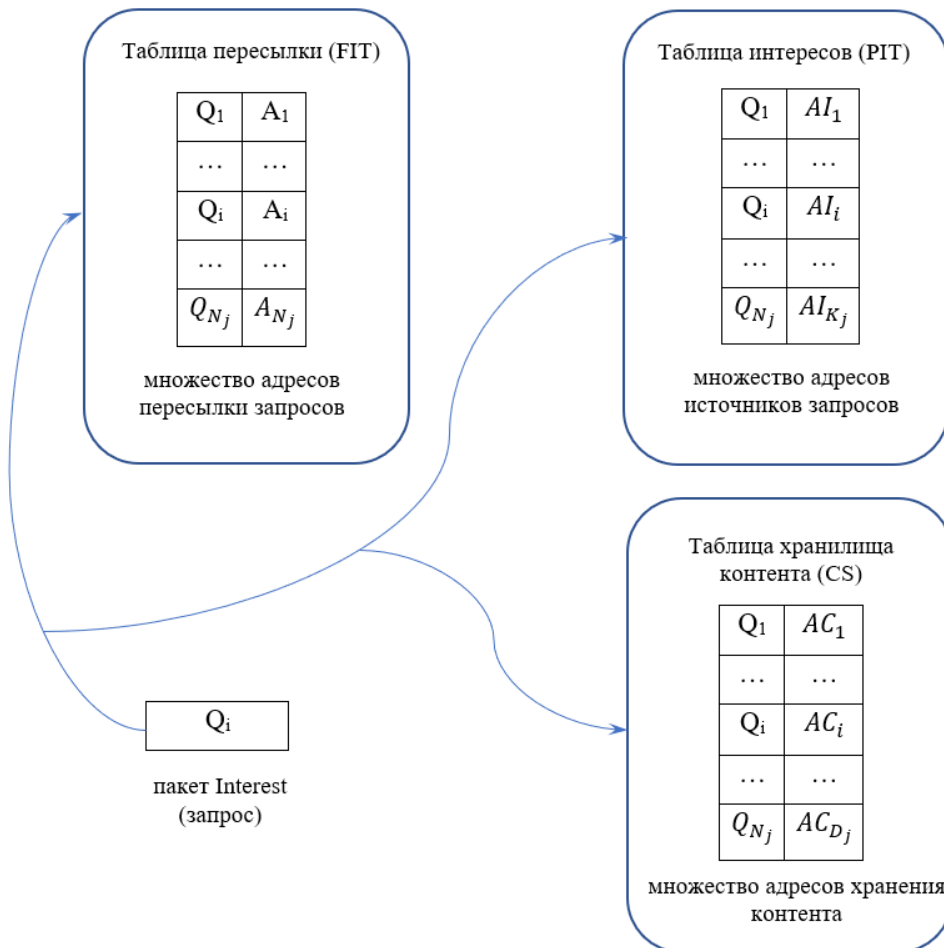


Рис. 2 – Представление базовых поисковых таблиц ICN-сетей

Каждый узел сети (конечный узел или маршрутизатор) может одновременно выступать источником запроса, узлом пересылки или хранилищем запрашиваемого контента для разных запросов.

Для описания формального представления рассматриваемых индексных множеств приняты следующие условные обозначения:

M – число узлов сети, участвующих в поиске;

N_j – максимальное число запросов для j -го узла сети, хранимых в таблице FIT;

Q_i – i -ый запрос;

A_i – адрес пересылки для i -го запроса;

K_j – максимальное число адресов источников запросов для j -го транзитного узла;

AI_i – адрес источника i -го запроса;

AC_i – адрес запрашиваемого i -го контента в кэше узла сети;

D_j – максимальный число хранимых единиц контента в кэше j -го узла сети.

Таблица пересылки (FIT) для каждого j -го узла сети представляет собой множество пар соответствия запроса адресу следующего в цепочке поиска узла

$$FIT_j = \left(\overline{(Q_1 - A_1), (Q_{N_j} - A_{N_j})} \right), \quad (7)$$

где N_j - мощность этого множества.

Аналогичным образом можно представить таблицу интересов (PIT) и таблицу хранилищ контента (CS) для j -го узла сети (8)-(9).

$$PIT_j = \left(\overline{(Q_1 - AI_1), (Q_{K_j} - AI_{K_j})} \right), \quad (8)$$

где K_j - мощность множества адресов источников запросов.

$$CS_j = \left(\overline{(Q_1 - AC_1), (Q_{D_j} - AC_{D_j})} \right), \quad (9)$$

где D_j - мощность множества адресов хранения контента.

Используя принятые определения, и, согласно (7)-(9), можно составить выражения для оценки памяти, занимаемой этими таблицами в одном j -м узле сети (10)-(12).

$$V_{FIT_j} = \sum_{i=1}^{N_j} (Q_i + A_i) \quad (10)$$

$$V_{PIT_j} = \sum_{i=1}^{K_j} (Q_i + A_i) \quad (11)$$

$$V_{CS_j} = \sum_{i=1}^{D_j} (Q_i + A_i) \quad (12)$$

учётom всех узлов сети, участвующих в поиске, объём памяти, занимаемый совокупностью каждой из этих таблиц, распределённых по узлам сети, можно оценить выражениями (13)-(15).

$$V_{FIT} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} (Q_i + A_i) \quad (13)$$

$$V_{PIT} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{K_j} (Q_i + A_i) \quad (14)$$

$$V_{CS} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{D_j} (Q_i + A_i) \quad (15)$$

Для количественной оценки можно принять следующие допущения, что длина запроса Q_i не превышает 256 символов (256 байт), в качестве адресов (A_i , Al_i) используются традиционные IP-адреса размерностью 4 байта (IPv4) или 16 байт (IPv6), а размерность адреса хранения контента AS_i определяется размерностью шины адреса кэша и составляет 44-64 бита.

При иерархическом именовании запросов на поиск данных в сетях ICN могут использоваться префиксы, т.е. поиск идёт по частичному совпадению, что в итоге позволяет сократить объём хранимых данных в справочных таблицах.

Предложенные аналитические выражения являются многопараметровыми и могут быть использованы при программном моделировании прогнозируемого объёма памяти, отводимого в узлах сети для хранения индексных структур, задействованных в процессе поиска информации в «классических» ИПС и в сетях ICN.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Манинг К.Д. Введение в информационный поиск / К. Д. Манинг, Р. Прабхакар, Х. Ше – Москва, 2011. – 519 с.
2. Вишняков Ю.М. Модели и методы построения индексов информационно-поисковых системах / Ю.М. Вишняков, С.Н. Юрчук // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – С. 153–157.
3. Варшавский П.Р. Применение методов поиска решения на основе прецедентов в информационных поисковых системах / П.Р. Варшавский, Зо Лин, Аркар Мью // Программные продукты и системы. Компьютерные и информационные науки. – 2013. – С. 385–392.
4. Xylomenos G. A Survey of Information-Centric Networking Research / G Xylomenos, C.N. Ververidis, V.A. Siris et al // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – № 2(16). – С. 1024–1049. [Electronic resource] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6563278> (accessed: 15.04.2022).
5. Hail M. On the Performance of Caching and Forwarding in Information-Centric Networking for the IoT / M. Hail, M. Amadeo, A. Molinaro et al // 13th International Conference on Wired/Wireless Internet Communication 2015, Malaga, Spain. – Pp.313–326.
6. Delvadia K. CCJRF-ICN: A Novel Mechanism for Coadjuvant Caching Joint Request Forwarding in Information Centric Networks / K. Delvadia, N. Dutta, R. Jadeja // IEEE Access. – 2021.
7. Christoforaki M. Text vs. space: Efficient geo-search query processing / M. Christoforaki, J. He, C. Dimopoulos et al // Proceedings of the 20th ACM Conference on Information and Knowledge Management, CIKM 2011, Glasgow, United Kingdom.
8. Dinh N.-T. An Efficient Distributed Content Store-Based Caching Policy for Information-Centric Networking / N.-T. Dinh, Kim Y. // 6th ACM SIGCOMM Conference on Information-Centric Networking, Macao, China, 24–26 September. – 2019.
9. Carofiglio G. Bandwidth and Storage Sharing Performance in Information Centric Networking / G. Carofiglio, M.Gallo, L. Muscariello // ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking. – 2011. – Pp. 26–31.
10. Psaras I. Modelling and Evaluation of CCN-caching Trees / I. Psaras, R.G. Clegg, R. Landa et al // International Conference on Research in Networking. – 2011. – Pp 78–91.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Manning C.D. Vvedenie v informacionnyj poisk [Introduction to search engine] / C.D. Manning, Prabhakar R., H. Sch. – Moscow, 2011. – 519 p. [in Russian]
2. Vishnyakov Y.M. Modeli i metody postroeniya indeksov informacionno-poiskovyh sistemah [Models and methods of search engines index construction] / Y.M. Vishnyakov, S.N. Yurchuk // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. [News of Southern Federal University. Technical sciences] – 2011. – P. 153–157. [in Russian]
3. Varshavskij P.R. Primenenie metodov poiska resheniya na osnove precedentov v informacionnyh poiskovyh sistemah [Application of case-based search techniques in search engines] / P.R. Varshavskij, Xo Lin, Arkar Myo // Programmnye produkty i sistemy. Komp'yuternye i informacionnye nauki [Program products and systems. Computer and information sciences]. – 2013. – P. 385–392 [in Russian]
4. Xylomenos G. A Survey of Information-Centric Networking Research / G Xylomenos, C.N. Ververidis, V.A. Siris et al // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – № 2(16). – Pp. 1024–1049. [Electronic resource]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6563278> (дата обращения: 15.04.2022).
5. Hail M. On the Performance of Caching and Forwarding in Information-Centric Networking for the IoT / M. Hail, M. Amadeo, A. Molinaro et al // 13th International Conference on Wired/Wireless Internet Communication 2015, Malaga, Spain. – Pp.313–326.
6. Delvadia K. CCJRF-ICN: A Novel Mechanism for Coadjuvant Caching Joint Request Forwarding in Information Centric Networks / K. Delvadia, N. Dutta, R. Jadeja // IEEE Access. – 2021.
7. Christoforaki M. Text vs. space: Efficient geo-search query processing / M. Christoforaki, J. He, C. Dimopoulos et al // Proceedings of the 20th ACM Conference on Information and Knowledge Management, CIKM 2011, Glasgow, United Kingdom.
8. Dinh N.-T. An Efficient Distributed Content Store-Based Caching Policy for Information-Centric Networking / N.-T. Dinh, Kim Y. // 6th ACM SIGCOMM Conference on Information-Centric Networking, Macao, China, 24–26 September. – 2019.
9. Carofiglio G. Bandwidth and Storage Sharing Performance in Information Centric Networking / G. Carofiglio, M.Gallo, L. Muscariello // ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking. – 2011. – Pp. 26–31.
10. Psaras I. Modelling and Evaluation of CCN-caching Trees / I. Psaras, R.G. Clegg, R. Landa et al // International Conference on Research in Networking. – 2011. – Pp 78–91.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.008>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА РЕЗИНОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

Зеньков Е.В.*

ORCID: 0000-0003-4414-0307,

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия;
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

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

Аннотация

В статье рассматривается методика экспериментального определения механических характеристик эластомеров (резиноподобных материалов) и учет этих характеристик при осуществлении инженерного конечно-элементного анализа. Дается краткая теория моделирования характеристик эластомеров в программном комплексе MSC Patran/Marc. Приводится описание результатов экспериментальных исследований технической резины и обработка полученных данных для задания жесткостных характеристик эластомеров по двухпараметрической модели Муни-Ривлина при проведении конечно-элементного моделирования НДС в системе MSC Patran/Marc. Выполнен вычислительный эксперимент по деформированию образца из резины для проверки работоспособности предложенной методики. Установлено, что относительная погрешность определения НДС образца в вычислительном эксперименте не превышает 2,5%.

Ключевые слова: резиноподобный материал, жесткостные характеристики, метод конечных элементов.

EXPERIMENTAL DEFINING OF ELASTOMER MECHANICAL CHARACTERISTICS FOR ORGANIZING A COMPUTATIONAL EXPERIMENT ON RUBBER-LIKE MATERIALS

Research article

Zen'kov E.V.*

ORCID: 0000-0003-4414-0307,

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia;
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

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

Abstract

The article analyzes the method of experimental defining of mechanical characteristics of elastomers (rubber-like materials) and taking them into account when conducting engineering finite element analysis. A succinct theory of elastomer characterization modeling in the MSC Patran/Marc software complex is given. The article describes the results of experimental studies of technical rubber, as well as processing of the obtained data for setting up stiffening characteristics of elastomers on the two-parameter Muni-Rivlin model in the finite-element simulation of stress strain behavior in the MSC Patran/Marc system. A computational experiment on deformation of a rubber sample was performed to check the capability of the proposed method. The relative error of sample stress strain behavior in the computational experiment is found to be below 2.5%.

Keywords: rubber-like material, stiffening characteristics, finite-element simulation method.

Введение

Производство конструкций летательных аппаратов связано с широким применением силиконовых резин, служащих в качестве уплотнителей, мембран, профильных деталей для герметизации. Указанные резиноподобные изделия способны выдерживать воздействие низких температур в высоких слоях атмосферы. Кроме того, из них изготавливают прокладки, уплотнительные кольца в гидравлических и иных жидкостных системах самолета, кожухи антиобледенителей, уплотнители топливных баков и противопожарных перегородок, амортизирующие подушки приборов, амортизаторы, поглощающие удары и вибрации без ослабления прочности связи между резиной и металлическими фланцами детали [1], [2].

При проведении математического моделирования по методу конечных элементов (МКЭ) конструкций из гиперупругих материалов появляется проблема на этапе ввода данных о механических характеристиках резиноподобного материала. В частности, в широко известном программном комплексе MSC Patran/Marc, используя модель гиперупругого материала Муни-Ривлина, требуется ввод жесткостных характеристик C_{10} и C_{01} . Для их определения требуется диаграмма растяжения материала, что найти в открытом доступе не представляется возможным. В данной работе рассматривается методика определения жесткостных характеристик резиноподобных материалов для проведения конечно-элементного анализа конструкций, содержащих резиноподобные материалы.

Математическая модель резиноподобного материала

При численном моделировании механики деформирования резиноподобных конструкций широкое применение получил метод конечных элементов. В частности, в программном комплексе MSC Patran/Marc для несжимаемого материала, такого как резина, используется зависимость напряжений от деформаций согласно закону упругости [5]

$$\sigma_i = \lambda_i \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_i} - \lambda_3 \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} \quad (1)$$

где W – потенциал энергии деформации, зависящий от главных кратностей удлинений $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и углов, определяющих направление главных осей тензора кратностей удлинений α, β, γ зависимость между которыми определяется разными моделями материала.

Общий вариант записи потенциала энергии деформации W называется полиномиальной моделью материала

$$W = \sum_{i+j}^N C_{ij} \left(\bar{I}_1 - 3 \right)^i \left(\bar{I}_2 - 3 \right)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J_{el} - 1)^{2k} \quad (2)$$

где C_{ij}, N, d_k – константы гиперупругого материала, определяемые для каждой модели экспериментальным путем, $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, I_1, I_2, I_3, I_1, I_2, I_3$ – девиаторные деформации [6].

Одним из наиболее распространенных видов потенциала энергии деформации – двухпараметрическая модель Муни-Ривлина

$$W = C_{10} \left(\bar{I}_1 - 3 \right) + C_{01} \left(\bar{I}_2 - 3 \right) + \frac{1}{d_k} (J_{el} - 1)^2 \quad (3)$$

где J_{el} – относительное изменение объема (эластичная объемная деформация), d_k – параметр сжимаемости материала

$$d_k = \frac{1 - 2\nu}{C_{10} + C_{01}} = \frac{2}{K_0} \quad (4)$$

где ν – коэффициент Пуассона, K_0 – начальный объемный модуль.

Для оценки возможности использования двухпараметрической модели Муни-Ривлина при моделировании НДС резиноподобных материалов выполнены натурные эксперименты для получения констант гиперупругого материала и вычислительный эксперимент. Для получения констант гиперупругого материала проводятся испытания на одноосное растяжение материала.

Методика и результаты натурального эксперимента

Для испытаний на стандартное растяжение в качестве образца используется лопатка с размерами по ГОСТ 270-75 [7]. Образец изготовлен из технической резины общего назначения [7]. На рис. 1 показан образец для проведения механических испытаний.

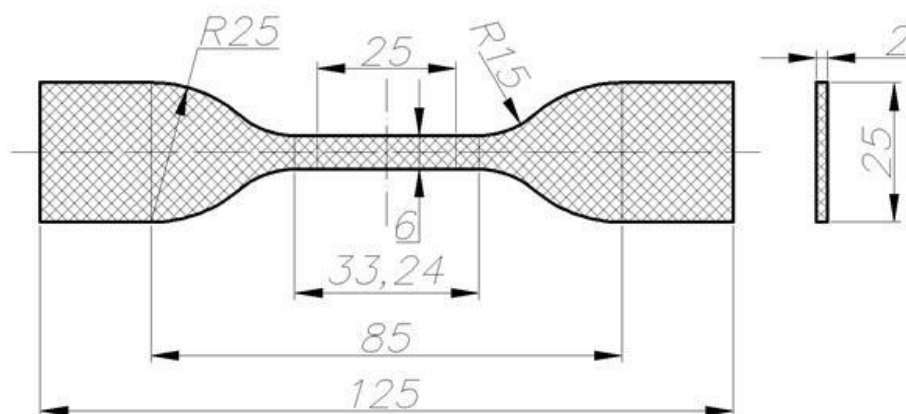


Рис. 1 – Образец по ГОСТ 270-75

Для испытаний использовалась универсальная электромеханическая испытательная машина INSTRON 5982 (рис. 2). Согласно ГОСТ 270-75 [7] испытания проведены со скоростью растяжения 500 мм/мин при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Были разрушены три идентичных образца (рис. 3).



Рис. 2 – Испытательная машина INSTRON 5982 с закрепленным образцом



Рис. 3 – Вид разрушенных образцов

Вследствие растяжения образцов со скоростью 500 мм/мин видно, что диаграммы растяжения материала показали практически идентичные результаты (рис. 4). Усреднённая диаграмма растяжения разрушенных образцов приведена на рис. 5.

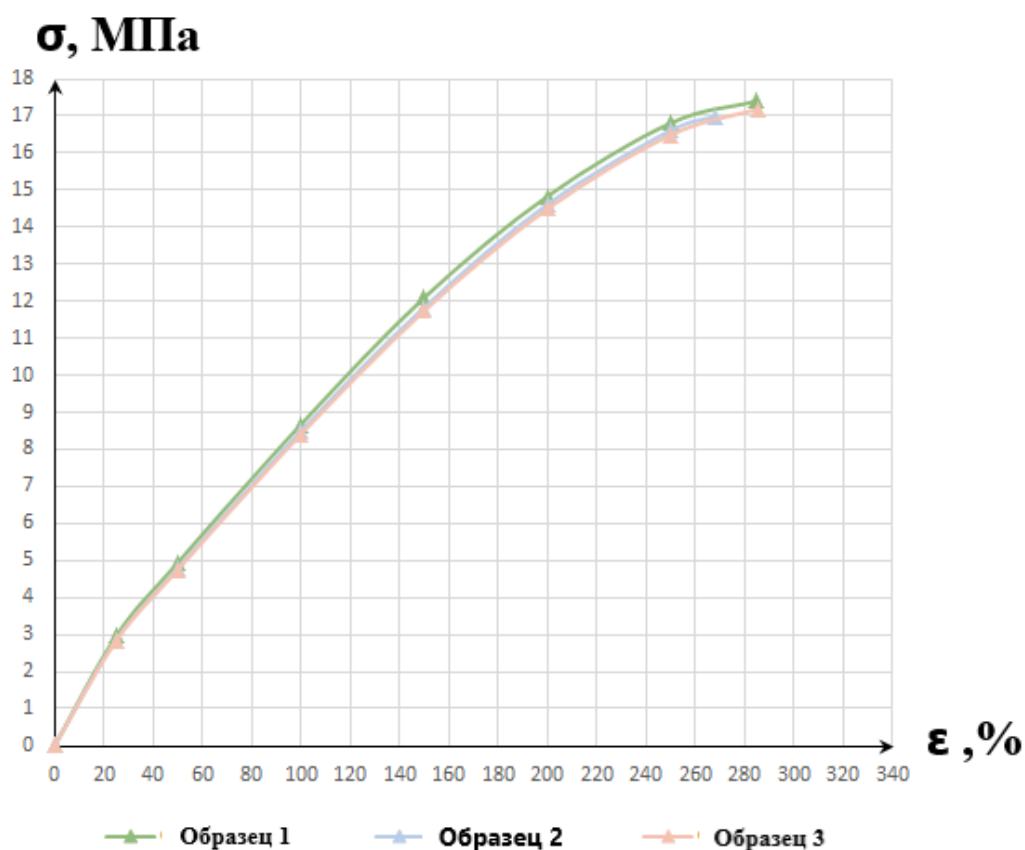


Рис. 4 – Диаграммы растяжения материала

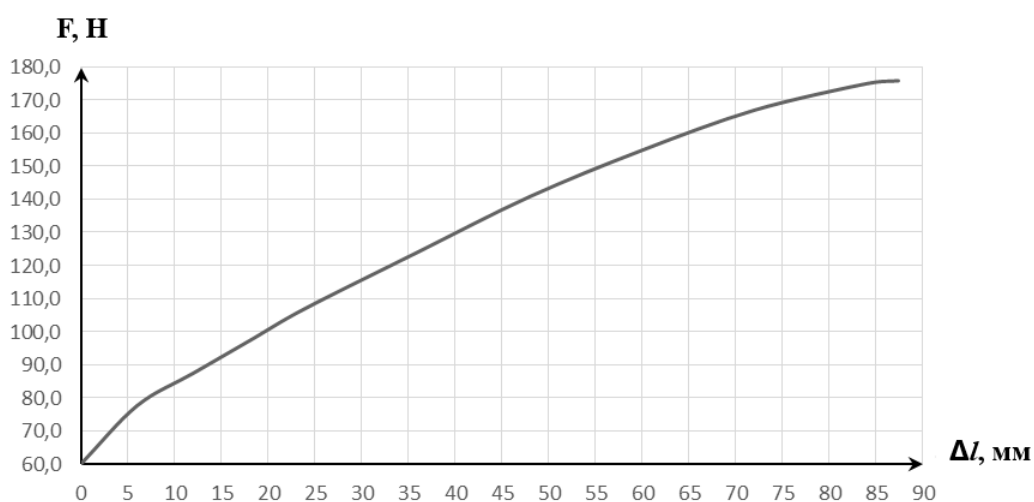


Рис. 5 – Усреднённая диаграмма растяжения образцов

При испытаниях разрушение образцов произошло при абсолютном удлинении $\Delta l = 87,2$ мм и растягивающем усилии $F = 175,8$ Н (см. рис. 5). При этом разрушающее напряжение составило $\sigma_{\max}^3 = 16,99$ МПа (рис. 4). Результаты механических испытаний были математически обработаны и получена усреднённая диаграмма растяжения испытанной резины. Результаты обработки сведены в табличный вид и сохранены в формате .csv.

Методика и результаты вычислительного эксперимента

Для учета экспериментальных диаграмм растяжения технической резины в конечно-элементной модели в системе MSC Patran по теории Муни-Ривлина необходимо полученные характеристики НДС в формате .csv загрузить в утилиту Experimental Data Fitting MSC Patran [8], [9] и далее будут вычислены жесткостные характеристики резины. В результате обработки утилитой указанных данных получены коэффициенты жесткости $C_{10} = 1,4307944$ и $C_{01} = -0,15372042$.

С целью оценки точности моделирования резиноподобных материалов выполнен вычислительный эксперимент по моделированию процесса растяжения образца из резины. Этапы разработки расчетной модели деформирования образца

из резины приведены на рис. 6. Дискретизация модели образца осуществлялась по методике [10]. Результаты расчетного НДС в растянутом образце по ГОСТ 270-75 приведены на рис. 6.

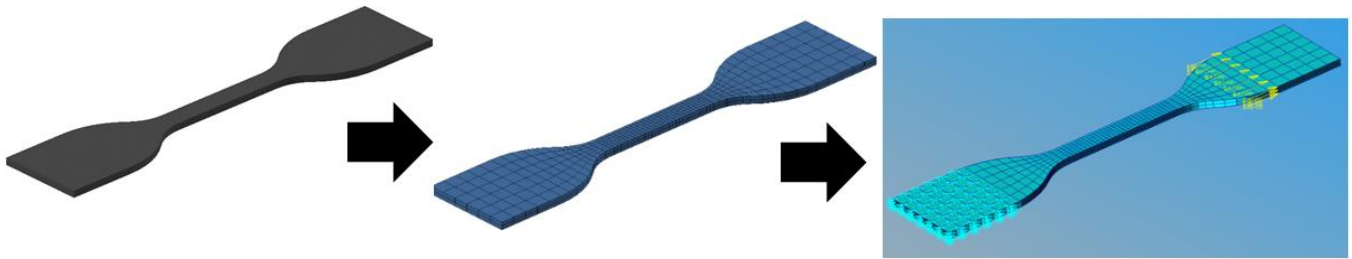


Рис. 6 – Этапы моделирования процесса растяжения резинового образца

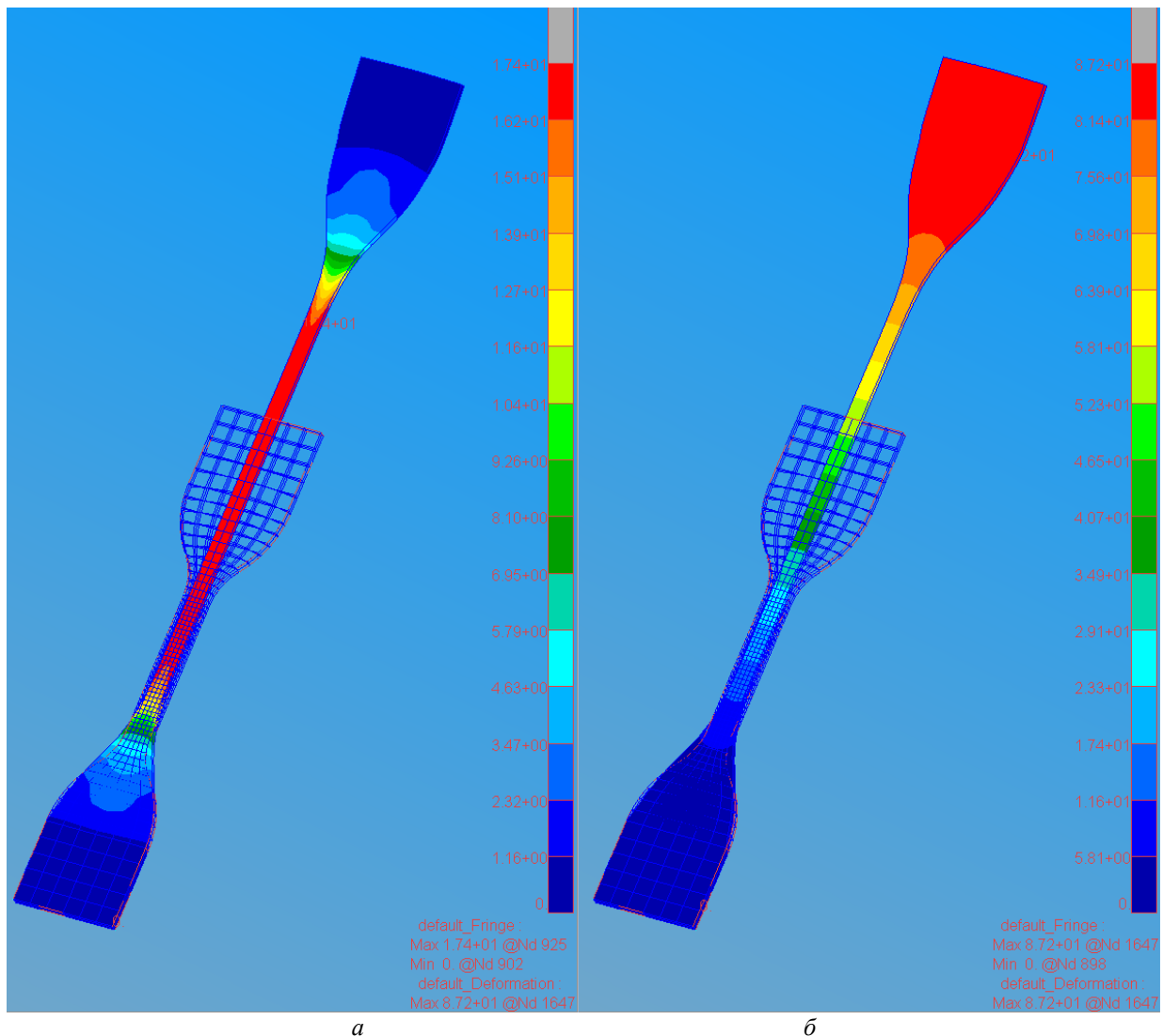


Рис. 7 – Результаты моделирования НДС образца из резины:

a – поле распределения растягивающих напряжений; *б* – поле распределения продольных перемещений

Как видно из рис. 7, в вычислительном эксперименте с характеристиками резины $C_{10} = 1,4307944$ и $C_{01} = -0,15372042$ в момент достижения образцом перемещения $\Delta l = 87,2$ мм (рис. 7, б) в материале образца расчетное растягивающее (продольное) напряжение составило $\sigma_{\max}^T = 17,4$ МПа. Таким образом, учет экспериментально определяемых жесткостных характеристик в расчетной модели образца из резины позволяет моделировать НДС этого образца с относительной погрешностью не более 2,5%, открывая при этом широкие возможности для моделирования работоспособности изделий из резиноподобных материалов.

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования НДС резиноподобного материала на примере технической резины, что позволило определить ее жесткостные характеристики и провести конечно-элементное моделирование НДС образца в виде лопатки. Установлено, что относительная погрешность определения расчетного НДС для резиноподобного материала по сравнению с натурным экспериментом не превышает 2,5%. Это позволяет осуществлять исследования в вычислительные эксперименты над изделиями, содержащими резиноподобные материалы, с инженерной точностью.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Голубев А.И. Уплотнения и уплотнительная техника / А.И. Голубев, Л.А. Кондаков и др. – Москва : Машиностроение, 1986. – 234 с.
2. Жеребков С.К. Крепление резины к металлам / С.К. Жеребков. – Москва : Госхимиздат, 1966. – 348 с.
3. Пономарев П.В. Разработка силиконовых резин и герметиков с повышенной термо-, огнестойкостью / П.В. Пономарев. – Казань : Казанский (Приволжский) Федеральный университет, 2019. – 124 с.
4. Аверко-Антонович Ю.О. Технология резиновых изделий / Ю.О. Аверко-Антонович, Р.Я. Омельченко и др. – Ленинград : Химия, 1991. – 351 с.
5. Колпак Е.П. Большие деформации резиновых мембран / Е.П. Колпак // Молодой учёный. – 2014. – № 16(75). – С. 78-83.
6. Финк Т.Б. Взаимодействие гиперупругих тел с жесткими телами / Т.Б. Финк. – Казань : Казанский (Приволжский) Федеральный университет, 2015. – 21 с.
7. ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. Межгосударственный стандарт. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 11 с.
8. Слезкин Д.В. Построение модели полимерного резиноподобного материала с помощью инструмента MSC.Software Patran Experimental Data Fitting / Д.В. Слезкин. – Москва : MSC Software Corporation, 2008. – 20 с.
9. Зеньков Е.В. Дискретное моделирование напряженно-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок / Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик, А.А. Пыхалов // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 7(54). – С. 6–12.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 572 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Golubev A.I. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika [Seals and sealing technology] / A.I. Golubev, L.A. Kondakov et al. – Moscow : Mashinostroenie, 1986. – 234 p. [in Russian]
2. Zherebkov S.K. Krepleniye reziny k metallam [Fastening rubber to metals] / S.K. Zherebkov. – Moscow : Goshimizdat, 1966. – 348 p. [in Russian]
3. Ponomarev P.V. Razrabotka siloksanovykh rezin i germetikov s povyshennoy termo-, ognestoykost'yu [Development of siloxane rubbers and sealants with increased thermal and fire resistance] / P.V. Ponomarev. – Kazan : Kazan (Volga Region) Federal University, 2019. – 124 p. [in Russian]
4. Averko-Antonovich Yu.O. Tekhnologiya rezinovykh izdeliy [Technology of rubber products] / Yu.O. Averko-Antonovich, R.Ya. Omelchenko et al. – Leningrad : Chemistry, 1991. – 351 p. [in Russian]
5. Kolpak E.P. Bol'shiye deformatsii rezinovykh membran [Large deformations of rubber membranes] / E.P. Cap // Molodoy uchonyy [Young scientist]. – 2014. – No. 16(75). – P. 78-83. [in Russian]
6. Fink T.B. Vzaimodeystviye giperuprugikh tel s zhestkimi telami [Interaction of hyperelastic bodies with rigid bodies] / T.B. Fink. – Kazan : Kazan (Volga Region) Federal University, 2015. – 21 p. [in Russian]
7. GOST 270-75. Rezina. Metod opredeleniya uprugoprochnostnykh svoystv pri rastyazhenii. Mezhhgosudarstvennyy standart [Rubber. Method for determination of elastic-strength properties under tension. Interstate standard]. – Moscow : Standartinform, – 2008. – 11 p. [in Russian]
8. Slezkin D.V. Postroyeniye modeli polimernogo rezinopodobnogo materiala s pomoshch'yu instrumenta MSC.Software Patran Experimental Data Fitting [Construction of a polymer rubber-like material model using the MSC.Software Patran Experimental Data Fitting tool] / D.V. Slezkin. – Moscow: MSC Software Corporation, 2008. – 20 p. [in Russian]
9. Zenkov E.V. Diskretnoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ploskotsilindricheskikh obraztsov s kontsentratorami napryazheniy v vide kanavok [Discrete modeling of the stress-strain state of plane-cylindrical specimens with stress concentrators in the form of grooves] / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik, A.A. Pykhalov // Vestnik IrGTU [Bulletin of ISTU]. – 2011. – No. 7(54). – P. 6-12. [in Russian]
10. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite element method in engineering] / O. Zenkevich. – Moscow : Mir, 1975. – 572 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.009>**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СВЧ-КАМЕРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКА**

Научная статья

Кисель Н.Н.^{1,*}, Ковалев А.В.²^{1,2} Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

* Корреспондирующий автор (nnkisel[at]sfedu.ru)

Аннотация

Использование сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля для нагрева и сушки сельскохозяйственных материалов – весьма перспективное направление, так как это значительно сокращает продолжительность технологических операций, не снижает пищевой ценности и обеспечивает высокое санитарное состояние продукции. Для того чтобы обеспечить равномерный нагрев, необходимо получить равномерное распределение поглощаемой мощности в объеме диэлектрика. В данной работе рассмотрено две модели СВЧ-камеры для нагрева диэлектрика – прямоугольной и цилиндрической формы. С помощью программы FEKO выполнено моделирование для случаев с использованием двух и четырех источников излучения и для двух разных диэлектриков, с параметрами, соответствующими воде и пшенице. Полученные результаты показывают, что цилиндрическая камера обеспечивает более равномерное распределение поглощаемой мощности в объеме, а следовательно, более равномерный нагрев диэлектрика, чем прямоугольная. Одним из возможных вариантов реализации камеры для СВЧ-нагрева диэлектрика может являться вращающаяся цилиндрическая камера. Ее применение позволит обеспечить равномерный нагрев при меньшем числе излучателей за счет выбора оптимальной скорости поворота цилиндра.

Ключевые слова: СВЧ-камера, обработка сельскохозяйственных материалов, сельскохозяйственные машины и оборудование, диэлектрик, моделирование.

STUDY OF THE SHAPE OF A UHF-CHAMBER FOR DIELECTRIC HEATING

Research article

Kisel' N.N.^{1,*}, Kovalev A.V.²^{1,2} Southern Federal University, Taganrog, Russia;

* Corresponding author (nnkisel[at]sfedu.ru)

Abstract

The use of ultrahigh-frequency (UHF) electromagnetic field for heating and drying of agricultural materials is a very promising direction, as it significantly reduces the duration of technological operations while not affecting the nutritional value, and ensures a high sanitary condition of products. In order to achieve uniform heating, it is necessary to achieve a uniform distribution of the absorbed power in the volume of dielectric. In this paper, two models of UHF chamber for heating dielectric in rectangular and cylindrical form. With the help of the FEKO program, simulations were made for cases with two and four radiating units for two different dielectrics with parameters corresponding to water and wheat. The results show that the cylindrical chamber provides a more even distribution of the absorbed power in the volume, and therefore a more uniform heating of the dielectric than the rectangular one. One of the possible variants of the chamber models for dielectric UHF-heating can be a rotating cylindrical chamber. The use of the model makes it possible to achieve uniform heating at a smaller number of radiating units by selecting the optimal cylinder turning speed.

Keywords: UHF-chamber, processing of crops materials, farming machinery and equipment, dielectric, simulation.

Введение

СВЧ энергия применяется в различных сферах промышленности: в процессах сушки и выпаривания в промышленности особо чистых веществ, для тепловой обработки строительных материалов, в оттаивании мерзлых грунтов, в производстве резинотехнических изделий, например, в сушке и дезинсекции зерна, в текстильной промышленности и др. Использованию СВЧ-нагрева для обработки различных диэлектрических материалов посвящены работы [1], [3], [5], [8]. В пищевой промышленности нагрев в электромагнитном поле позволяет интенсифицировать теплообменные процессы, обеспечить микробиологическую безопасность и повысить пищевую ценность сырья. На основании международных соглашений для СВЧ-установок применяются частоты 895-915 МГц и 2350-2450 МГц [8]. Основной задачей при использовании энергии СВЧ для обработки материалов является необходимость обеспечения равномерного нагрева всего обрабатываемого материала.

Методы и принципы исследования

Для того чтобы обеспечить равномерный нагрев диэлектрика, необходимо добиться равномерного распределения поглощаемой мощности в объеме диэлектрика. Распределение электромагнитного поля внутри СВЧ-камеры напрямую зависит от ее формы и расположения облучателей. В данной работе для определения оптимальной конструкции было рассмотрено две модели СВЧ-камеры, реализация которых является наиболее просто реализуемой.

Первая модель показана на рисунке 1. Она представляет собой прямоугольную камеру, внутри которой на некотором расстоянии от стенок расположен диэлектрик такой же формы. В качестве облучающих антенн используются волноводно-щелевые антенны габаритами 43x86 мм, расположенные вплотную к стенкам камеры. Излучение происходит через щели, прорезанные в широкой стенке волновода. На рис. 1а показана прямоугольная камера с двумя источниками излучения, а на рис. 1б – с четырьмя.

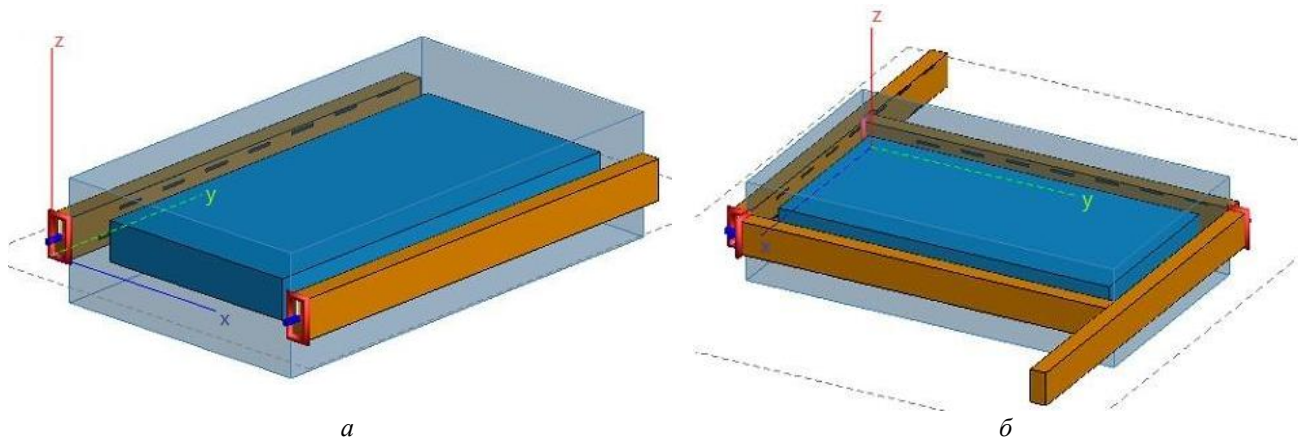


Рис. 1 – Модель прямоугольной СВЧ-камеры:
a – с двумя источниками облучения;
б – с четырьмя источниками облучения

Вторая модель показана на рисунке 2 и представляет собой цилиндрическую камеру, заполненную диэлектриком. В качестве излучателей используются волноводно-щелевые антенны, аналогично предыдущему случаю. Так же, как и в модели, описанной выше, камеры различаются количеством источников облучения: два на рисунке 2*a* и четыре на рисунке 2*б*.

Одновременное использование нескольких облучателей, расположенных на противоположных стенках камеры, обусловлено необходимостью обеспечения равномерного нагрева диэлектрика.

Размеры модели выбраны таким образом, что объем нагреваемого вещества одинаков вне зависимости от используемой формы камеры.

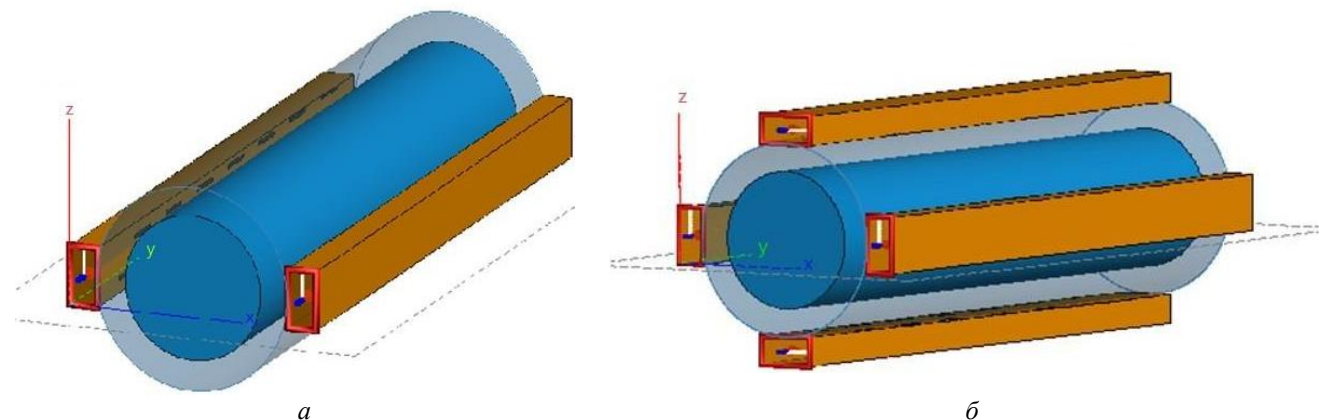


Рис. 2 – Модель цилиндрической СВЧ-камеры:
a – с двумя источниками облучения;
б – с четырьмя источниками облучения

Для получения распределения электромагнитного поля и удельной поглощенной мощности в объеме диэлектрика используется компьютерное моделирование в программе FEKO. Для решения задачи использовался метод моментов. Чтобы снизить вычислительные требования, решение задачи выполнено в два этапа, на основе декомпозиции. На первом этапе было получено решение антенной задачи о распределении поля в раскрыве, т.е. выполнен расчет распределения полей на прямоугольной площадке, соответствующей излучающей стенке волновода. На втором этапе, используя прямоугольную площадку с уже известным распределением полей в качестве источника электромагнитного поля, был произведен расчет распределения поглощаемой мощности в объеме камеры.

Основные результаты

Было промоделировано распределение удельной поглощаемой мощности в СВЧ-камере, внутри которой был расположен диэлектрик. Проведены расчеты для двух диэлектриков, параметры которых соответствуют воде ($\epsilon = 81$, $\tan\delta = 0.1$) и пшенице ($\epsilon = 4$, $\tan\delta = 0.1$). Электрофизические параметры диэлектриков не изменялись, поскольку расчет производился на одной частоте, которая была принята равной 2.45 ГГц.

На рисунках 3 и 4 представлены распределения удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении прямоугольной камеры при использовании в качестве диэлектрического заполнения воды и пшеницы, соответственно. Рисунки 3*a* и 4*a* показывают распределение мощности при использовании двух источников излучения, а Рисунки 3*б* и 4*б* – четырех источников.

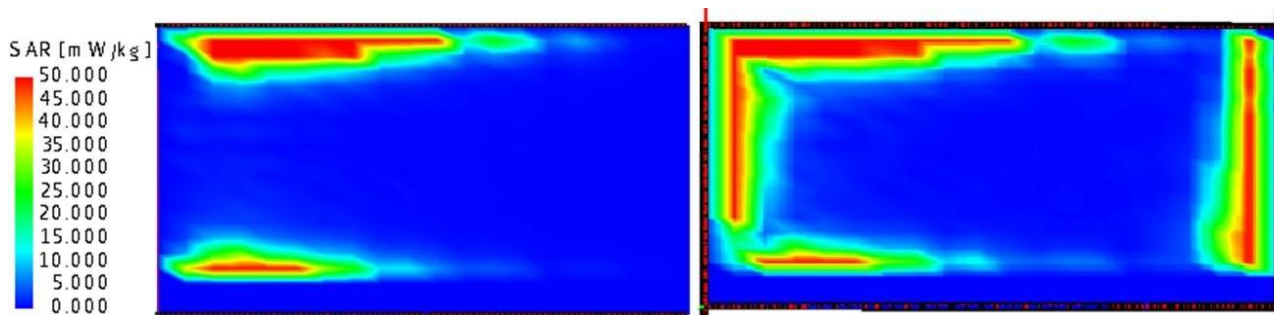


Рис. 3 – Распределение удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении прямоугольной камеры, заполненной водой:
а – с двумя источниками облучения;
б – с четырьмя источниками облучения

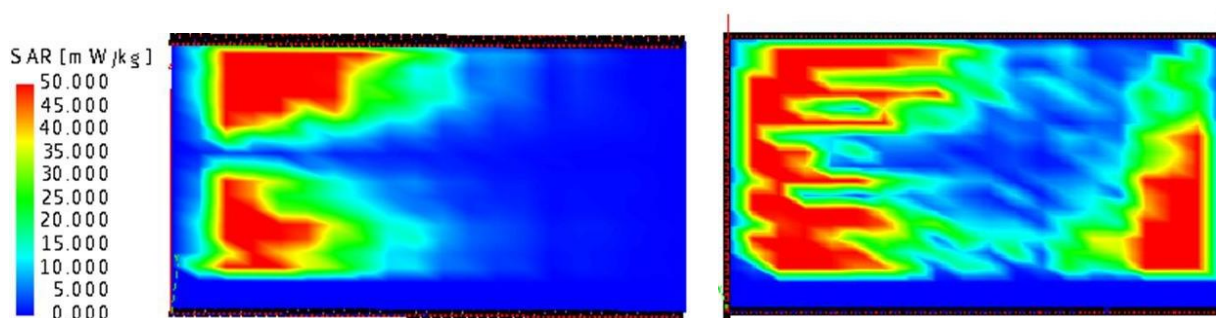


Рис. 4 – Распределение удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении прямоугольной камеры, заполненной пшеницей:
а – с двумя источниками облучения;
б – с четырьмя источниками облучения

Рисунки 5 и 6 иллюстрируют распределение удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении цилиндрической камеры при использовании в качестве диэлектрического заполнения воды и пшеницы, соответственно. Распределение мощности при использовании двух источников излучения показано на рисунках 5*а* и 6*а*. На рисунках 5*б* и 6*б* представлено распределение мощности при использовании четырех источников.

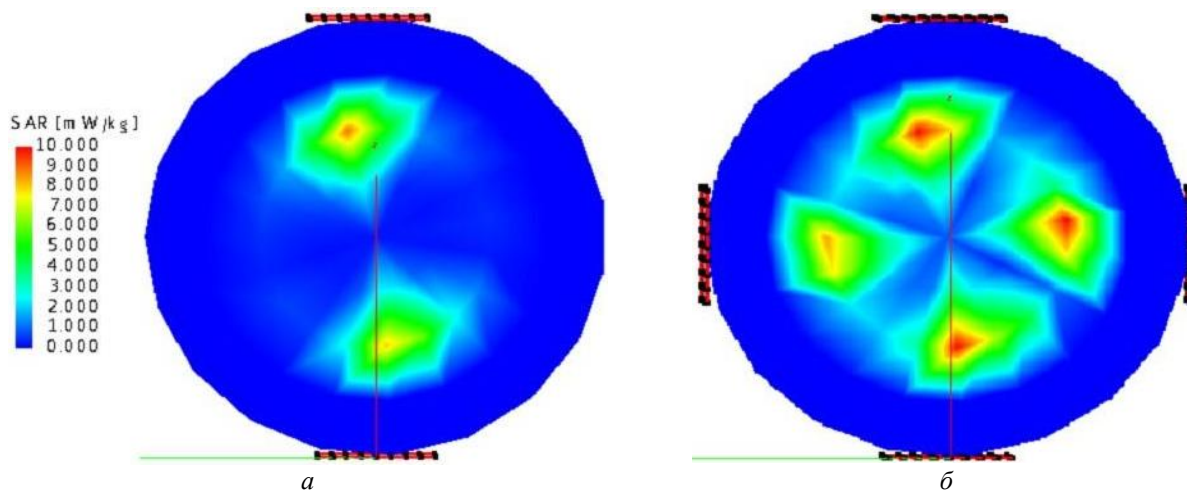


Рис. 5 – Распределение удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении цилиндрической камеры, заполненной водой:
а – с двумя источниками облучения;
б – с четырьмя источниками облучения

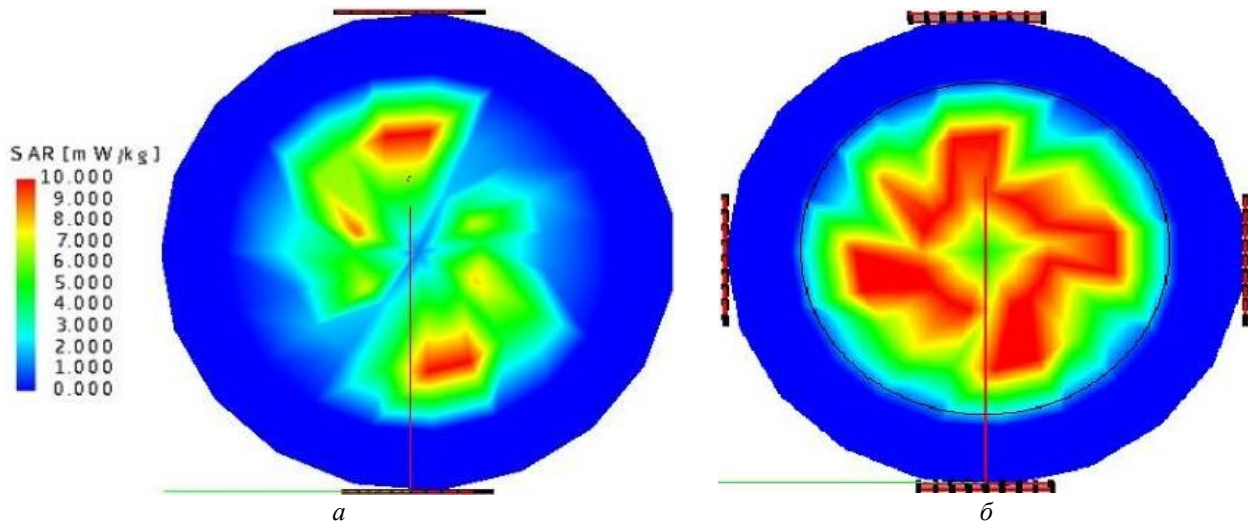


Рис. 6 – Распределение удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении цилиндрической камеры, заполненной пшеницей:
 а – с двумя источниками облучения;
 б – с четырьмя источниками облучения

Полученные результаты подтверждают теоретическое предположение, что при использовании четырех источников распределение поглощаемой мощности получается существенно более равномерным, чем при использовании двух источников. Кроме того, видно, что цилиндрическая камера обеспечивает более равномерное распределение поглощаемой мощности, а следовательно, нагрев диэлектрика, чем прямоугольная.

Следует отметить, что использование одновременно нескольких облучателей может быть затруднено в силу материальных или технических причин. Поэтому одним из возможных вариантов реализации камеры для СВЧ-нагрева диэлектрика может являться вращающаяся цилиндрическая камера.

Упрощенная конструкция такой камеры, промоделированная в программе FEKO, показана на рисунке 7. Цилиндрическая камера вращается вокруг металлического стержня, который проходит в центре цилиндра вдоль его оси. На рисунке 8 показано распределение удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении камеры, заполненной пшеницей.

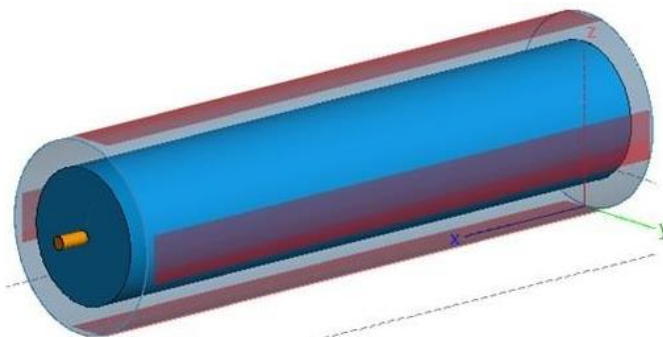


Рис. 7 – Модель цилиндрической СВЧ-камеры с четырьмя источниками облучения

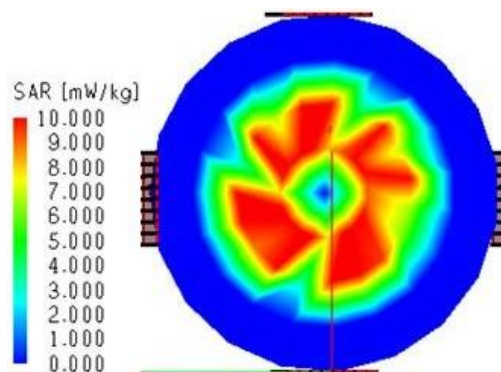


Рис. 8 – Распределение удельной поглощаемой мощности в поперечном сечении цилиндрической камеры

Заключение

В данной работе рассмотрено две модели СВЧ-камеры для нагрева диэлектрика – прямоугольной и цилиндрической формы. С помощью программы FEKO выполнено моделирование для случаев с использованием двух и четырех источников излучения и для двух разных диэлектриков, с параметрами, соответствующими воде и пшенице.

Полученные результаты показывают, что цилиндрическая камера обеспечивает более равномерное распределение поглощаемой мощности в объеме, а следовательно, более равномерный нагрев диэлектрика, чем прямоугольная.

Одним из возможных вариантов реализации камеры для СВЧ-нагрева диэлектрика может являться вращающаяся цилиндрическая камера. Ее применение позволит обеспечить равномерный нагрев при меньшем числе излучателей за счет выбора оптимальной скорости поворота цилиндра.

Финансирование

Научные исследования выполнены в рамках проекта «Создание высокотехнологического производства аппаратно-программных комплексов обработки сельхозсырья на основе СВЧ излучения» (Соглашение с Минобрнауки РФ № 075-11-2019-083 от 20.12.2019 г., Договор ЮФУ № 18 от 20.09.2019 г., номер работы в ЮФУ № ХД/19-25-РТ).

Funding

This work was supported by the project “Creating a high-tech production of hardware and software systems for processing agricultural raw materials based on microwave radiation” (Agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, No 075-11-2019-083, dated 20.12.2019; Agreement with Southern Federal University, No 18, dated 20.09.2019; work number in Southern Federal University is HD/19-25-RT).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Шаталов А.Л. Интенсификация теплообменных процессов электромагнитным полем сверхвысокой частоты. : дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Шаталов Александр Леонидович. – Москва, 1999. – 275 с.
2. Анфиногентов В.И. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков. : дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18, 05.12.07 / Анфиногентов Владимир Иванович. – Казань, 2006. – 340 с.
3. Kubo M.T.K. Thermal process of fruit juices using microwaves: multiphysics modeling and enzyme inactivation / M.T.K. Kubo // Nantes, Ecole nationale vétérinaire. – 2018. [Electronic resource]. URL: semanticsscholar.org/paper/Thermal-process-of-fruit-juices-using-microwaves-%3A-Kubo-Tiaki/5eabee9467ba0db067d1f3176b7f33af3bafd836#paper-header (accessed: 14.04.2022).
4. Bykov Y.V. High-Temperature Microwave Processing of Materials / Y.V. Bykov, K.I. Rybakov, V.E. Semenov // Journal of Physics, D-Applied Physics. – 2001. – № 34(13). – Pp. 55–75.
5. Meredith R. Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating / R. Meredith. – London. : The Institution of Engineering and Technology, 2011. – 380 p. DOI: 10.1049/PBPO025E.
6. Stanculovic S. Theoretical synthesis and experimental measurements of slotted waveguide feeding systems for 2.45 GHz industrial microwave heating installations / S. Stanculovic. – Research Center Karlsruhe (FZKA), 2006. – 146 p. DOI: 10.5445/IR/1000005658.
7. Мамонтов А.В. Разработка и исследование СВЧ устройств для термообработки диэлектрических материалов. : дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07 / Мамонтов Александр Владимирович –Москва, 2005. –159 с.
8. Рушиц А.А. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании / А.А. Рушиц, Е. И. Щербакова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 9–15.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Shatalov A.L. Intensifikaciya teploobmennyyh processov elektromagnitnym polem sverhvysoj chastyoty. [Intensification of heat exchange processes by an electromagnetic field of ultrahigh frequency]: dis....of PhD in Technical Science: 05.17.08 / SHatalov Aleksandr Leonidovich. – Moscow, 1999. – 275 p. [in Russian]
2. Afinogentov V.I. Matematicheskoe modelirovanie SVCH nagreva dielektrikov. [Mathematical modeling of microwave heating of dielectrics]: dis....of PhD in Technical Science: 05.13.18, 05.12.07 / Anfinogentov Vladimir Ivanovich. – Kazan, 2006. – 340 p. [in Russian]
3. Kubo M.T.K. Thermal process of fruit juices using microwaves: multiphysics modeling and enzyme inactivation / M.T.K. Kubo // Nantes, Ecole nationale vétérinaire. – 2018. [Electronic resource]. URL: semanticsscholar.org/paper/Thermal-process-of-fruit-juices-using-microwaves-%3A-Kubo-Tiaki/5eabee9467ba0db067d1f3176b7f33af3bafd836#paper-header (accessed: 14.04.2022).
4. Bykov Y.V. High-Temperature Microwave Processing of Materials / Y.V. Bykov, K.I. Rybakov, V.E. Semenov // Journal of Physics, D-Applied Physics. – 2001. – № 34(13). – Pp. 55–75.
5. Meredith R. Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating / R. Meredith. – London. : The Institution of Engineering and Technology, 2011. – 380 p. DOI: 10.1049/PBPO025E.
6. Stanculovic S. Theoretical synthesis and experimental measurements of slotted waveguide feeding systems for 2.45 GHz industrial microwave heating installations / S. Stanculovic. – Research Center Karlsruhe (FZKA), 2006. – 146 p. DOI: 10.5445/IR/1000005658.
7. Mamontov A.V. Razrabotka i issledovanie SVCH ustrojstv dlya termoobrabotki dielektricheskikh materialov. [Development and research of microwave devices for heat treatment of dielectric materials] : dis....of PhD in Technical Science: 05.12.07 / Mamontov Aleksandr Vladimirovich. – Moscow, 2005. – 159 p. [in Russian]
8. Rushchic A.A. Primenenie SVCH-nagreva v pishchevoj promyshlennosti i obshchestvennom pitanii [The use of microwave heating in the food industry and catering] / A.A. Rushchic, E.I. Shcherbakova // Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii. [Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and biotechnologies]. – 2014. – Vol. 2. – № 1. – P. 9–15. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.010>

СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Научная статья

Коротков А.Н.^{1,*}, Ань Чао²

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия;

² Чунцинский университет искусств и наук, Чунцин, Китай

* Корреспондирующий автор (korotkov.a.n.[at]mail.ru)

Аннотация

В представленной работе описаны процессы разработки и изготовления моделей реальных объектов в виде действующей модели шахтного копра и модели искусственной мышцы «McKibben». Создание модели шахтного копра осуществлялось с использованием программ «FUSION 360», «INVENTOR», «POWERMILL», «КОМПАС-3D» и станка с ЧПУ модели DMG MORI SEIKI NMV 5000 DCG. В качестве инструментов для изготовления деталей шахтного копра использовались твердосплавные концевые фрезы, сверла и метчики. Расчет режимов резания осуществлялся с использованием программы «POWERMILL». Обработка деталей велась с использованием смазочно-охлаждающей жидкости марки «Blasocut 4000 CF» швейцарского производителя «Blaser Swissslube AG». Роботизированная модель шахтного копра работает в автоматическом цикле с подъемом и опусканием двух шахтных клетей, с находящимися в них фигурками шахтеров, у которых загораются по определенной схеме фонари в их касках. Автоматическое перемещение клетей сопровождается звуковым эффектом в виде гимна университета, в котором спроектирована и изготовлена модель шахтного копра.

Модели тех или иных органов человека в виде роботизированных протезов и их элементов получают все более широкое распространение в медицинской практике. К таким устройствам относится модель искусственной мышцы «McKibben» и вращающийся сустав на ее основе, перспективы разработки и применения которых оцениваются в данной работе.

Общим в представленных моделях шахтного копра и искусственной мышцы «McKibben» является процесс создания роботизированных устройств, моделирующих реальные объекты и имеющих ряд одинаковых технических подходов и решений.

Ключевые слова: модель шахтного копра, пневматическая искусственная мышца, вращающийся сустав, станок с ЧПУ, программы «FUSION 360», «КОМПАС-3D», «PowerMILL».

CREATION OF ROBOTIC DEVICES SIMULATING THE FUNCTIONING OF REAL OBJECTS

Research article

Korotkov A.N.^{1,*}, An Chao²

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia;

² Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing, China

* Corresponding author (korotkov.a.n.[at]mail.ru)

Abstract

The presented work describes the processes of development and manufacture of models of real objects in the form of a working model of mining copra and artificial muscle «McKibben». The mining copra model was created with the software of «FUSION 360», «INVENTOR», «POWERMILL», «COMPASS-3D» and CNC machine DMG MORI SEIKI NMV 5000 DCG. Carbide end-milling cutter, twist drills and cutting taps were used as tools for manufacture of mining copra parts. The calculation of cutting modes was made in the «POWERMILL» program. The part processes was carried out with «Blasocut 4000 CF» cutting emulsion of the Swiss manufacturer «Blaser Swissslube AG». The robotic model of a mine copra operates in an automatic cycle with lifting and lowering of two shaft cages, with figurines of miners inside, which light up according to a certain lantern schemes in their helmets. The automatic movement of the cages is accompanied by a sound effect in the form of the university anthem, where the model of mine copra was designed and manufactured.

Models of human organs in the form of robotic prostheses and their components are becoming increasingly common in medical practice. Such devices include a model of artificial muscle «McKibben» and rotating joint on its basis, prospects of development and application of which are estimated in this work.

The presented models of mine copra and artificial muscle «McKibben» have in the common the process of creating robotic devices that simulate real objects and have a number of similar technical approaches and solutions.

Keywords: model of mining copra, pneumatic artificial muscle, rotating joint, CNC processing unit, programs «FUSION 360», «COMPAS-3D», «PowerMILL».

Введение

В ряде случаев представляется полезным моделировать работу тех или иных объектов для прогнозирования их поведения в различных ситуациях, для реализации демонстрационных задач, а также в медицинских целях для воспроизведения функционирования тех или иных органов. В этом контексте выполнена работа, направленная на создание модели шахтного копра, (наземной части шахтного сооружения [1], [2]) уменьшенная в 150 раз и сделана оценка перспектив разработки и применения вращающегося сустава на основе искусственной пневматической мышцы «McKibben» [8].

Использование подхода, основанного на моделировании объектов, позволяет проводить анализ эффективности использования моделируемых конструкций при их реальной визуализации. В этом случае становится также возможным

оптимизировать затраты на изготовление проектируемых объектов еще на этапе технологической подготовки производства.

Основная часть

Модель шахтного копра действующая – в ней поднимаются и опускаются две шахтные клетки, в которых располагаются фигурки шахтеров в защитных касках с включенными шахтными фонарями. Копер имеет стандартное освещение для сооружений большой высотности – т.е. красные светодиоды на наиболее высоких элементах копра. Внешний вид модели шахтного копра изображен на рис. 1.

Все детали шахтного копра (кроме стандартных, типа электродвигателей, микросхем и др.) изготавливались из сплава Д16 на станке с ЧПУ [3] модели DMG MORI SEIKI NMV 5000 DCG.

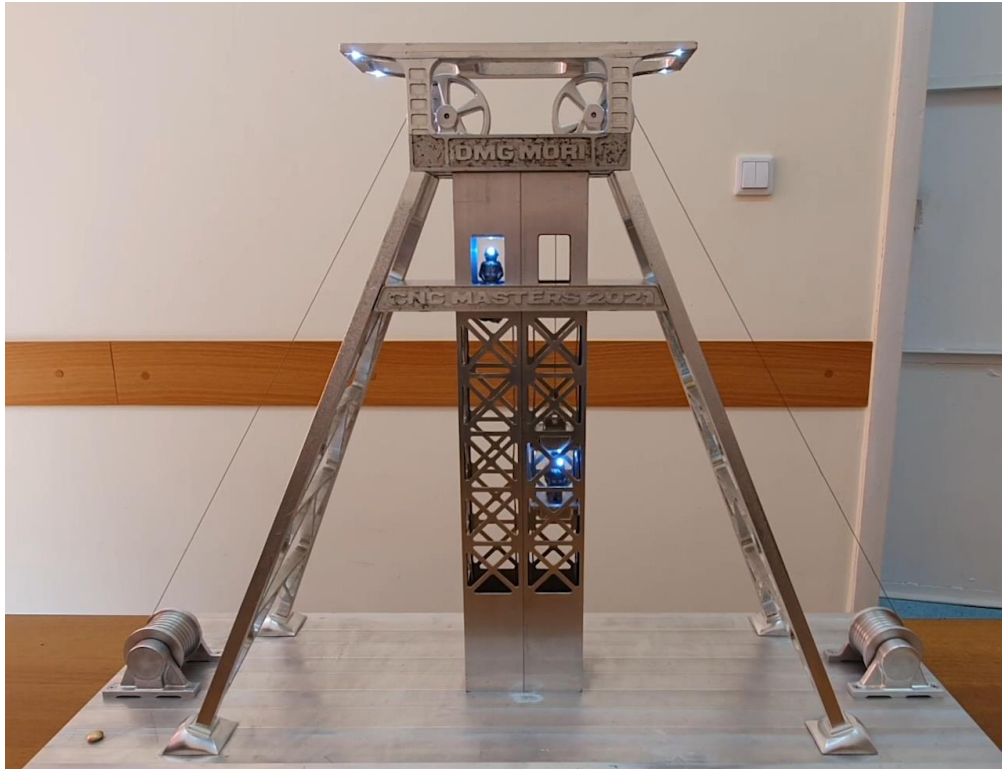


Рис. 1 – Внешний вид модели шахтного копра

Модель шахтного копра состоит из 27 отдельных деталей, форма и размеры которых проектировалась с помощью программного обеспечения: «FUSION 360» [4], «INVENTOR» [5], «PowerMILL» [6], «КОМПАС-3D» [7].

Программа «FUSION 360» – это удобный твердотельный редактор, который позволяет работать с поверхностями, с сеткой, с листовым металлом. Дает возможность комплектовать сборочные единицы из различных компонентов.

Готовую модель можно графически обработать, чтобы получить реалистичный вид. Можно также сделать анимационный фильм, вывести модель на чертеж и подготовить всю необходимую конструкторскую документацию.

Программное обеспечение «INVENTOR» специально создавалось для решения задач, связанных с машиностроительной отраслью. Имеет возможность работать с трехмерными объектами будущих изделий, позволяет сформировать требуемую деталь и увидеть, как она будет выглядеть в действительности. В этом участвует 3D – графика и визуализация. Программа имеет обширный набор сведений о различных материалах (стали, пластики, дерево, резина и др.) а также может автоматически рассчитать и определять вес, когда важно знать вес готового устройства или механизма. Из отдельных деталей можно собрать механизм, в программе это именуется – «сборка», а в сборке можно назначить порядок соединения деталей, которые будут перемещаться и соединятся друг с другом. Таким образом, можно наблюдать за тем, как будет работать собранный механизм.

Программа также позволяет разрабатывать чертежи и другую документацию.

Программа «PowerMILL» позволяет разрабатывать управляющие программы для многоосевой высокопроизводительной механической обработки сложных изделий на станке с ЧПУ. С помощью программы можно также вести обработку плоских поверхностей, снимать фаски, формировать скругления и осуществлять сверление. Причем, при сверлении отверстий система автоматически определяет диаметр отверстий, глубину и их расположение. При обработке отверстий большего диаметра «PowerMILL» позволяет заменить процесс сверления фрезерованием отверстий по спиральной траектории. Кроме того, программа «PowerMILL» позволяет рассчитывать режимы резания для обработки заготовок.

Программное обеспечение «КОМПАС-3D» позволяет строить трехмерные объёмные твердые тела. Например, для построения 3D-модели такой детали, как цилиндр требуется нарисовать эскиз в одной из 3-х плоскостей. Далее пользуются командой «элемент выдавливания» путем выбора, какой эскиз нужно «выдавить», задать необходимые параметры и завершить операцию. Программа в автоматическом режиме произведет расчеты и построит трехмерный твердый объект в рабочем пространстве.

На рис. 2 изображен внешний вид станка с ЧПУ модели DMG MORI SEIKI NMV 5000 DCG, на котором изготавливались детали шахтного копра с помощью программного обеспечения, описанного выше.



Рис. 2 – Внешний вид станка с ЧПУ модели DMG MORI SEIKI NMV 5000 DCG:

1 – магазин инструментов; 2 – инструмент (фреза) в шпинделе станка;
3 – стол с рабочим пространством; 4 – панель управления

Технические характеристики станка включают следующие данные: суппорт станка имеет возможность перемещаться в 3-х плоскостях, а стол с заготовкой – в 2-х плоскостях, что обеспечивает 5-ти координатную обработку. Магазин инструментов (в стандартном варианте) вмещает до 31 позиции; частота вращения шпинделя – 12 тыс. об/мин; мощность главного электродвигателя – 18 кВт; максимальный размер заготовки – 450 мм.

В качестве инструментов для обработки заготовок использовались концевые фрезы, метчики и сверла следующих разновидностей: фреза GM-4EL-D6.0 с покрытием TiAlN; концевая 3-заходная твердосплавная фреза AL-3E-D3.0 с покрытием DLC; концевая фреза 3ALE-050-130-S06; концевая 2-заходная сферическая твердосплавная фреза R1x75x4Dx2F с покрытием AlTiN; концевая фреза P290 EPW D20-2-100-W20-12 с твердосплавными пластинами P290 АСКТ 1204PDR-FW; метчик 2620-3787 2, (d=1,8 мм, l=41,0 мм), ГОСТ 3266; метчик 2620-1043 2,5, (d=2,5 мм, l=44,5 мм), ГОСТ 3266; спиральное сверло 2300-0811, (d=1,6 мм, l=43 мм), ГОСТ 19543; спиральное сверло 2300-0818, (d=2,1 мм, l=49 мм), ГОСТ 19543; спиральное сверло 2300-0934, (d=3 мм, l=61 мм), ГОСТ 19543.

Обработка заготовок велась с использованием смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) марки «Blasocut 4000 CF» швейцарского производителя «Blaser Swisslube AG».

На рис. 3 изображена конструкция изготовленной модели шахтного копра, а на рис. 4 представлена ее принципиальная электрическая схема.

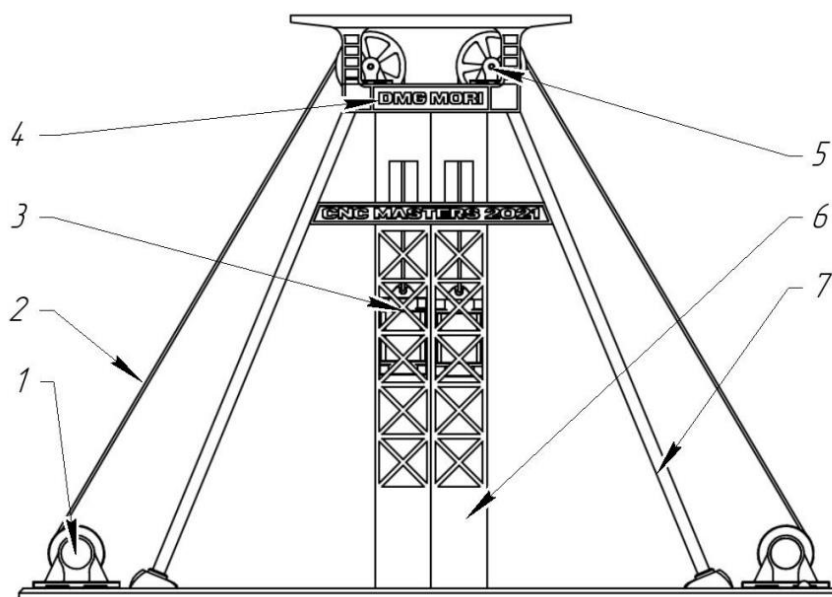


Рис. 3 – Конструкция шахтного копра:

1 – электродвигатель привода лебедки; 2 – трос для перемещения шахтных клеток; 3 – шахтные клетки; 4 – площадка для установки шкивов; 5 – шкивы для привода шахтных клеток; 6 – шахтный ствол; 7 – наклонные опоры копра

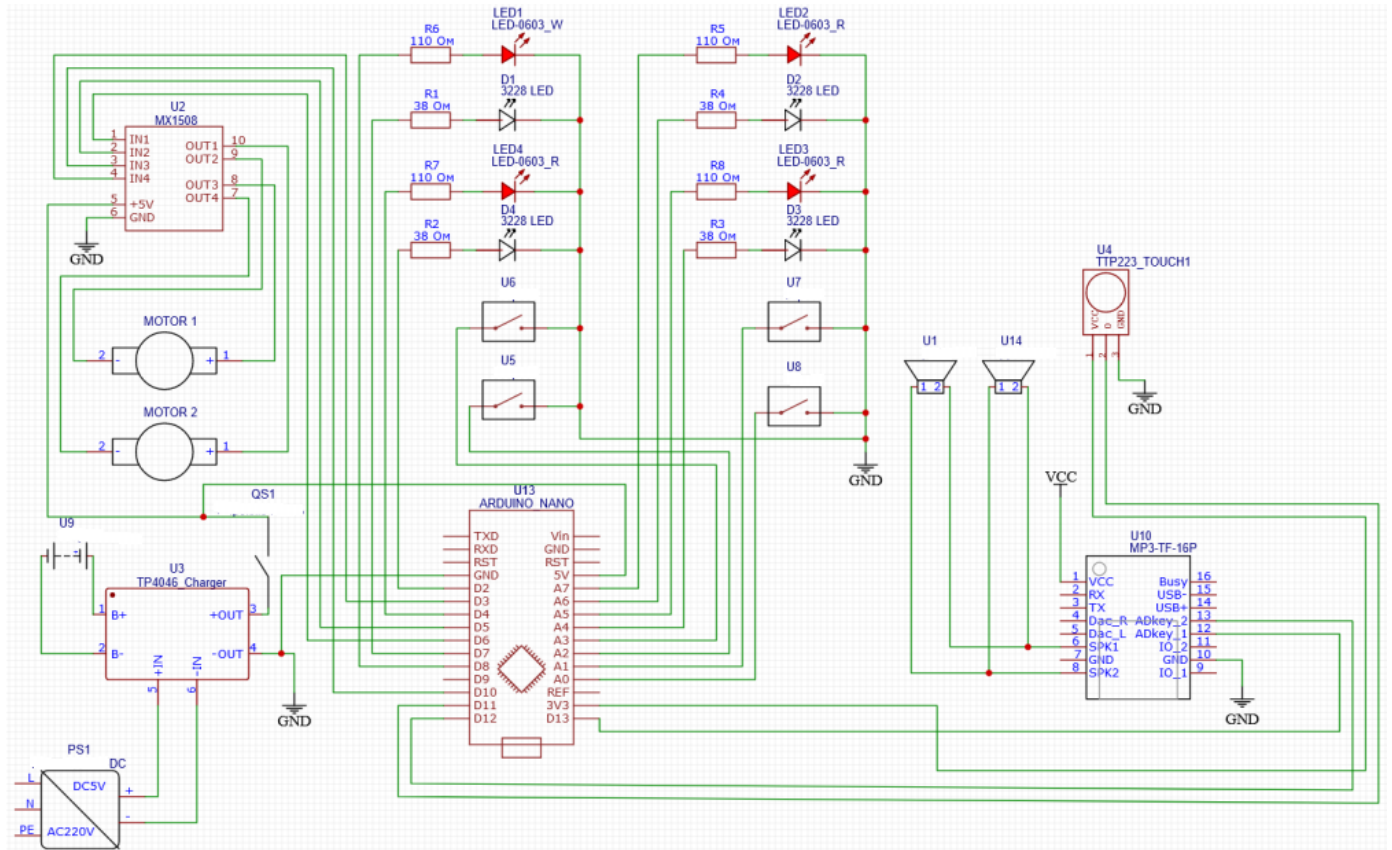


Рис. 4 – Принципиальная электрическая схема модели шахтного копра

Автоматизированный цикл движений модели шахтного копра включает в себя: поочередный подъем и опускание двух шахтных клетей; включение и выключение фонарей в касках фигурок шахтеров; включение четырех красных сигнальных ламп на вершине шахтного копра, как на высотном объекте; включение осветительных ламп в верхней части шахтного копра на период его работы; включение и автоматическое выключение звуковых эффектов в виде проигрывания гимна университета (КузГТУ) на период осуществления движений модели шахтного копра.

В медицинской практике известны следующие разновидности роботизированных устройств, выполняющих роль протезов органов человека: пневматические эластичные элементы (искусственные мышцы) [8]; искусственный мышечный бионический сустав с использованием двух групп пневматических мышц [9]; искусственный мышечный сустав «гепард» [10]; шахматный пневматический искусственный мышечный привод [11]; четырехстержневой шарнирный механизм с двумя пневматическими искусственными мышцами [12], [13]; сферический пневматический гибкий шарнир с переменной жесткостью [14]; компактный бионический манипулятор [15]; складной надувной пневматический мягкий привод [16].

Пневматическая искусственная мышца McKibben состоит из нейлоновой сети управления, эластичной резиновой трубы и двух соединительных патрубков. Когда внутреннее давление воздуха в эластичной резиновой трубе увеличивается, она деформируется и воздействует на нейлоновую сеть. В результате создается радиальное смещение с усилием F и искусственная мышца совершает движение.

Внешний вид такой мышцы показан на рис. 5.



Рис. 5 – Внешний вид пневматической искусственной мышцы «McKibben»

Заключение

При проектировании и последующем производстве сложных изделий и устройств целесообразно осуществлять моделирование их работы с целью прогнозирования поведения в различных ситуациях. Моделирование может оказаться полезным также при реализации демонстрационных задач и в медицинских целях для воспроизведения функционирования тех или иных органов. Такой подход позволяет проводить анализ эффективности использования моделируемых объектов и обеспечивать их визуализацию. Кроме того, становится возможным оптимизировать затраты на изготовление реальных объектов еще на этапе технологической подготовки производства.

Согласно данной концепции спроектирована и изготовлена модель шахтного копра, демонстрирующая функционирование наземной части реальной шахты. Модель символизирует добычу основного вида продукции Кузбасса – каменного угля, в год 300-летия данного региона. Она полностью изготовлена на станке с ЧПУ с использованием программного обеспечения «FUSION 360», «INVENTOR», «КОМПАС-3D», «PowerMILL». Модель участвовала во Всероссийском конкурсе по станкам с ЧПУ (2021 г.) и, по совокупности показателей, заняла второе место среди всех регионов – участников конкурса в России.

Роботизированные модели человеческих органов стали, с недавнего времени, успешно применять в медицинской практике. К таким моделям относятся, в том числе, искусственные мышцы «McKibben» и проектируемые на их основе вращающиеся суставы. Анализ состояния дел в этой сфере говорит о новизне проблематики, ее малой изученности, перспективности и необходимости проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Общим в представленных моделях шахтного копра и искусственной мышцы «McKibben» является процесс создания роботизированных устройств, моделирующих реальные объекты и имеющих ряд одинаковых технических подходов и решений.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Сыркин П.С. Шахтное и подземное строительство. Технология строительства горизонтальных и наклонных выработок / П.С. Сыркин, И.А. Мартыненко, М.С. Данилкин. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2002. – 430 с.
2. Винарский Е.Н. Копры для проходки шахтных стволов / Е.Н. Винарский, А.В.Линков – Москва : ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1962. – 182 с.
3. Ловыгин А.А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система / А.А. Ловыгин, А.В. Васильев. – Эльф ИПР, 2006 г. – 288 с.
4. Клайн Л.С. Fusion 360. 3D-моделирование для мейкеров / Л.С. Клайн. – БХВ, 2021. – 288 с.
5. Гузненков В.Н. Трехмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей / В.Н. Гузненков, Е.В. Винцулина. – ДМК Пресс, 2017. – 127 с.
6. Сурина Е.С. Разработка управляющих программ для системы ЧПУ / Е.С. Сурина. – Лань, 2019. – 268 с.
7. Герасимов А.А. Самоучитель КОМПАС-3D V19 / А.А. Герасимов. – БХВ, 2021. – 624 с.
8. Li M. Review on Key Technologies of bionic flexible joint / M. Li, Y. Ma, M. Zhang // Mechanical design. – 2018. – № 35(11). – Pp. 1–9.
9. Wang B. Modeling and fuzzy control of cascade pneumatic muscle humanoid elbow joint / B. Wang, B. Zhang, G. Shen et al // Robot. – 2017. – № 39(04). – Pp. 474–480.
10. Xin W. Development of an antagonistic bionic joint controller for a musculoskeletal quadruped / W. Xin, L. Mantian, G. Wei et al. // 2013 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, 2013. – Pp. 4466–4471.
11. Lee Hyuk Jin A bundled staggering patterned pneumatic muscle actuator for improved working efficiency / H.J. Lee, K.H. Lee, Y.M. Lee et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2019. – № 33(10). – Pp. 1–9.
12. Ho Pham Huy Anh Adaptive evolutionary neural control of perturbed nonlinear serial PAM robot / Ho Pham Huy Anh, Nguyen Ngoc Son, Nguyen Thanh Nam // Neurocomputing. – 2017. – № 267. – Pp. 525–544.
13. Nguyen Ngoc Son A novel adaptive feed- forward-PID controller of a SCARA parallel robot using pneumatic artificial muscle actuator based on neural network and modified differential evolution algorithm / Nguyen Ngoc Son, Cao Van Kien, Ho Pham Huy Anh. // Robotics and Autonomous Systems. – 2017. – № 96. – 1–30.
14. Boehler Q Design and evaluation of a novel variable stiffness spherical joint with application to MR-compatible robot design / Quentin B., Marc V., Salih A. et al. // 2016IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden 2016. – Pp. 661–667.
15. Inderjeet S. Performance's evaluation of inverse kinematic: Models of a compact bionic handling assistant / I. Singh, O. Lakhal, Y. Amara et al. // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Macau SAR. China 2017. – Pp. 264–269.
16. Nishioka Y. Development of a pneumatic soft actuator with pleated inflatable structures / Y. Nishioka, M. Uesu, H. Tsuboi et al. // Advanced Robotics. – 2017. – № 31(14). – Pp. 753–762.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Syrkin P.S. Shahtnoe i podzemnoe stroitel'stvo. Tehnologija stroitel'stva gorizont'al'nyh i naklonnyh vyrabotok [Mine and underground construction. Technology of construction of horizontal and inclined workings] / P.S. Syrkin, I.A. Martynenko, M.S. Danilkin. – Novoчеркасск : JuRGTU, 2002. – 430 p. [in Russian]
2. Vinarskij E.N. Kopy dlja prohodki shahtnyh stvolov [Copro for sinking mine shafts] / E.N. Vinarskij, A.V.Linkov – Moscow : GOSGORTEHIZDAT, 1962. – 182 p. [in Russian]
3. A.A. Lovygin Sovremennyj stanok s ChPU i CAD/CAM Sistema [Modern CNC machine and CAD/CAM system] / A.A. Lovygin, A.V. Vasil'ev. – Jel'f IPR, 2006. – 288 p. [in Russian]

4. Klajn L.S. Fusion 360. 3D-modelirovanie dlja mejkerov [Fusion 360. 3D modeling for makers] / L.S. Klajn. – BHV, 2021. – 288 p. [in Russian]
5. Guznenkov V.N. Trehmernoe modelirovanie detalej i vypolnenie jelektronnyh chertezhej [Three-dimensional modeling of parts and execution of electronic drawings] / V.N. Guznenkov, E.V. Vinculina. – DMK Press, 2017. – 127 p. [in Russian]
6. Surina E.S. Razrabotka upravljajushhih programm dlja sistemy ChPU [Development of control programs for the CNC system] / E.S. Surina. – Lan', 2019. – 268 p. [in Russian]
7. Gerasimov A.A. Samouchitel' KOMPAS-3D V19 [Tutorial COMPASS-3D V19] / A.A. Gerasimov. – BHV, 2021. – 624 p.
8. Li M. Review on Key Technologies of bionic flexible joint / M. Li, Y. Ma, M. Zhang // Mechanical design. – 2018. – № 35(11). – Pp. 1–9.
9. Wang B. Modeling and fuzzy control of cascade pneumatic muscle humanoid elbow joint / B. Wang, B. Zhang, G. Shen et al // Robot. – 2017. – № 39(04). – Pp. 474–480.
10. Xin W. Development of an antagonistic bionic joint controller for a musculoskeletal quadruped / W. Xin, L. Mantian, G. Wei et al. // 2013 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, 2013. – Pp. 4466–4471.
11. Lee Hyuk Jin A bundled staggering patterned pneumatic muscle actuator for improved working efficiency / H.J. Lee, K.H. Lee, Y.M. Lee et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2019. – № 33(10). – Pp. 1–9.
12. Ho Pham Huy Anh Adaptive evolutionary neural control of perturbed nonlinear serial PAM robot / Ho Pham Huy Anh, Nguyen Ngoc Son, Nguyen Thanh Nam // Neurocomputing. – 2017. – № 267. – Pp. 525–544.
13. Nguyen Ngoc Son A novel adaptive feed- forward-PID controller of a SCARA parallel robot using pneumatic artificial muscle actuator based on neural network and modified differential evolution algorithm / Nguyen Ngoc Son, Cao Van Kien, Ho Pham Huy Anh. // Robotics and Autonomous Systems. – 2017. – № 96. – 1–30.
14. Boehler Q Design and evaluation of a novel variable stiffness spherical joint with application to MR-compatible robot design / Quentin B., Marc V., Salih A. et al. // 2016IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden 2016. – Pp. 661–667.
15. S. Inderjeet Performance's evaluation of inverse kinematic: Models of a compact bionic handling assistant / I. Singh, O. Lakhal, Y. Amara et al. // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Macau SAR. China 2017. – Pp. 264–269.
16. Nishioka Y. Development of a pneumatic soft actuator with pleated inflatable structures / Y. Nishioka, M. Uesu, H. Tsuboi et al. // Advanced Robotics. – 2017. – № 31(14). – Pp. 753–762.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.011>

АГРЕГИРОВАНИЕ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Научная статья

Левкина И.А.^{1,*}, Леденева Т.М.²¹ ORCID: 0000-0003-4041-1907;² ORCID: 0000-0002-3944-2266;^{1,2} Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

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

Аннотация

В данной статье предложены подходы к агрегированию приближенной информации в рамках многоатрибутного (или многокритериального) оценивания. Исходная информация задается в виде векторной оценки объекта, каждая компонента которой является интервальным числом. В первой части статьи представлен краткий обзор существующих операций агрегирования из класса средних и выделено семейство порядковых взвешенных операторов агрегирования – *Ordered Weighted Averaging Aggregation Operator* – OWA, ассоциированных с вектором весов, которые определяются на основе лингвистических кванторов, в частности, на основе квантора «нечеткого большинства». Показано, что известные средние являются частными случаями OWA. Преимуществом данного семейства является наличие числовых характеристик, позволяющих оценить стратегию агрегирования, наличие компенсационных свойств, отношение к риску, что важно для проектирования процедуры агрегирования. На основе OWA предложено несколько подходов к «свертке» интервальных чисел в результирующий интервал, который интерпретируется как *интервальная обобщенная оценка* объекта.

Ключевые слова: интервальное число, агрегирование, класс средних, OWA-оператор.

INTERVAL INFORMATION AGGREGATION

Research article

Levkina I.A.^{1,*}, Ledeneva T.M.²¹ ORCID: 0000-0003-4041-1907;² ORCID: 0000-0002-3944-2266;^{1,2} Voronezh State University, Voronezh, Russia

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

Abstract

The article presents approaches to aggregation of approximate information within the framework of multi-attribute (or multi-criteria) evaluation. The baseline information is given as a vector evaluation of the object, each component of which is an interval number. The first part of the article presents a brief overview of existing aggregation operations from the middle class and highlights the assemblage of sequential weighted aggregation operators – *Ordered Weighted Averaging Aggregation Operator* – OWA, associated with the weight vector, which are defined on the basis of linguistic quantifiers, in particular, on the basis of the quantifier of «fuzzy majority». It is shown that the known averages are particular cases of OWA. The advantage of this assemblage is the presence of numerical characteristics to assess the aggregation strategy, the compensating properties, the attitude to risk, which is important for the design of the aggregation procedure. On the basis of OWA, several approaches to «turn» of interval numbers into resulting interval are proposed, which is interpreted as an *interval generalized estimator* of the object.

Keywords: interval number, aggregation, middle class, OWA-operator.

Введение

В структуру большинства систем поддержки принятия решений входит подсистема оценки, которая базируется на понятии многоатрибутной (или многокритериальной) модели, и имеет своей целью сформировать *обобщенную* (интегральную, комплексную) оценку вариантов решений (объектов, систем, проектов и т.д.), учитывая множество показателей (атрибутов, критериев, признаков, характеристик и т.п.), каждый из которых имеет собственную шкалу. В подавляющем большинстве случаев предполагается, что шкалы являются числовыми. Оценку варианта решения в шкале некоторого показателя будем называть *частной*. Если для оценки используется несколько показателей, то множество частных оценок образует *векторную оценку*. Для формирования обобщенной оценки применяются различные функции агрегирования, обеспечивающие «свертку» частных оценок в скалярную обобщенную оценку, которая характеризует вариант решения в целом. На основе обобщенных оценок решаются задачи выбора, ранжирования вариантов по предпочтительности, разбиения на группы однородных в некотором смысле (кластеризация) и отнесения к известному классу (классификация). В [1] введено понятие оценочной модели, и сформированы этапы построения многоатрибутной оценки сложного объекта. Введем ряд предположений, важных для организации процедуры агрегирования.

1. Будем считать, что показатели характеризуют объект с различных точек зрения, поэтому важно, чтобы они были независимыми и обеспечивали полноту описания. При формировании множества критериев важно использовать такие, относительно которых имеется цель, заключающаяся в их оптимизации.

2. В большинстве ситуаций предполагается, что информация для формирования обобщенной оценки является количественной (как правило, для этого используется промежуток $[0,1]$ – безразмерная шкала), но при использовании приближенной информации (например, для оценивания привлекаются эксперты, так как нет возможности получить точную количественную информацию) должны использоваться соответствующие модели ее представления, к которым

относятся нечеткие, интервальные и лингвистические переменные. Современный подход к обработке информации предполагает не переход от, например, вербальных, качественных значений оценок к количественным, а разработку и использование методов, которые работают именно с данным типом информации информацией. В [2] введены понятия различных типов переменных, и приводятся подходы к решению задач (кластеризация, восстановление зависимостей и др.), основанных на этих переменных.

3. Актуальной проблемой является обобщение классических методов на случай нечисловой информации, а также разнородной информации, когда можно выделить группы показателей с закрепленными за ними шкалами, и тогда при формировании обобщенной оценки в единую обобщенную оценку нужно свести и числовую, и интервальную, и лингвистическую и какого-либо другого типа информацию.

4. «Свертка» частных оценок в обобщенную оценку осуществляется с использованием функций и операций агрегирования [3], [4], [5]. В настоящее время сформировался достаточно обширный арсенал данных инструментов. Значительный класс составляют средние, их свойства достаточно хорошо изучены, известны рекомендации по их использованию для различных задач [1], [6]. Также развиваются подходы для построения гибридных операций на основе некоторых базовых форм средних. Существенные результаты имеются в теории ассоциативных средних, основанных на их представлении с помощью аддитивных генераторов, что позволяет перейти к аддитивной форме операции осреднения [3]. Большой интерес для приложений представляют операции порядкового взвешенного агрегирования OWA из-за наличия ряда важных характеристик, позволяющих спроектировать процедуру агрегирования с заданной стратегией агрегирования и рядом желательных свойств [7].

Заметим, что подавляющее большинство существующих операций агрегирования предназначены для работы с числовой информацией из $[0,1]$. Цель статьи заключается в развитии подходов к агрегированию интервальной информации на основе порядковых операторов взвешенного агрегирования.

Постановка задачи и обзор основных классов функций агрегирования для построения обобщенной оценки

Пусть задано множество объектов $U = \{u\}$, для оценки свойств которых используется множество показателей $P = \{P_i\}$, где $i = \overline{1, n}$. Предположим, что оценки по показателю P_i формируются в шкале S_i , так что $P_i(u) = x_i$ – это оценка объекта u по показателю P_i . Учитывая все показатели, каждому объекту $u \in U$ можно поставить в соответствие векторную оценку $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \in S_1 \times \dots \times S_n$. Компоненты x_i векторной оценки \mathbf{x} есть *частные оценки* объекта u . С помощью выбранной функции агрегирования Agg векторной оценке \mathbf{x} ставится в соответствие обобщенная оценка $Agg(\mathbf{x})$, которая характеризует объект u по всей совокупности показателей в целом и позволяет решать различные типы задач принятия решений.

Под n -местной операцией агрегирования понимается отображение $Agg: [0,1]^n \rightarrow [0,1]$, которое обладает следующими свойствами [3]:

$$1) Agg(0, \dots, 0) = 0, Agg(1, \dots, 1) = 1;$$

2) если для любых индексов $i = \overline{1, n}$ $x_i \leq y_i$, то $Agg(\mathbf{x}) \leq Agg(\mathbf{y})$, где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ и $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ – пара векторных оценок (монотонность).

Заметим, что к операции агрегирования в общем случае предъявляются только эти свойства, но их список может быть расширен за счет включения таких алгебраических свойств, как симметричность (коммутативность), ассоциативность, наличие нейтрального элемента, идемпотентность и других [5]. Комбинация свойств порождает различные семейства операций агрегирования. Наиболее известным является семейство средних, и его характеристическое свойство имеет следующий вид [4]: $\min\{x_1, \dots, x_n\} \leq Agg(\mathbf{x}) \leq \max\{x_1, \dots, x_n\}$, при этом считается, что \min реализует конъюнктивную стратегию, согласно которой акцент делается на худшую частную оценку, \max реализует дизъюнктивную стратегию, которая учитывает лучшую из частных оценок. В общем случае любая функция из семейства средних соответствует компромиссной стратегии.

Наиболее известными аналитическими средними являются [6]: средняя арифметическая $A(\mathbf{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ и средняя

$$\text{геометрическая } G(\mathbf{x}) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i}.$$

Важным аспектом агрегирования является учет важности показателей. Для этого каждому показателю ставится в соответствие весовой коэффициент $w_i \in [0,1]$, причем выполняется условие нормировки $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. К взвешенным

формам средних относятся [6]: взвешенная средняя $S(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sum_{i=1}^n w_i x_i$, взвешенная средняя геометрическая

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \prod_{i=1}^n x_i^{w_i}, \text{ взвешенная средняя гармоническая } H(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{x_i} \right)^{-1}, \text{ взвешенная ассоциативная средняя вида}$$

$S(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = h^{-1} \left(\sum_{i=1}^n w_i h(x_i) \right)$, где $h: [0,1] \rightarrow [0, \infty)$ – непрерывная возрастающая функция, называемая аддитивным генератором.

Специальный класс средних составляют порядковые взвешенные операторы агрегирования OWA [7].

n -Мерный OWA-оператор, ассоциированный с вектором весов $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_n)$, удовлетворяющих условиям $\forall i = \overline{1, n} (w_i \in [0,1])$ и $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, есть отображение $F_{\mathbf{w}}: [0,1]^n \rightarrow [0,1]$, такое что $F_{\mathbf{w}}(\mathbf{x}) = F(\mathbf{w}, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i x_{\sigma(i)}$, где $\sigma: \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$ – перестановка, такая что $x_{\sigma(i)} \geq x_{\sigma(i+1)}$. Пусть $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ есть вектор \mathbf{x} , упорядоченный по невозрастанию ($\mathbf{y} = \mathbf{x} \downarrow$), тогда иначе $F_{\mathbf{w}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i y_i$.

Для $F_{\mathbf{w}}$ можно определить двойственный OWA-оператор $\hat{F}_{\mathbf{v}}$ с вектором весов $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n)$, где $v_i = w_{n-i+1}$. Если упорядочивать по неубыванию вектор оценок \mathbf{x} , то получим определение обратного оператора $F_{\mathbf{w}}^{-1}$ для исходного $F_{\mathbf{w}}$.

К основным алгебраическим свойствам OWA-оператора относятся коммутативность, идемпотентность, монотонность, однако данный оператор не является ассоциативным. OWA-операторы имеют ряд числовых характеристик, которые позволяют целенаправленно организовать процедуры агрегирования, ориентируясь на дизъюнктивное (*orness*) или конъюнктивное (*andness*) агрегирование, равномерность учета частных оценок (*ndisp*), склонность оптимистической или пессимистической позиции (*tradeoff*) [5], [7], [8].

Заметим, что OWA-оператор имеет две существенные особенности. Во-первых, обобщенная оценка, вычисленная на основе OWA-оператора, есть результат скалярного произведения вектора весов \mathbf{w} на вектор, полученный из упорядочения элементов по невозрастанию. Во-вторых, в отличие от взвешенных форм средних весовые коэффициенты в данном случае не связаны с важностью отдельных показателей и определяются на основе специальной процедуры [9]. Важно, что в результате ее использования вектор весов оказывается упорядоченным определенным образом (по невозрастанию или по неубыванию). Учитывая, что векторная оценка также упорядоченная, получаем, что обобщенная оценка, по сути, соответствует максимальному или минимальному значению скалярного произведения векторов \mathbf{w} и \mathbf{x} – в этом особенность OWA и принципиальное отличие от аддитивной взвешенной свертки.

Для нахождения весов при использовании технологии порядкового взвешенного агрегирования применяются специальные подходы: на основе лингвистических кванторов, формализующих принцип «нечеткого большинства» [9]; на основе решения оптимизационных задач для нахождения вектора весов, максимизирующих энтропию [10], [11], минимизирующих вариабельность весов [12]; на основе стандартных параметрических функций путем такой настройки параметра, которая соответствует определенной стратегии агрегирования, заданному уровню компенсационных свойств или желаемым значениям числовых характеристик OWA-операторов [13].

В [14] представлен обзор операций агрегирования, относящихся к классу OWA, а также подходы к моделированию процедур агрегирования, учитывающих свойства этих операций.

Широко распространенным подходом для определения весов OWA является использование понятия лингвистического квантора, формализация которого осуществляется на основе непрерывной и неубывающей функции квантификации $Q: [0,1] \rightarrow [0,1]$ [9]. В отличие от классической логики с двумя кванторами \forall и \exists , в нечеткой логике можно рассматривать различные кванторы, такие как *большинство*, *много*, *мало*, *по крайней мере*, *половина* и подобные, которые помимо основных свойств должны удовлетворять дополнительным ограничениям. Так, к функции квантификации для понятия «нечеткого большинства» предъявляются следующие требования: $Q(0) = 0$, $Q(1) = 1$. Использование лингвистических кванторов позволяет учитывать в обобщенной оценке то количество частных оценок (причем лучших или худших), которое соответствует выбранному квантору. Если задана функция квантификации Q , то весовые коэффициенты определяются по правилу

$$w_1 = Q\left(\frac{1}{n}\right), w_i = Q\left(\frac{i}{n}\right) - Q\left(\frac{i-1}{n}\right) \quad (i = \overline{2, n}).$$

Пусть, например, используется функция квантификации вида

$$Q_{\alpha}(x) = x^{\alpha} \quad (\alpha > 0),$$

тогда, например, при $\alpha = 2$ на основе приведенных выше формул получим весовые коэффициенты вида

$$w_i = \frac{2i-1}{n^2}, i = \overline{1, n}$$

Можно показать, что для вектора весов, вычисленного на основе Q_α , имеем $orness(Q_\alpha) = \frac{1}{1+\alpha}$, $andness(Q_\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha+1}$, при этом $orness$ характеризует уровень проявления дизъюнктивной стратегии, а $andness$ – конъюнктивной. Варьируя параметр α , можно получить операцию осреднения дизъюнктивного или конъюнктивного типа, с желаемым уровнем проявления компенсационных свойств, поскольку считается, что дизъюнкция (\max) соответствует случаю полной компенсации (малые значения частных оценок по одним показателям компенсируются большими значениями по другим показателям), а \min – ее отсутствию.

Для $\alpha = 2$, например, получим $orness(Q_2) = \frac{1}{3} \approx 0.3$, тогда $andness(Q_2) = 0.67$, и, следовательно, соответствующая операция агрегирования является квазиконъюнкцией.

Имеет место следующее утверждение [7]: пусть $Q_1, Q_2 : [0,1] \rightarrow [0,1]$ – функции квантификации, такие что для любого $x \in [0,1]$ выполняется неравенство $Q_1(x) \leq Q_2(x)$, тогда $orness(Q_1) \leq orness(Q_2)$.

Заметим, что при $\alpha_1 < \alpha_2$ для любого $x \in [0,1]$ выполняется неравенство $Q_{\alpha_2}(x) < Q_{\alpha_1}(x)$, причем $orness(Q_{\alpha_2}) < orness(Q_{\alpha_1})$, то есть при увеличении параметра α уровень проявления дизъюнктивных свойств уменьшается.

Таким образом, в настоящее время существует значительный арсенал операций агрегирования для числовой информации, используя которые можно учесть многие требования к процедуре агрегирования и спроектировать ее с учетом ориентации на конкретного пользователя. Для приближенной информации проблема агрегирования является в большей степени не решенной. Наличие целого ряда числовых характеристик OWA-операторов и методов нахождения весов, ориентированных на особенности процедуры агрегирования, делает актуальной проблему адаптации OWA-операторов и других известных функций из семейства средних для агрегирования приближенной информации в форме интервальных чисел.

Интервальные числа и их основные характеристики

Пусть $\underline{x}, \bar{x} \in \mathbb{R}$ такие, что $\underline{x} \leq \bar{x}$, тогда *интервальное число* (интервал) X есть промежуток вида $X = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \in \mathbb{R} \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\}$, при этом \underline{x} и \bar{x} называются соответственно верхней и нижней границей интервала $[\underline{x}, \bar{x}]$ [15].

Заметим, что интервальное число является обобщением обычного числа, если $\underline{x} = \bar{x} = x$. Важнейшими характеристиками интервального числа являются следующие: *центр* (середина) $mid([\underline{x}, \bar{x}]) = \frac{1}{2}(\bar{x} + \underline{x})$; *радиус*

$$r([\underline{x}, \bar{x}]) = \frac{1}{2}(\bar{x} - \underline{x}); \text{ ширина } w([\underline{x}, \bar{x}]) = \bar{x} - \underline{x}.$$

На множестве \mathbb{R} введем множество интервальных чисел $[\mathbb{R}] = \{[\underline{x}, \bar{x}] : (\underline{x} < \bar{x})\}$ и определим отношение включения $[\underline{x}, \bar{x}] \subset [\underline{y}, \bar{y}] \Leftrightarrow \begin{cases} \underline{y} < \bar{x}, \\ \bar{x} < \bar{y} \end{cases}$ и отношение порядка $[\underline{x}, \bar{x}] < [\underline{y}, \bar{y}] \Leftrightarrow \bar{x} < \underline{y}$.

Основные арифметические операции для интервальных чисел задаются следующим образом [16]:

$$\text{сложение: } [x] + [y] = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}];$$

$$\text{вычитание: } [x] - [y] = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}];$$

$$\text{умножение: } [x] \times [y] = [\min\{\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}\}, \max\{\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}\}];$$

$$\text{деление: } \frac{[x]}{[y]} = a \times \left[\frac{1}{\bar{b}}, \frac{1}{\underline{b}} \right], \text{ для } [b] \neq 0.$$

Нейтральным элементом относительно сложения и вычитания является 0 ($[x] + 0 = [x] - 0 = [x]$), а относительно умножения и деления – 1 ($[x] \times 1 = [x] / 1 = [x]$). Заметим, что операции сложения и умножения ассоциативны и коммутативны, однако не выполняется дистрибутивный закон относительно сложения.

Пусть $X = [\underline{x}, \bar{x}]$ и $\alpha > 0$, тогда $\alpha X = [\alpha \cdot \underline{x}, \alpha \cdot \bar{x}]$ также интервальное число. Используя операции сложения и умножения на число, определим линейную комбинацию интервальных чисел X_1, \dots, X_n в виде

$$\alpha_1 \cdot X_1 + \dots + \alpha_n \cdot X_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot [x_i, \bar{x}_i] = \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i, \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{x}_i \right],$$

где $\alpha_i \in [0,1]$ для любого i и $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$.

Операции агрегирования для интервальных чисел

Пусть имеется векторная оценка $\mathbf{x} = (X_1, \dots, X_n)$, каждая компонента которой представляет собой интервальное число $X_i = [x_i, \bar{x}_i]$, $i = \overline{1, n}$.

На основе обобщения известных классов введем следующие операции агрегирования для интервальных чисел:

1) минимум $\text{MIN}(\mathbf{x}) = \min_i \{X_i\} = \left[\max_i \{x_i\}, \min_i \{\bar{x}_i\} \right];$

2) максимум $\text{MAX}(\mathbf{x}) = \max_i \{X_i\} = \left[\min_i \{x_i\}, \max_i \{\bar{x}_i\} \right];$

3) среднее арифметическое $A(\mathbf{x}) = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n X_i \right\} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \right];$

4) OWA-оператор $F_w(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i Y_i$, где $\mathbf{y} = (Y_1, \dots, Y_n)$ – вектор, полученный из \mathbf{x} путем упорядочивания

интервальных чисел по не возрастанию, что возможно, так как на множестве интервальных чисел определен частичный порядок; $w_j \in [0,1]$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

В некоторых приложениях при агрегировании интервальной информации используются центры интервалов, которые можно определить следующим образом [15]:

$$\underline{\text{mid}}(x) = \min_i \{ \text{mid}(X_i) \} = \min_i \left\{ \frac{1}{2} (\bar{x}_i + x_i) \right\}, \quad \overline{\text{mid}}(x) = \max_i \{ \text{mid}(X_i) \} = \max_i \left\{ \frac{1}{2} (\bar{x}_i + x_i) \right\}.$$

Для определения минимального и максимального интервалов предложены следующие формулы:

$$\text{MIN}_{\text{mid}}(x) = \left[\max \{ X_i : X_i < \underline{\text{mid}}(x) \}, \underline{\text{mid}}(x), \min \{ X_i : X_i > \overline{\text{mid}}(x) \} \right]$$

$$\text{MAX}_{\text{mid}}(x) = \left[\min \{ p_{ij} : p_{ij} < \overline{\text{mid}}(x) \}, \overline{\text{mid}}(x), \max \{ p_{ij} : p_{ij} > \underline{\text{mid}}(x) \} \right].$$

Таким образом, $\text{MIN}_{\text{mid}}(x)$ – самый «узкий» интервал с самым левым центром, $\text{MAX}_{\text{mid}}(x)$ – самый «широкий» интервал с самым правым центром, причем интервальные числа в этом случае необязательно упорядочены включением.

Для агрегирования интервальной информации можно применить порядковый оператор OWA для левых и правых границ заданных интервальных чисел. Идея, которая лежит в основе данного подхода, заключается в том, что, используя лингвистические кванторы, можно учитывать их приближенное количество.

Введем некоторые дополнительные понятия. Пусть $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)$ – вектор с числовыми компонентами. Упорядочивая компоненты по невозрастанию, получим вектор $\mathbf{a} \downarrow$ с компонентами $a_{i_1} \geq a_{i_2} \geq \dots \geq a_{i_n}$, который назовем *убывающим*. Если компоненты упорядочить по неубыванию, т.е. $a_{j_1} \leq a_{j_2} \leq \dots \leq a_{j_n}$, то полученный вектор $\mathbf{a} \uparrow$ назовем *возрастающим*. В данных определениях предполагается, что хотя бы одно неравенство строгое.

Пусть $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)$ и $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_n)$ – два вектора одинаковой размерности n ; $(\mathbf{a}, \mathbf{b}') = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i$ – их скалярное

произведение. В дальнейшем будем обозначать его в виде (\mathbf{a}, \mathbf{b}) , предполагая, что \mathbf{a} – вектор-строка, а \mathbf{b} – вектор-столбец. Заметим, что скалярное произведение принимает свое максимальное значение, если векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} являются однонаправленными, т.е. оба возрастающие, или оба убывающие. Если векторы разнонаправленные, т.е. один возрастающий, а второй – убывающий, то их скалярное произведение принимает минимальное значение, при этом $(\mathbf{a} \uparrow, \mathbf{b} \downarrow) = (\mathbf{a} \downarrow, \mathbf{b} \uparrow)$, $(\mathbf{a} \uparrow, \mathbf{b} \uparrow) = (\mathbf{a} \downarrow, \mathbf{b} \downarrow)$.

Рассмотрим вектор $\mathbf{x} = (X_1, \dots, X_n)$ с компонентами в форме интервальных чисел $X_i = [x_i, \bar{x}_i]$ ($i = \overline{1, n}$). Пусть $\underline{\mathbf{w}}, \overline{\mathbf{w}}$ – векторы весовых коэффициентов (будем использовать соответственно для левых и правых границ),

удовлетворяющие следующим условиям: $\underline{w}_i, \bar{w}_i \in [0,1]$, $\sum_{i=1}^n \underline{w}_i = 1$, $\sum_{i=1}^n \bar{w}_i = 1$; $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)$, $\bar{x} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$ – векторы, составленные из левых и правых границ интервальных чисел.

Введем модифицированный OWA-оператор для интервальных чисел – IntOWA, который векторной оценке $\mathbf{x} = (X_1, \dots, X_n)$ с интервальными компонентами ставит в соответствие интервальное число, для которого левая граница и правая границы определяются на основе OWA-операторов, т.е.

$$F_{(\underline{w}, \bar{w})}(\mathbf{x}) = F_{(\underline{w}, \bar{w})}(X_1, \dots, X_n) = [F_{\underline{w}}(\underline{x}), F_{\bar{w}}(\bar{x})],$$

при этом их применение должно обеспечить основное требование к определению интервального числа: левая граница не превосходит правую границу.

Будем использовать символы \uparrow и \downarrow для векторов $\underline{w}, \bar{w}, \underline{x}, \bar{x}$, чтобы показать тип их упорядочения. Для агрегирования интервальной информации на основе OWA предлагаются следующие подходы.

Пусть задано множество интервальных чисел $X_i = [x_i, \bar{x}_i]$ ($i = \overline{1, n}$) и вектор весов \mathbf{w} , построенный на основе квантора *большинства*, тогда

$$F_{\mathbf{w}}(X_1, \dots, X_n) = [F_{\mathbf{w}}(x_1, \dots, x_n), F_{\mathbf{w}}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)] = [(\underline{x} \downarrow, \mathbf{w}), (\bar{x} \downarrow, \mathbf{w})],$$

и результатом является интервал, у которого левая граница учитывает большинство левых границ исходных интервалов, а правая – большинство правых границ исходных интервалов.

В общем случае для левых и правых границ можно взять различные векторы весов, но нужно следить, чтобы в результирующем интервале левая граница была меньше правой.

$$F_{(\underline{w}, \bar{w})}(\mathbf{x}) = F_{(\underline{w}, \bar{w})}(X_1, \dots, X_n) = \left[\sum_{i=1}^n \underline{w}_i \cdot y_i, \sum_{i=1}^n \bar{w}_i \cdot \bar{y}_i \right],$$

где $[y_i, \bar{y}_i] = Y_i$ – это компоненты вектора $\mathbf{x} = (X_1, \dots, X_n)$, упорядоченные по не возрастанию; \underline{w}, \bar{w} – векторы весовых коэффициентов, удовлетворяющие условиям: $\underline{w}_i, \bar{w}_i \in [0,1]$, $\sum_{i=1}^n \underline{w}_i = 1$, $\sum_{i=1}^n \bar{w}_i = 1$, причем вектор \underline{w} упорядочен по неубыванию, а вектор \bar{w} – по невозрастанию.

Заметим, что на основе векторов весовых коэффициентов $\mathbf{w}_* = \{0, \dots, 0, 1\}$ и $\mathbf{w}^* = \{1, 0, \dots, 0\}$ можно получить классические OWA-операторы следующим образом:

1) если $\underline{w} = \mathbf{w}_* = \{0, \dots, 0, 1\}$ и $\bar{w} = \mathbf{w}^* = \{1, 0, \dots, 0\}$, то

$$\begin{aligned} F_{(\mathbf{w}_*, \mathbf{w}^*)}(\mathbf{x}) &= \left[\underbrace{\sum_{i=1}^n \underline{w}_i \cdot y_i}_{y_n}, \underbrace{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i \cdot \bar{y}_i}_{\bar{y}_1} \right] = \left[\min_i \{x_i\}, \max_i \{\bar{x}_i\} \right] = \\ &= \max_i \{X_i\} = \text{MAX}(\mathbf{x}); \end{aligned}$$

2) если $\underline{w} = \mathbf{w}^* = \{1, 0, \dots, 0\}$ и $\bar{w} = \mathbf{w}_* = \{0, \dots, 0, 1\}$, то

$$F_{(\mathbf{w}^*, \mathbf{w}_*)}(\mathbf{x}) = \left[\underbrace{\sum_{i=1}^n \underline{w}_i \cdot y_i}_{y_1}, \underbrace{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i \cdot \bar{y}_i}_{\bar{y}_n} \right] = \left[\max_i \{x_i\}, \min_i \{\bar{x}_i\} \right] = \min_i \{X_i\} = \text{MIN}(\mathbf{x});$$

3) если $\underline{w} = \bar{w} = \mathbf{w}_\Delta = \left\{ \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n} \right\}$, то

$$F_{(w_{\Delta}, \bar{w}_{\Delta})}(\mathbf{x}) = \left[\sum_{i=1}^n w_i \cdot \underline{y}_i, \sum_{i=1}^n \bar{w}_i \cdot \bar{y}_i \right] = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{y}_i \right] = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \right] = A(\mathbf{x}).$$

В некоторых случаях желательно учитывать центры исходных интервалов, но тогда возникает проблема нахождения левой или правой границы интервала с учетом того, что центр уже найден. Пусть MID – центр искомого интервала, полученный на основе агрегирования центров заданных интервальных чисел; l и r – агрегированные значения левых и правых границ интервалов, тогда результирующий интервал будет иметь вид

$$\left[MID - C(r - MID, MID - l), MID + C(r - MID, MID - l) \right],$$

где C – это \min или \max в зависимости от того, интервал какой ширины предпочтителен. Для реализации данного подхода можно использовать следующую процедуру, в которой весовые коэффициенты определяются на основе функций квантификации, формализующих кванторы нечеткого большинства:

- 1) для каждого интервала $X_i = [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$ определить его центр mid_i ;
- 2) определить центр результирующего интервала $MID = F_{w_m}(mid_1, \dots, mid_n)$, где w_m – вектор весов;
- 3) определить левую границу результирующего интервала, учитывая нечеткое большинство левых границ интервальных чисел, которые не превышают значение MID

$$l = F_{w_l}(\underline{x}'_1, \dots, \underline{x}'_k),$$

где $\underline{x}'_1, \dots, \underline{x}'_k$ – те левые границы исходных интервалов, которые не превышают значения MID ; k – их количество; w_l – вектор весовых коэффициентов для k выбранных левых границ;

- 4) определить правую границу, учитывая нечеткое большинство правых границ по аналогичной формуле

$$r = F_{w_r}(\bar{x}'_1, \dots, \bar{x}'_s),$$

при этом учитываются только те правые границы, которые превосходят значение MID ; s – их количество; w_r – вектор весов для s правых границ.

- 5) исходя из предпочтений выбрать функцию \min или \max и сформировать результирующий интервал.

Заметим, что для реализации данной процедуры потребуется три вектора весов.

Особенностью интервальных чисел является то, что в приложениях иногда целесообразно учитывать не только их положение на числовой прямой, но и ширину. В следующей таблице представлены различные варианты определения скалярного произведения вектора весов и векторов упорядоченных левых и правых границ, при этом будем ориентироваться на базовое определение OWA, когда векторная оценка упорядочена по невозрастанию (подчеркивание для символа w используется, чтобы показать к какой границе относится данный вектор весов; символы \downarrow, \uparrow используются для того, чтобы показать тип упорядочения).

Таблица 1 – Варианты IntOWA

Определение	Интерпретация результата
$F_1(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) = \left[(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \uparrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow) \right]$	Результат – «самое левое» интервальное число
$F_2(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) = \left[(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \downarrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \downarrow) \right]$	Результат – «самое правое» интервальное число
$F_3(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) = \left[(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \uparrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \downarrow) \right]$	Результат – интервал, который включает все заданные интервальные числа
$F_4(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) = \left[\min\{\alpha, \beta\}, \max\{\alpha, \beta\} \right]$, где $\alpha = (\underline{x} \downarrow, \underline{w} \downarrow)$, $\beta = (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow)$.	Результат – интервал, который можно интерпретировать как «самый внутренний»

Имеет место следующее утверждение: если $\beta < \alpha$, то $F_4(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) = \left[(\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow), (\underline{x} \downarrow, \underline{w} \downarrow) \right]$, и для любых векторов \mathbf{x} при $w \uparrow = (0, \dots, 0, 1)$ и $w \downarrow = (1, 0, \dots, 0)$ имеет место равенство

$$F_1(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) \cup F_4(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) \cup F_2(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}) = F_3(\mathbf{x}, \underline{w}, \bar{w}).$$

Поскольку OWA-операции в общем случае соответствуют свойствам средних, то результат должен заключаться между минимальным и максимальным интервальными числами. Будем считать, что из двух интервальных чисел то является меньшим, у которого нижняя граница находится левее на числовой прямой. Для заданного множества интервальных чисел определим «самое левое» интервальное число в виде $L(\underline{x}, \underline{w}, \bar{w}) = F_1(\underline{x}, \underline{w}, \bar{w}) = [(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \uparrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow)]$, а «самое правое» в виде $R(\underline{x}, \underline{w}, \bar{w}) = F_2(\underline{x}, \underline{w}, \bar{w}) = [(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \downarrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \downarrow)]$. Так как $(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \uparrow) < (\underline{x} \downarrow, \underline{w} \downarrow)$ и $(\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow) < (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \downarrow)$, то $L(\underline{x}, \underline{w}) < R(\underline{x}, \underline{w})$. Используя идею «усреднения», положим

$$\begin{aligned} \text{IntOWA}_\alpha(\underline{x}, \underline{w}, \bar{w}) &= \alpha \cdot L(\underline{x}, \underline{w}, \bar{w}) + (1 - \alpha) \cdot R(\underline{x}, \underline{w}, \bar{w}) = \\ &= [\alpha \cdot [(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \uparrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow)] + (1 - \alpha) \cdot [(\underline{x} \downarrow, \underline{w} \downarrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \downarrow)]] = \\ &= [\alpha \cdot (\underline{x} \downarrow, \underline{w} \uparrow) + (1 - \alpha) \cdot (\underline{x} \downarrow, \underline{w} \downarrow), \alpha \cdot (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow) + (1 - \alpha) \cdot (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \downarrow)]. \end{aligned}$$

Здесь параметр α позволяет учесть значимость или важность левой или правой границы при агрегировании. Аналогично можно построить операцию агрегирования, усредняя «самый широкий» F_3 и «самый узкий» F_4 интервалы.

Иллюстративные примеры

Пример 1. Пусть задан набор интервальных чисел

$$[-2, 1], [-5, 4], [0, 1], [2, 8], [-3, -1].$$

Найдем обобщенную оценку, используя предложенные выше формулы. Составим $\underline{x} = (-2, -5, 0, 2, -3)$, $\underline{x} \uparrow = (-5, -3, -2, 0, 2)$, $\underline{x} \downarrow = (2, 0, -2, -3, -5)$, $\bar{x} = (1, 4, 1, 8, -1)$, $\bar{x} \uparrow = (-1, 1, 1, 4, 8)$, $\bar{x} \downarrow = (8, 4, 1, 1, -1)$.

Пусть $\underline{w} \downarrow = \underline{w}^* = (1, 0, 0, 0, 0)$, $\underline{w} \uparrow = \underline{w}_* = (0, 0, 0, 0, 1)$, тогда

$$\begin{aligned} F_1(\underline{x}, \underline{w}) &= [-5, -1], F_2(\underline{x}, \underline{w}) = [2, 8], F_3(\underline{x}, \underline{w}) = [-5, 8] = \text{MAX}(\underline{x}), \\ F_4(\underline{x}, \underline{w}) &= [\min\{2, -1\}, \max\{2, -1\}] = [-1, 2] = \text{MIN}(\underline{x}). \end{aligned}$$

Найдем обобщенную оценку F_w для заданного множества интервальных чисел агрегируя большинство левых и правых границ, при этом квантор *большинство* задается функцией квантификации $Q(x) = x^2$. В этом случае вектор весов имеет вид

$$\underline{w} = \left(\frac{1}{25}, \frac{3}{25}, \frac{5}{25}, \frac{7}{25}, \frac{9}{25} \right) = (0.04, 0.12, 0.2, 0.28, 0.36),$$

а результатом агрегирования является интервал вида

$$[F_w(\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n), F_w(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)] = [(\underline{x} \downarrow, \underline{w}), (\bar{x} \downarrow, \underline{w})] = [-2.96, 0.92].$$

Продемонстрируем вычисление, например, левой границы $(\underline{x} \downarrow, \underline{w})$. В этом случае $\underline{x} \downarrow = (2, 0, -2, -3, -5)$, тогда

$$(\underline{x} \downarrow, \underline{w}) = 2 \cdot 0.04 + 0 \cdot 0.12 + (-2) \cdot 0.2 + (-3) \cdot 0.28 + (-5) \cdot 0.36 = -2.96.$$

Найдем результирующий интервал, ориентированный на усредненный центр. Для заданных интервальных чисел перечислим их центры

$$-0.5, -0.5, 0.5, 5, -2,$$

а затем усредненный центр $MID = -0.61$ с использованием OWA с весами, сгенерированными на основе функции квантификации $Q(x) = x^2$, т.е. $\underline{w} = (0.04, 0.12, 0.2, 0.28, 0.36)$. Из левых границ выберем те, которые лежат левее MID : -2, -5, -3, а из правых границ – те, которые лежат правее MID : 8, 4, 1, 1. Вновь воспользуемся функцией

квантификации $Q(x) = x^2$, при этом в первом случае вектор весов будет иметь вид $w_l = \left(\frac{1}{9}, \frac{3}{9}, \frac{5}{9}\right) = (0.11, 0.33, 0.56)$, во втором случае – $w_r = \left(\frac{1}{16}, \frac{3}{16}, \frac{5}{16}, \frac{7}{16}\right) = (0.0625, 0.1875, 0.3125, 0.4375)$. Используя OWA-операцию, найдем $l = -4.01$, $r = 2$. Если имеется интерес к самому «узкому» интервалу, то $C = \min$. Найдем $\min \left\{ \underbrace{2 - (-0.61)}_{2.61}, \underbrace{(-0.61) - (-4.01)}_{3.4} \right\} = 2.61$, тогда результирующий интервал будет иметь вид $[-0.61 - 2.61, -0.61 + 2.61] = [-3.22, 2]$.

Чтобы найти IntOWA, нужно иметь два вектора весов, один из которых упорядочен по возрастанию, а другой – по убыванию. Поступим следующим образом: положим $w \uparrow = (0.04, 0.12, 0.2, 0.28, 0.36)$, а вектор $w \downarrow$ получим, упорядочивая вектор $w \uparrow$ по неубыванию, т.е. $w \downarrow = (0.36, 0.28, 0.2, 0.12, 0.04)$. Найдем

$$F_1(x, w) = \left[(x \downarrow, w \uparrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \uparrow) \right] = [-2.96, 0.92],$$

$$F_2(x, w) = \left[(x \downarrow, w \downarrow), (\bar{x} \downarrow, \bar{w} \downarrow) \right] = [-0.24, 4.28].$$

Пусть $\alpha = 0.3$, тогда

$$\text{IntOWA}_{0.3}(x, w) = 0.3 \cdot [-2.96, 0.92] + 0.7 \cdot [-0.24, 4.28] = [-1.056, 3.272].$$

Пример 2. Рассмотрим следующие интервальные числа:

$$[23, 25][20, 22], [16, 19], [8, 16], [4, 7], [2, 3], [-2, 1], [-8, -3],$$

$$[-11, -9], [-14, -12], [-14; 25], [3.8; 6.9], [-3.2; 13.6], [-3.2; -0.2].$$

В табл. 2 представлены результаты использования различных операций агрегирования для получения обобщенной оценки, компонентами которой являются перечисленные выше интервальные числа.

Таблица 2 – Результат агрегирования интервальных чисел

Операции агрегирования	Обобщенная оценка	Середина	Ширина
Дизъюнкция $F_{(w_*, w^*)}(x) = \text{MAX}(x)$	$[-14; 25]$	5,5	39
Конъюнкция $F_{(w^*, w_*)}(x) = \text{MIN}(x)$	$[-14; -12]$	-13	2
Среднеарифметическое $F_{(w_\Delta, w_\Delta)}(x) = A(x)$	$[3.8; 6.9]$	5,35	3,1
Квазидизъюнкция $F_{(w, \bar{w})}(x)$, весовые коэффициенты получены на основе $Q(x) = x^2$, $\bar{Q}(x) = \sqrt{x}$	$[-3.26; 13.2]$	4,97	16,46
Квазиконъюнкция $F_{(w, \bar{w})}(x)$, весовые коэффициенты получены на основе $Q(x) = \bar{Q}(x) = x^2$	$[-3.26; 0.44]$	-1,41	3,7

Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что использование OWA-операторов является перспективным направлением построения моделей оценки сложных объектов, ориентированных на обработку приближенной информации в форме интервальных чисел, при этом можно выделить следующие особенности:

1) для получения результирующего интервала в среднем максимальной ширины необходимо использовать max и квазидизъюнкции с векторами весов w , для которых $orness(w) > 0.5$;

2) для получения результирующего интервала в среднем минимальной ширины необходимо использовать min и квазиконъюнкции с векторами весов w , для которых $andness(w) > 0.5$;

3) с помощью функции квантификации можно сформулировать принцип агрегирования и найти вектор весовых коэффициентов, реализующий компромиссную стратегию, что делает процедуру агрегирования более «прозрачной» и повышает уровень ее интерпретируемости;

4) за счет выбора функций квантификации можно агрегировать левые и правые границы заданных интервалов с различными стратегиями, что позволяет регулировать ширину результирующего интервала, что важно при работе с интервальными данными, так как основной недостаток интервального исчисления заключается в том, что получаемый интервал имеет большую ширину, что соответствует увеличению уровня неопределенности;

5) существующие подходы к формированию весов OWA-операторов могут активно использоваться при агрегировании интервальной информации, тем самым, позволяя настраивать процедуру агрегирования на конкретного пользователя.

6) для середин интервалов, полученных после проведения процедуры агрегирования, характерно самое левое расположение в случае применения \min , самое правое для \max и промежуточное для квазиконъюнкции и квазидизъюнкции.

Заключение

Данная статья посвящена проблеме агрегирования интервальной информации. Анализ существующих подходов к агрегированию числовой информации позволил в качестве перспективного направления исследований рассматривать семейство порядковых операторов взвешенного агрегирования OWA. Его отличительной особенностью является возможность интерпретации важных характеристик процедуры агрегирования (стратегия, уровень компенсационных свойств, энтропийные характеристики и др.) на основе вектора весовых коэффициентов. Важно, что для определения весов существует значительное количество методов, некоторые из которых порождают специальные классы OWA-операторов. В статье предложены различные варианты использования порядковых операторов взвешенного агрегирования для интервальных чисел, при этом агрегирование можно осуществлять и для границ, и для центров интервалов. Новизна данного подхода заключается в возможности учета семантики соответствующей операции агрегирования, ориентированной или на положение результирующего интервального числа на числовой прямой, или на его ширину. За счет весовых коэффициентов можно обеспечить компромисс между этими двумя позициями. Важно, что предложенные обобщения данной техники агрегирования позволят использовать при решении практических задач весь арсенал существующих подходов к нахождению и интерпретации весовых коэффициентов с использованием компромиссной стратегии. Кроме того, анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что на основе данной стратегии может быть успешно решена проблема «широких интервалов», которая возникает при использовании интервальной арифметики в приложениях. Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что предложенные варианты OWA могут использоваться для агрегирования приближенной информации в форме интервальных чисел в системах поддержки принятия решений, в состав которых входит оценочная подсистема, формирующая обобщенную (комплексную, интегральную) оценку каждого из сложных объектов (систем, проектов, вариантов решений).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Леденева, Т.М. Агрегирование информации в оценочных системах / Т.М. Леденева, С.Л. Подвальный // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – №4. – С. 155-164.
2. Billard L. Symbolic Data-Analyses: Conceptual Statistics and Data mining / L. Billard, E. Diday. – John Wiley and Sons, 2006. – 330 p.
3. Grabisch M. Aggregation Functions / M. Grabisch, J. Marichal, R. Mesiar et al. – Cambridge : Cambridge University Press, 2009. – 460 p.
4. Grabisch M. Aggregation functions: Means / M. Grabisch, J.-L. Marichal, R. Mesiar et al. // Information Science, 2011. – №181. – Pp. 1–22.
5. Beliakov G. Practical Guide to Averaging Functions / G. Beliakov, H. Bustince. T. Calvo. – Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-24753-3
6. Джини К. Средние величины / К. Джини. – М. : Статистика, 1970. – 448 с.
7. Yager R.R. The ordered weighted averaging operators: theory and applications / R.R. Yager, J. Kacprzyk. – Boston, Dordrecht, London : Kluwer Academic Publisher, 1997. – 357 p.
8. Леденева Т. М. Моделирование свойств порядковых операторов взвешенного агрегирования / Т. М. Леденева, М. Тафинцева // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Физика. Математика. – 2006. – № 1. – С. 66-72.
9. Yager R. R. Quantifier guided aggregation using OWA operators / R. R. Yager // International Journal of Intelligent Systems. – 1996. – Vol. 11. – P. 49–73. DOI: 10.1002/(SICI)1098-111X(199601)11:1<49::AID-INT3>3.0.CO;2-Z
10. Yager R. R. Analytic properties of maximum entropy OWA operators / R. R. Yager , D. Filev // Information Sciences. – 1995. – Vol. 85. – P. 11–27. DOI: 10.1016/0020-0255(94)00109-0
11. Majlender P. OWA-operators with maximal Renyi entropy / P. Majlender // Fussy sets and systems. – 2005. – Vol. 155. – P. 340–360. DOI: 10.1016/j.fss.2005.04.006
12. Fuller R. On obtaining minimal variability OWA operator weights / R. Fuller, R. Majlender // Fuzzy Sets and Systems. – 2003. – Vol.136. – P. 203–215. DOI: 10.1016/S0165-0114(02)00267-1
13. Larsen H.L. Construction of OWA operators with desired properties / H.L. Larsen // Fuzzy Sets and Systems. – 2002. – Vol. 94. – P. 167–183.

14. Леденева Т.М. Обзор основных классов операторов порядкового взвешенного агрегирования / Т.М. Леденева, И.А. Левкина // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2022. – №1. – С. 5-31

15. Dawood H. Interval Mathematics: Foundations, Algebraic Structures, and Applications / H. Dawood. – Saarbrücken: Lambert Academic, 2011. – 178 p.

16. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ledeneva T. M. Agregirovanie informacii v ocenocnyh sistemah [Aggregation of information in evaluation systems] / T. M. Ledeneva, S. L. Podval'nyj // Vestn. Voronezh. gos. un-ta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii [Bulletin of Voronezh State University. System analysis and information technologies]. – 2016. – № 4. – P. 155-164. [in Russian]

2. Billard L. Symbolic Data-Analyses: Conceptual Statistics and Data mining / L. Billard, E. Diday. – John Wiley and Sons, 2006. – 330 p.

3. Grabisch M. Aggregation Functions / M. Grabisch, J. Marichal, R. Mesiar et al. – Cambridge : Cambridge University Press, 2009. – 460 p.

4. Grabisch M. Aggregation functions: Means / M. Grabisch, J.-L. Marichal, R. Mesiar et al. // Information Science, 2011. – №181. – Pp. 1–22.

5. Beliakov G. Practical Guide to Averaging Functions / G. Beliakov, H. Bustince. T. Calvo. – Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-24753-3

6. Dzhini K. Srednie velichiny [Average values] / K. Dzhini. – М.: Statistika, 1970. – 448 p. [in Russian]

7. Yager R.R. The ordered weighted averaging operators: theory and applications / R.R. Yager, J. Kacprzyk. – Boston, Dordrecht, London : Kluwer Academic Publisher, 1997. – 357 p.

8. Ledeneva T. M. Modelirovanie svojstv porjadkovyh operatorov vzveshennogo agregirovaniya [Modeling of properties of weighted ordinal operators of aggregation] / T. M. Ledeneva, M. Tafinceva // Vestn. Voronezh. gos. un-ta. Serija: Fizika. Matematika [Bulletin of Voronezh State University. Physics. Math]. . –2006. – № 1. – P. 66-72. [in Russian]

9. Yager R. R. Quantifier guided aggregation using OWA operators / R. R. Yager // International Journal of Intelligent Systems. – 1996. – Vol. 11. – P. 49–73. DOI: 10.1002/(SICI)1098-111X(199601)11:1<49::AID-INT3>3.0.CO;2-Z

10. Yager R. R. Analytic properties of maximum entropy OWA operators / R. R. Yager , D. Filev // Information Sciences. – 1995. – Vol. 85. – P. 11–27. DOI: 10.1016/0020-0255(94)00109-0

11. Majlender P. OWA-operators with maximal Renyi entropy / P. Majlender // Fussy sets and systems. – 2005. – Vol. 155. – P. 340–360. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2005.04.006>

12. Fuller R. On obtaining minimal variability OWA operator weights / R. Fuller, R. Majlender // Fuzzy Sets and Systems. – 2003. – Vol.136. – P. 203–215. DOI: 10.1016/S0165-0114(02)00267-1

13. Larsen H.L. Construction of OWA operators with desired properties / H.L. Larsen // Fuzzy Sets and Systems. – 2002. – Vol. 94. – P. 167–183.

14. Ledeneva T. M. Obzor osnovnykh klassov operatorov poryadkovogo vzveshennogo agregirovaniya [Overview of the main classes of weighted ordinal operators of aggregation] / T. M. Ledeneva, I. N. Levkina // Vestn. Voronezh. gos. un-ta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii [Bulletin of Voronezh State University. System analysis and information technologies]. – 2022. – № 1. – P. 5-31. [in Russian]

15. Dawood H. Interval Mathematics: Foundations, Algebraic Structures, and Applications / H. Dawood. – Saarbrücken: Lambert Academic, 2011. – 178 p.

16. Pegat A. Nечеткое моделирование и управление [Fuzzy Modeling and Control] / A. Pegat. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.012>

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ:
РОЛЬ, ЗНАЧЕНИЕ И ОПЫТ УСПЕШНОГО ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ**

Научная статья

Малахова Д.С.^{1, 2, 3} *, Лукьянов М.А.², Иваев М.И.³

^{1, 2, 3} Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

* Корреспондирующий автор (malakh.daria[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье рассматривается роль и значение информационных технологий в государстве. Целью работы является показать, что создание системы информационных ресурсов в любом современном государстве – важнейший стратегический фактор развития промышленности, экономики, социальной сферы, позволяющий в итоге оптимально использовать и экономить сырье, энергоносители, полезные ископаемые, трудовые ресурсы. Отмечается необходимость разработки отечественных информационных технологий, независимых от участия иностранных цифровых продуктов и программного обеспечения. Рассматривается значение отечественных разработок, позволяющих внедрять и эффективно использовать самые разнообразные ресурсы в России, приводятся примеры успешного опыта использования информационных платформ в промышленности, реализации государственных социальных проектов в Самарской области. Обосновывается вывод о необходимости дальнейшей разработки отечественных ИТ-платформ, способных полноценно и комплексно заменить зарубежные аналоги программного обеспечения, направить усилия и возможности отечественных специалистов на защиту своих национальных экономических и социальных интересов, обеспечить информационную безопасность России как суверенного государства, исключить манипуляции со стороны глобальных цифровых платформ.

Ключевые слова: информационные технологии, информационная безопасность, экономика, социальная сфера общества и государства.

**INFORMATION TECHNOLOGY:
ROLE, IMPORTANCE AND EXPERIENCE OF SUCCESSFUL APPLICATION IN RUSSIA**

Research article

Malahova D.S.^{1, 2, 3} *, Luk'yanov M.A.², Ivaev M.I.³

^{1, 2, 3} Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

* Corresponding author (malakh.daria[at]yandex.ru)

Abstract

The article studies the role and importance of information technologies for the state. The purpose of the work is to show that the creation of a system of information resources in any modern state is an important strategic factor in the development of industry, economy and social sphere which allows optimizing the efficient use of raw materials, energy products, labor forces. There is a need to develop domestic information technologies independent of foreign digital products and software. The article analyzes the importance of domestic applications that allow to introduce and effectively use a wide variety of resources in Russia, gives examples of the successful use of communication platforms in industry sector, implementation of state social projects in Samara region. The conclusion justifies the need for further development of domestic IT-platforms, capable to fully and comprehensively replace foreign software, for focusing the efforts and capabilities of domestic specialists to protect their national economic and social interests, to ensure cybersecurity of Russia as a sovereign state, to counter manipulations from the global digital platforms.

Keywords: information technology, cybersecurity, economics, social and state sphere.

Введение

В настоящее время информационные технологии (ИТ) выступают основным цифровым инструментом, позволяющим успешно внедрять и эффективно использовать самые разнообразные ресурсы общества и государства. Создание системы информационных ресурсов в государстве – важнейший стратегический фактор развития и экономики, и социальной сферы. Международный и отечественный опыт показывает, что разработка, внедрение и системный анализ информационных систем позволяют значительно экономить природные ресурсы: сырье, энергоносители, полезные ископаемые, трудовые ресурсы [5]. Это актуально для России, занимающее уникальное положение в мировом сообществе.

Постоянно ведутся дискуссии о перспективах отечественной экономики; отслеживается влияние санкций со стороны США и стран Западной Европы, которые контролируют и ограничивают доступ национальных предприятий к иностранным рынкам капитала [2], [10]. Проблемам разработки и внедрения ИТ также уделяется пристальное внимание [14]. Отмечается, что российская экономика успешно продвигается в сторону развития информационных технологий [7].

Таблица 1 – Динамика и перспективы развития отрасли информационных технологий в России [18]

Целевой показатель	2017	2020 г	Прогноз 2025 г
Удельный вес ИТ-отрасли в ВВП, %	0,88	1,06	1,45
Удельный все занятых в ИТ-отрасли в численности занятых по экономике, %	0,49	0,55	0,60
Производительность труда, млн.руб.	2,09	2,32	3,35
Объем экспорта услуг, млрд. долл. США	3,54	5,45	8,33

США и ведущие страны Западной Европы открыто выражают стремление к ограничению доступа России к передовым технологиям. Но нельзя не признать, что тенденция к санкциям не нова, и в отечественной промышленности уже несколько лет идет курс на импортозамещение. Например, в этом году специалисты группы компаний «ЛАНИТ» для предприятий газодобывающей промышленности («Газпром добыча Астрахань») разработали и успешно внедрили платформу ЕСМ LanDocs, позволяющую вести электронный документооборот, что значительно расширило функциональные возможности и позволило дополнительно включить большее количество сторонних пользователей [13]. Крупнейший в мире производитель палладия и высокосортного никеля «Норильский никель» в настоящее время использует около 50% российского программного обеспечения [6]. Корпорация «ТрансТелеКом» на основе отечественного программного обеспечения разработала и внедрила специальную комплексную услугу для бизнеса [17]. Пакет ИТ-продуктов включает, в частности, защиту от DDoS-атак, хранилище данных по принципу «облако» и ряд других. Все они направлены на существенное снижение рисков кибератак со стороны недобросовестных конкурентов.

В сфере разработки новейших ИТ-продуктов Россия практически не уступает ведущим странам. С 2021 года начинает проявляться тенденция к форсированию внедрения информационных технологий в масштабе России. Так, Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации с 1.05.2022 года до 30.04.2024 года в качестве эксперимента планирует представлять отечественный репозиторий для хранения софта (аналог GitHub), в который будут иметь свободный доступ как физические, так и юридические лица независимо от географических признаков. Это будет репозиторий на государственном уровне, предназначенный для хранения и бесплатного использования программного обеспечения. Репозиторий применим к любой сфере деятельности, но в первую очередь в нем будут находиться программы, разработанные на средства бюджета. Среди участников создания репозитория – Минцифры, МВД, Росреестр, Пенсионный фонд и другие государственные органы, а также заинтересованные юридические лица на добровольной основе. Правила пользования позволяют использовать имеющееся программное обеспечение бесплатно, модифицировать его, продавать третьим лицам, а также использовать коды в других программных продуктах. В репозитории разместят в первую очередь наиболее востребованные социальные платформы: электронное правительство, различные виды государственных услуг, системы социальной защиты населения. Нет никаких сомнений в том, что разработка оригинальной отечественной инфраструктуры позволит России отказаться от зарубежных платформ программного обеспечения, постепенно выйти из ряда потребителей информационных технологий в число мировых разработчиков, а также обеспечить полную технологическую независимость государства в сфере информационных технологий.

Примером уникального и постоянно совершенствующего проекта можно выделить отечественный репозиторий «Сизиф», представляющий базовую открытую информационную инфраструктуру свободного доступа. «Сизиф» позволяет на основе содержащегося программного обеспечения создавать независимым разработчикам любые операционные системы и прикладное программное обеспечение для различных целей. А. Новодворский и А. Смирнов, руководители компании «Базальт СПО», отмечают, что проект «Сизиф» обеспечивает полную независимость принятия управленческих решений от каких-либо зарубежных репозиторий, позволяет организовать полный производственный и торговый цикл исключительно на основе российского программного обеспечения, полноценно обеспечивать функциональность аппаратных средств, используемых разработчиками и пользователями [12].

Следует отметить, что в Самарском регионе на высоком уровне развиты все сегменты ИТ-рынка, на что обратил внимание первый заместитель руководителя Администрации Президента РФ С.Кириенко, находившийся в г. Самаре в мае 2022 г. В частности, в Самарской области успешно решены вопросы импортозамещения комплектующих для предприятия «АВТОВАЗ»; на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года за последние несколько лет в регионе успешно внедрены и функционируют несколько десятков Интернет-сайтов: Портал детской безопасности «СПАС ЭКСТРИМ»; федеральный портал «Российское образование»; федеральный портал малого и среднего предпринимательства и другие [1], [9]. Для создания единого бренда региона, например, осенью 2021 г. проведен фестиваль интернет-деятелей "404", на площадке которого губернатор Д. Азаров обсуждал с лидерами ИТ-сообщества подходы, которые помогут сделать Самару и губернию лидером в сфере высоких технологий и центром притяжения для профессионалов диджитал-индустрии [16].

Научный потенциал региона позволяет создавать и принципиально новые ИТ-продукты, не имеющие аналогов в России. К примеру, ученые Самарского государственного медицинского университета совместно с ИТ-специалистами НИТУ «МИСиС» разработали специальный программный комплекс, использующий искусственный интеллект для оперативной и высокоточной диагностики зубных челюстей [15]. Это является совершенно новой методикой, поскольку заменяет времязатратную и дорогостоящую диагностику, основанную на цефалометрическом анализе рентгеновских снимков головы и осуществляемую врачом вручную.

Безусловно, в условиях санкций создание отечественных ИТ-платформ требует времени и финансовых затрат. Но нельзя забывать, что благодаря разработке отечественных ИТ-продуктов мы можем создать «информационное общество», не подверженное негативному влиянию со стороны США и Запада, о чем говорили и говорят уже более 20 лет [3], [8], [17]. Погружение в мировые виртуальные платформы создает опасный источник угроз – использование во вред персональных данных. Не секрет, что программные средства киберпространства США дают возможность для целенаправленного манипулирования сознанием человека [4].

Нет сомнений, что, разработав и внедрив собственные информационные ресурсы, Россия может и должна занять ключевые позиции в мировом сообществе. Для этого имеется достаточно и специалистов, и технических средств. Российскими учеными создаются уникальные и принципиально новые информационные технологии, причем не только в сфере крупной промышленности и энергетики, но и для решения конкретных локальных задач, особенно – на региональном уровне. Нельзя не отметить, что в Самарской области уделяется самое пристальное внимание развитию информационных ресурсов, позволяющих жителям региона получать практически любую необходимую информацию экономического и социального характера. Самарские ученые создают принципиально ИТ-продукты, позволяющие сокращать время и трудозатраты. В частности, искусственный интеллект для диагностики зубочелюстных аномалий позволяет анализировать графические образы всего за 1-3 секунды, в то время как ручной обзор снимков может занимать 1-2 часа. В последние несколько лет ведется также научная работа по изучению воздействия импульсного магнитного поля на живые клетки организма человека, причем все эти изыскания реализуются на отечественных ИТ-системах.

Заключение

Современные информационные технологии – важнейший инструмент существования и эффективного функционирования любой социальной и экономической системы. Россия – крупнейшая промышленная и геополитическая держава, безусловный и важнейший участник практически всех крупных международно-экономических сообществ и институтов. Территориальная протяженность России позволяет участвовать в решении глобальных проблем как в Европе, так и в Азии, и другие международные субъекты не могут не учитывать это. Благодаря созданию и внедрению отечественных разработок создается единая цифровая система, наиболее приемлемая для России и независимая от санкционной политики, устраняются многие промышленные, экономические и социальные трудности. Со временем ИТ-платформы позволят России направить усилия и возможности на следование своим национальным интересам, как в экономике, так и в социальной сфере. Опыт успешного внедрения и использования отечественных ИТ-продуктов на региональном уровне достаточно широк. В частности, в Самарской области за последние несколько лет успешно внедрены основные информационные порталы социального назначения, создаются принципиально новые ИТ-продукты, сохраняется промышленный потенциал.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Постановление Правительства Самарской области от 23.11.2015 №759 «Об утверждении Стратегии развития отрасли информационных технологий в Самарской области на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.samregion.ru/category/documents/> (дата обращения: 14.03.2022).
2. Абдрахманова Г.И. Индикаторы цифровой экономики: 2020 // Г.И. Абдрахманова, К.О. Вишневский. – Москва : НИУ ВШЭ, 2020. – С. 360 с.
3. Афонина А. В. Общество риска как открытое общество / А.В. Афонина. – Саратов : Саратовский государственный университет, 2000. – С. 156–161.
4. Кашин В.И. «Электронное общество – угроза перевода России под внешнее управление» / В.И. Кашин. [Электронный ресурс]. URL: <https://kprf.ru/party-live/cknews/140926.html> (дата обращения: 11.03.2022).
5. Захаров Д.В. Цифровизация экономики: проблемы и перспективы / Д.В. Захаров // Материалы Международной научно-практической конференции 13 мая 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://apni.ru/article/679-tsifrovizatsiya-ekonomiki-problemi-i-perspekt> (дата обращения: 19.02.2022).
6. Информационные технологии в ГКМ Норильский Никель. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 11.03.2022).
7. Крупнейшие ИТ-компании в России 2021 // Ранкинг TAdviser100. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 26.02.2022).
8. Левашов В. К. Глобализация и социальная безопасность / В.К. Левашов // Социологические исследования. – 2002. – № 3. – С. 19–28.
9. Лошкарев А.В. Реализация проектов цифровой трансформации в государственном управлении на территории Самарской области / А.В. Лошкарев, О.Н. Гостица. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 11.03.2022).
10. Макаров И.Н. Молодое поколение – инновационное будущее российского общества / И.Н. Макаров // Ученые записки Тамбовского отделения РСОМ. – 2020. – № 7. – С. 12–19.
11. Макаров И.Н. Особенности привлечения молодых специалистов и негативные тенденции на рынке труда России / И.Н. Макаров, О.В. Журавлева // Экономика. – 2020. – Т. 7. – № 3. – С. 253–266.
12. Новодворский А. Сизифов труд, или Зачем свободному ПО репозиторий / А. Новодворский. [Электронный ресурс] URL: <https://www.iksmedia.ru/articles/5312028-Sizifov-trud-ili-Zachem-svobodnomu.html> (дата обращения: 15.03.2022).
13. Проект: Газпром добыча Астрахань. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> // дата обращения: 02.03.2022).
14. Современные информационные технологии в управлении социально-экономическими системами. [Электронный ресурс]. URL: <https://moskva.bezformata.com/> (дата обращения: 10.03.2022).
15. Царев В. Губерния высоких технологий / В. Царев, С. Павлов. [Электронный ресурс]. URL: <https://sova.info/news/guberniya-vysokikh-tekhnologiy-samarskaya-oblast-stremitsya-stat-odnim-iz-liderov-it-sfery-strany/> (дата обращения: 11.03.2022).

16. Чумаков А.Н. Глобализация. Контуры целостного мира / А.Н. Чумаков – Москва : Проспект, 2020. – С. 65–74.
17. Продукт:ТТК: Комплексное антикризисное решение для бизнеса. [Электронный ресурс]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ТТК:_Комплексное_антикризисное_решение_для_бизнеса (дата обращения: 26.02.2022).
18. Стратегия развития отрасли информационных технологий в России. [Электронный ресурс]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Стратегия_развития_отрасли_информационных_технологий_в_России (дата обращения: 20.05.2022).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Postanovlenie Pravitel'stva Samarskoj oblasti ot 23.11.2015 №759 «Ob utverzhdenii Strategii razvitija otrasli informacionnyh tehnologij v Samarskoj oblasti na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda» [Resolution of the Government of the Samara Region dated 11/23/2015 No. 759 "On approval of the Strategy for the development of the information technology industry in the Samara region for the period up to 2020 and for the future up to 2025"]. [Electronic resource]. URL: <https://www.samregion.ru/category/documents/> (accessed: 14.03.2022). [in Russian]
2. Abdrahmanova G.I. Indikatory cifrovoj jekonomiki: 2020 [Indicators of the digital economy: 2020] // G.I. Abdrahmanova, K.O. Vishnevskij. – Moscow : HSE, 2020. – 360 p. [in Russian]
3. Afonina A. B. Obshhestvo riska kak otkrytoe obshhestvo [Risk society as an open society] / A.B. Afonina. – Saratov : Saratov State University, 2000. – Pp. 156–161. [in Russian]
4. Kashin V.I. «Jelektronnoe obshhestvo – ugroza perevoda Rossii pod vneshnee upravlenie» [Electronic society – the threat of Russia's transfer to external management] / V.I. Kashin. [Electronic resource]. URL: <https://kprf.ru/party-live/cknews/140926.html> (accessed: 11.03.2022). [in Russian]
5. Zaharov D.V. Cifrovizacija jekonomiki: problemy i perspektivy [Digitalization of the economy: problems and prospects] / D.V. Zaharov // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii 13 maja 2020 [Materials of the International Scientific and Practical Conference on May 13, 2020.]. [Electronic resource]. URL: <https://apni.ru/article/679-tsifrovizatsiya-ekonomiki-problemi-i-perspekt> (accessed: 19.02.2022). [in Russian]
6. Informacionnye tehnologii v GMK Noril'skij Nikel' [Information technologies in MMC Norilsk Nickel]. [Electronic resource]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (accessed: 11.03.2022). [in Russian]
7. Krupnejšie IT-kompanii v Rossii 2021 [the largest IT companies in Russia 2021] // Ranking TAdviser100. [Electronic resource]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (accessed: 26.02.2022). [in Russian]
8. Levashov V. K. Globalizacija i social'naja bezopasnost' [Globalization and social security] / V.K. Levashov // Sociologicheskie issledovanija [Sociological research]. – 2002. – № 3. – Pp. 19–28. [in Russian]
9. Loshkarev A.V. Realizacija proektov cifrovoj transformacii v gosudarstvennom upravlenii na territorii Samarskoj oblasti [Gosteva O.N. Implementation of digital transformation projects in public administration in the Samara region] / A.V. Loshkarev, O.N. Gosteva. [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (accessed: 11.03.2022). [in Russian]
10. Makarov I.N. Molodoe pokolenie – innovacionnoe budushhee rossijskogo obshhestva [The young generation – the innovative future of the Russian society] / I.N. Makarov // Uchenye zapiski Tambovskogo otdelenija RoSMU [Scientific notes of the Tambov department of RoSMU]. – 2020. – № 7. – Pp. 12–19. [in Russian]
11. Makarov I.N. Osobennosti privlechenija molodyh specialistov i negativnye tendencii na rynke truda Rossii [Features of attracting young specialists and negative trends in the Russian labor market] / I.N. Makarov, O.V. Zhuravleva // Jekonomika [Economics]. – 2020. – Vol. 7. – № 3. – Pp. 253–266. [in Russian]
12. Novodvorskiy A. Sizifov trud, ili Zachem svobodnomu PO repozitorij [Sisyphus work, or Why free software repository] / A. Novodvorskiy. [Electronic resource] URL: <https://www.iksmedia.ru/articles/5312028-Sizifov-trud-ili-Zachem-svobodnomu.html> (accessed: 15.03.2022). [in Russian]
13. Proekt: Gazprom dobycha Astrahan' [Project: Gazprom dobycha astrakhan]. [Electronic resource]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> // accessed: 02.03.2022). [in Russian]
14. Sovremennye informacionnye tehnologii v upravlenii social'no-jekonomicheskimi sistemami [Modern information technologies in the management of socio-economic systems]. [Electronic resource]. URL: <https://moskva.bezformata.com/> (accessed: 10.03.2022). [in Russian]
15. Carev V. Gubernija vysokih tehnologij [Province of high technologies] / V. Carev, S. Pavlov. [Electronic resource]. URL: <https://sova.info/news/guberniya-vysokikh-tehnologiy-samarskaya-oblast-stremitsya-stat-odnim-iz-liderov-it-sfery-strany/> (accessed: 11.03.2022). [in Russian]
16. Chumakov A.N. Globalizacija. Kontury celostnogo mira [Globalization. Contours of the holistic world] / A.N. Chumakov – Moscow : Prospekt, 2020. – Pp. 65–74. [in Russian]
17. Produkt:ТТК: Комплексное антикризисное решение для бизнеса [Product:ТТК: Complex anticrisis resolution for business]. [Electronic resource]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ТТК:_Комплексное_антикризисное_решение_для_бизнеса (accessed: 26.02.2022). [in Russian]
18. Strategija razvitija otrasli informacionnyh tehnologij v Rossii [Strategy modern information technologies in the Russian]. [Electronic resource]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Стат'я:Стратегия_развития_отрасли_информационных_технологий_в_России (accessed: 20.05.2022). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.013>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАНАЛОВ ДЛЯ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ**

Научная статья

Медведева Г.А.^{1,*}, Гиниятова К.Р.^{2,3}, Миникаева К.Р.³¹ ORCID: 0000-0002-3507-606X;^{1,2,3} Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

* Корреспондирующий автор (medvedevaga79[at]mail.ru)

Аннотация

Как показала мировая практика, использование отходов золошлаков тепловых электростанций (ЗШО) при производстве строительных материалов позволяет совмещать решение острых экологических проблем путем утилизации отходов с производством высокоэффективных строительных материалов, что очень актуально на сегодняшний день. Одним из способов переработки отходов золы тепловой энергии является получение пористых теплоизоляционных бетонов. Но высокая пористость этих материалов приводит к крайне низкой прочности и высокому водопоглощению. В последнее время, как в стране, так и за рубежом, большое внимание исследователи уделяют методу сжатия пористой полости бетона путем пропитки пористой полости мономерами или олигомерами, а затем полимеризации пористой структуры бетона. В результате пропитки пропитываются бетонные полимеры, обладающие высокопрочными свойствами, плотностью, морозостойкостью и повышенной устойчивостью к некоторым агрессивным средам. Однако высокая стоимость мономеров, их нехватка и сложная технология изготовления бетонных полимеров ограничивают их практическое применение. Кроме того, мономеры и олигомеры имеют ряд недостатков. Поэтому разработка новых, более дешевых и недостаточно пропитанных составов является важной задачей.

Целью проведенного исследования является частичное замещение компонентов материалов золошлаковыми отходами (ЗШО) при изготовлении стен канала и изучение эффективности и ресурсосбережения данного материала.

В данной работе были исследованы свойства бетонов: предел прочности на сжатие, плотность и теплопроводность. Произведен расчет толщины теплоизоляции с учетом изготовления стен канала из материала с добавлением ЗШО и расчет тепловых потерь через изолированную поверхность трубопроводов тепловых сетей при подземной прокладке в непроходных каналах из материала с добавлением ЗШО.

Исследование показало, что материал, изготовленный из отходов золы ТЭЦ-2 и пропитанный серой, имеет низкий коэффициент теплопроводности, удовлетворительные значения прочности и водопоглощения.

Ключевые слова: сера, золошлаковые отходы ТЭЦ, тепловые потери, композиционный материал.

USE OF HEAT ENGINEERING WASTE FOR MANUFACTURING CHANNELS FOR PIPE INSTALLATION

Research article

Medvedeva G.A.^{1,*}, Giniyatova K.R.^{2,3}, Minikaeva K.R.³¹ ORCID: 0000-0002-3507-606X^{1,2,3} Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, 420043, Kazan, Russia

* Corresponding author (medvedevaga79[at]mail.ru)

Abstract

As world practice has shown, the use of ash waste from thermal power plants (ash dump) in building materials production makes it possible to combine the relevant environmental problems solution with the high-efficiency building materials production by recycling waste, which is very relevant today. One of the ways of heat energy ash waste processing is to produce porous thermal-insulating concrete. But the high porosity of these materials leads to extremely low endurance and high water absorption. These days, both home and abroad, researchers have paid a lot of attention to the method of the concrete porous cavity compression by saturating the porous cavity with monomers or oligomers, and then polymerizing it. As a result, concrete polymers saturate with high endurance properties with, density, frost resistance and increased resistance to certain corrosive media. However, the high cost of monomers, their scarcity and the complexity of concrete polymer manufacturing technology limit their practical use. Besides, monomers and oligomers have a number of disadvantages. The development of new, cheaper and insufficiently saturated solutions is therefore an important task.

The aim of the research is to partially replace the components of materials with ash waste (ash dump) in the manufacture of channel walls and to study their efficiency and resource conservation.

In this work, the features of concrete were studied: compressing strength, density and thermal conductivity. The thickness of thermal insulation has been calculated taking into account the construction of the channel walls from material with ash dump, as well as thermal losses through the insulated pipeline surface of thermal networks with the underground construction in crawlways built of material with ash dump.

The study showed that the material made of TPP-2 ash waste and saturated with sulfur has a low thermal conductivity, satisfactory strength and water absorption rates.

Keywords: sulfur, TPP ash waste, thermal losses, composite material.

Введение

В процессе временного или постоянного складирования золошлакового материала (ЗШМ) образуется фильтрационный поток, содержащий находящиеся в золошлаковых материалах водорастворимые соединения, многие из которых являются токсичными (соединения мышьяка, селена, ванадия, фтора, хрома). Данный поток оказывает

неблагоприятное воздействие как на золоотвал в целом, включая его основание, так и на окружающую среду [1]. Почвы испытывают воздействия золоотвала за счет осаждения пыли из атмосферного воздуха.

В связи с тем, что при складировании золошлаков выбросы загрязняющих веществ в атмосферу являются незначительными, специальных мер по контролю над загрязнением воздуха не предусмотрено. Схема воздействия золоотвалов ТЭЦ на окружающую среду представлена на рисунке 1 [2].

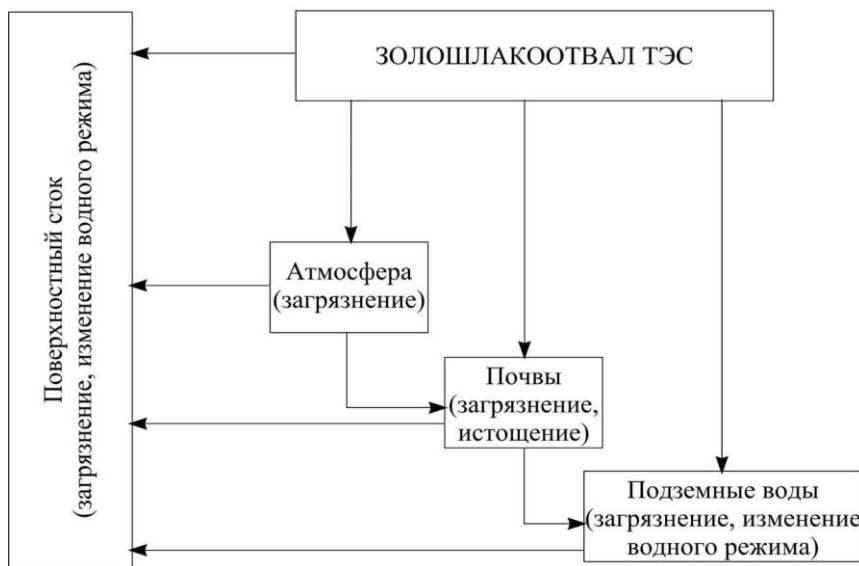


Рис. 1 – Принципиальная схема воздействия золошлакоотвалов ТЭЦ на окружающую природную среду

В золоотвалах накоплено по разным оценкам от 1,5 до 1,8 млрд т золошлаковых отходов (ЗШО). Среднегодовой выход шлаков достиг 30 млн. т. и в связи с ухудшением качества топлива имеет тенденцию к росту. Это создает экологические проблемы, поскольку увеличиваются производственные затраты и стоимость природоохранных мероприятий [3].

Существует 5 основных направлений переработки ЗШО (в порядке убывания популярности) (рис. 2) [4]:

- строительные материалы (цемент, кирпич, блоки) [5], [6], [7];
- дорожное строительство (наполнители для дорожного полотна);
- строительные проекты (стеновой материал);
- производство различных наполнителей;
- сельское хозяйство (стабилизаторы почвы).



Рис. 2 – Направления переработки ЗШО

На нынешнем этапе строительства основным направлением экономии ресурсов является использование вторичных материалов, то есть производственных отходов. Новые правила энергосбережения требуют более высоких коэффициентов теплового сопротивления наружных ограждающих конструкций. Такие свойства трудно или невозможно достичь с помощью традиционных материалов, используемых в отечественном производстве. Поэтому создаются новые технологии многослойных конструкций с использованием эффективных изоляционных материалов [8]. В ходе этой исследовательской работы было дано описание нового теплоизоляционного материала, изготовленного из отходов ЗШО Казанской ТЭЦ-2. В исследовании представлено описание экономического обоснования изготовления образцов этого материала, его физико-механических свойств и пригодности изготовления и применения в строительстве. Этот композитный материал представляет собой цементный материал с защитным покрытием (полученным при пропитке расплавом серы) или без него, содержащий отходы золы.

Исследование показало, что материал, изготовленный из отходов золы ТЭЦ-2 и пропитанный серой, имеет удовлетворительные параметры с точки зрения основных показателей, т.е.:

1. Поскольку он обладает низкой теплопроводностью и может использоваться в качестве теплоизоляционного материала, он энергоэкономный;

2. Прочность действует как конструктивный материал, поскольку обладает удовлетворительными параметрами прочности;

Кроме того, одним из главных аргументов в пользу использования этого материала является его экологический аспект. Многие экологические проблемы, связанные с утилизацией этих отходов, будут решены, если золошлаки различных отраслей промышленности, особенно электростанций, получат перспективный метод вторичного использования [9].

Изготовление композиционного материала

Композиционный материал из золоотходов ТЭЦ-2 представляет собой цементный материал с защитным покрытием (полученным при пропитке расплавом серы) и без него содержащим отходы золы.

Исходными материалами являлись:

- 1) Цемент класса прочности 42,5Н (ГОСТ 31108-2003)
- 2) Сера-отход (ГОСТ 127-03).
- 3) Строительный песок (ГОСТ 8736-93)
- 4) ЗШО – отходы ТЭЦ-2 г. Казань состава (табл. 1):

Таблица 1 – Материалы, содержащие отходы золы

Наименование	Мас. %
SiO ₂	46,8-51,8
CaO+MgO	4,5
R ₂ O	1,77-19,11
Al ₂ O ₃ +TiO ₂	22,03-24,32
Fe ₂ O ₃	5,1-5,8
SO ₃	0,19

Методом просеивания отходы золы делились на компоненты золы и шлака. В исследовании использовался компонент золы с размером частиц менее 1 мм.

Образцы состава готовили путем смешивания исходных компонентов (отходов цемента, песка и золы). Наиболее подходящим с точки зрения прочностных свойств материала является соотношение цемента: наполнитель (песок и песок) 1:3. Поэтому соотношение этих компонентов в работе полностью сохранилось. Полученные смеси были направлены на формование путем заливки образцов в формы размером 2х2х6 см. После оттаивания формочек (через 28 дней) изделия сушат при 100°C в течение 2 часов.

Попадание отходов золы в состав цементного бетона позволяет улучшить изоляционные свойства бетона. При добавлении в состав ЗШО теплопроводность образцов снижается с 0,311 Вт/м°C до 0,24 Вт/м°C, что объясняется образованием пористой структуры.

Увеличение доли отходов золы в наполнителе приводит к снижению прочности в 2,5 раза. Образцы, в которых наполнитель – это только отходы золы, имеют чрезвычайно низкую прочность и даже при небольшом усилии разрушаются. Это связано с образованием рыхлой, пористой структуры образцов и отсутствием адгезии между вяжущим и наполнителем. Декомпозиция может быть вызвана отсутствием адгезии между вяжущим и наполнителем. Уменьшается и плотность состава, что связано с низкой удельной плотностью наполнителя золы и наличием в материале большого количества пор и полостей. Наличие открытых пор в образцах, заполненных отходами золы, является причиной высокого водопоглощения. Таким образом, для цементного состава этот показатель составлял 10%, что неприемлемо для использования в строительстве.

Образцы, полученные для изготовления балок с защитным покрытием, загружали в расплавленный серный контейнер при температуре 120-130°C и пропитывали серой в течение 1 часа. После этого продукты извлекали из пропитанной камеры и охлаждали до температуры окружающей среды. Процесс охлаждения сопровождался кристаллизацией расплава в пористой полости и изменением свойства материала.

После замены образцов в расплаве серы их прочность значительно возросла, прочность на сжатие увеличилась примерно в 8 раз. Прочность на сжатие материала на основе оптимального состава составляла 4,2 МПа, пропитанного серным материалом – 35,7 МПа. Они также стали плотнее, плотность увеличилась с 1,44 г/см³ до 2,178 г/см³ и водопоглощение снизилось до 7 %. Теплопроводность образцов также несколько снизилась: от 0,15 Вт/м°C до 0,128 Вт/м°C.

Таким образом, анализ свойств композитного материала на основе композиционного материала на основе ЗШО без пропитки и пропитанного серой и сравнения с традиционным материалом можно сказать, что теплопроводность этого материала низкая, с точки зрения традиционных теплоизоляционных материалов, но калибровочная прочность 35,7 МПа, пропитанный серным на основе композитного материала приближается к традиционному красному кирпичу марки М300, прочность на сжатие которой составляет 30 МПа. Поэтому можно сделать вывод, что пропитанный серой композитный материал можно считать несущим материалом с высокими теплоизоляционными свойствами.

Одной из возможных областей применения этого материала является строительство каналов для тепловых сетей. Стены каналов будут служить защитной конструкцией и дополнительной изоляцией, что позволит уменьшить объем необходимого обычного теплоизоляционного материала.

Тепловая изоляция трубопроводов и оборудования должна отвечать требованиям энергоэффективности, эксплуатационной надежности и обеспечивать долгий срок службы оборудования. Из-за низкого качества теплоизоляции, во внутридомовых теплопроводах теряется значительная часть выработанной теплоты, что приводит к ошутимому перерасходу топливноэнергетических ресурсов [10].

Расчет толщины теплоизоляции с учетом изготовления стен канала из материала с добавлением ЗШО

При добавлении золошлаковых отходов ТЭЦ в материал стенок канала их термическое сопротивление возрастает, поскольку коэффициент теплопроводности уменьшается. Если учесть термическое сопротивление стенок канала при расчете температуры воздуха внутри канала, то формула будет следующей [11]:

$$t_{\text{кан}} = t_{\text{н}} + k \times (q_1^{-L} + q_2^{-L}) \times (R_{\text{кан}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{гр}})$$

где $t_{\text{н}} = 4,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ – расчетная температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

$k=1,15$ – коэффициент дополнительных потерь;

$q_1^{-L} + q_2^{-L} = 113 \text{ Вт/м}$ – линейные плотности теплового потока от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м;

$R_{\text{кан}}$ – термическое сопротивление теплоотдаче от воздуха к поверхности канала, $\text{м} \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$R_{\text{ст}}$ – термическое сопротивление стенок канала, $\text{м} \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$R_{\text{гр}}$ – термическое сопротивление грунта, $\text{м} \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

$$R_{\text{кан}} = \frac{1}{\pi \times \alpha_{\text{к}} \times \frac{2b \times h}{b+h}} = \frac{1}{3,14 \times 11 \times \frac{2 \times 2,41 \times 1,105}{2,41 + 1,105}} = 0,019 \text{ м} \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

Коэффициент теплопроводности материала ограничивается условием, что температура воздуха внутри канала должна принимать значения менее 40°C для комфортного обслуживания персонала [11].

Допустимая температура канала достигается при $\lambda_{\text{ст}} = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

$$R_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}$$

где $\delta_{\text{ст}} = 0,1 \text{ м}$ – толщина стенки канала.

$\lambda_{\text{ст}} = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопроводности материала стенок канала.

$$R_{\text{ст}} = \frac{0,1}{1,5} = 0,067 \text{ м} \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

$$R_{\text{гр}} = \frac{\ln \left[3,5 \times \frac{H}{h} \times \left(\frac{h}{b} \right)^{0,25} \right]}{\left(5,7 + 0,5 \times \frac{b}{h} \right) \times \lambda_{\text{гр}}} = \frac{\ln \left[3,5 \times \frac{3,2}{1,105} \times \left(\frac{1,105}{2,41} \right)^{0,25} \right]}{\left(5,7 + 0,5 \times \frac{2,41}{1,105} \right) \times 1,45} = 0,2 \text{ м} \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

где H – глубина заложения, расстояние от оси труб до поверхности земли, м;

b и h – внутренние размеры канала: b – ширина канала, h – высота, м.

$$t_{\text{кан}} = t_{\text{н}} + k \times (q_1^{-L} + q_2^{-L}) \times (R_{\text{кан}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{гр}})$$

$$t_{\text{кан}} = 4,8 + 1,15 \times 113 \times (0,019 + 0,067 + 0,2) \approx 42^\circ\text{C}$$

Рассчитаем толщину изоляции для подающего трубопровода:

$$\ln B_1 = 2 \times \pi \times \lambda_{\text{изи}} \times \left(\frac{t_{\text{в}} - t_{\text{кан}}}{q_i^{-L}} - R_{\text{н}}^L \right)$$

где B_1 – отношение наружного диаметра изоляционного слоя к диаметру трубопровода d .

$$\ln B_1 = 2 \times 3,14 \times 0,07 \times \left(\frac{90 - 42}{57} - 0,05 \right) = 0,348$$

$$B_1 = 1,416$$

$$\delta_{\text{из}} = \frac{d_{\text{н}} \times (B_1 - 1)}{2}$$

$$\delta_{\text{из1}} = \frac{0,53 \times (1,416 - 1)}{2} = 0,11 \text{ м}$$

Рассчитаем толщину изоляции для обратного трубопровода:

$$\ln B_2 = 2 \times 3,14 \times 0,07 \times \left(\frac{50 - 42}{56} - 0,05 \right) = 0,041$$

$$B_2 = 1,042$$

$$\delta_{\text{из2}} = \frac{0,53 \times (1,042 - 1)}{2} = 0,011 \text{ м}$$

Для подающего трубопровода принимаем $\delta_{\text{из1}} = 0,15$ м, для обратного трубопровода $\delta_{\text{из2}} = 0,02$ м.

Расчет тепловых потерь через изолированную поверхность трубопроводов тепловых сетей при подземной прокладке в непроходных каналах из материала с добавлением ЗШО

1. Определим термическое сопротивление изоляции подающего и обратного трубопровода:

$$R_{\text{изи}}^L = \frac{1}{2 \times \pi \times \lambda_{\text{изи}}} \times \ln \frac{d_{\text{н}} + 2\delta_{\text{изи}}}{d_{\text{н}}}$$

где $d_{\text{н}}$ – наружные диаметры подающего и обратного трубопровода;

$\delta_{\text{изи}}$ – толщины изоляции подающего и обратного трубопровода;

$\lambda_{\text{изи}}$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала в конструкции.

Для подающего трубопровода:

$$R_{\text{из1}}^L = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 0,07} \times \ln \frac{0,53 + 2 \times 0,15}{0,53} = 1,02 \frac{\text{м}^2 \times \text{°C}}{\text{Вт}}$$

обратного трубопровода:

$$R_{\text{из2}}^L = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 0,07} \times \ln \frac{0,53 + 2 \times 0,02}{0,53} = 0,166 \frac{\text{м}^2 \times \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

2. Термические сопротивления теплоотдаче от поверхности изоляции подающего и обратного трубопровода:

$$R_{\text{н}}^L = \frac{1}{2 \times \pi \times \alpha_{\text{н}} \times (d_i + 2 \times \delta_{\text{изи}})}.$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи на поверхности изоляции. Принимаем значение 7 для покрытий с низким коэффициентом излучения.

$$R_{n1}^L = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 7 \times (0,53 + 2 \times 0,15)} = 0,027 \frac{\text{м}^2 \times \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$R_{n2}^L = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 7 \times (0,53 + 2 \times 0,02)} = 0,039 \frac{\text{м}^2 \times \text{°C}}{\text{Вт}}$$

3. Температура воздуха в канале при изолированных трубопроводах:

$$t_{\text{кан}} = \frac{\frac{t_{в1}}{R_{из1}^L + R_{н1}^L} + \frac{t_{в2}}{R_{из2}^L + R_{н2}^L} + \frac{t_n}{R_{\text{кан}} + R_{\text{гр}}^k}}{\frac{1}{R_{из1}^L + R_{н1}^L} + \frac{1}{R_{из2}^L + R_{н2}^L} + \frac{1}{R_{\text{кан}} + R_{\text{гр}}^k}}$$

$$t_{\text{кан}} = \frac{\frac{90}{1,02 + 0,027} + \frac{50}{0,166 + 0,039} + \frac{4,8}{0,019 + 0,2}}{\frac{1}{1,02 + 0,027} + \frac{1}{0,166 + 0,039} + \frac{1}{0,019 + 0,2}} = 33,83 \text{ °C}$$

Удельные тепловые потери подающего изолированного теплопровода:

$$q_{из1} = \frac{k \times (t_{в1} - t_{\text{кан}})}{R_{из1}^L + R_{н1}^L}$$

$$q_{из1} = \frac{1,15 \times (90 - 33,83)}{1,02 + 0,027} = 61,7 \text{ Вт / м}$$

Удельные тепловые потери обратного изолированного теплопровода:

$$q_{из2} = \frac{k \times (t_{в2} - t_{\text{кан}})}{R_{из2}^L + R_{н2}^L}$$

$$q_{из2} = \frac{1,15 \times (50 - 33,83)}{0,166 + 0,039} = 90,7 \text{ Вт / м}$$

Суммарные тепловые потери составят:

$$q_{из} = q_{из1} + q_{из2}$$

$$q_{из} = 61,7 + 90,7 = 152,4 \text{ Вт / м}$$

4. Температура воздуха в канале при неизолированных трубопроводах:

$$t_{\text{кан}} = \frac{\frac{t_{в1}}{R_{н1}^L} + \frac{t_{в2}}{R_{н2}^L} + \frac{t_n}{R_{\text{кан}} + R_{\text{гр}}^k}}{\frac{1}{R_{н1}^L} + \frac{1}{R_{н2}^L} + \frac{1}{R_{\text{кан}} + R_{\text{гр}}^k}}$$

$$\frac{\frac{90}{0,027} + \frac{50}{0,039} + \frac{4,8}{0,019 + 0,2}}{\frac{1}{0,027} + \frac{1}{0,039} + \frac{1}{0,019 + 0,2}} = 68,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Удельные тепловые потери подающего неизолированного теплопровода:

$$q_{\text{неиз1}} = \frac{t_{\text{в1}} - t_{\text{кан}}}{R_{\text{н1}}^L}$$

$$q_{\text{неиз1}} = \frac{90 - 68,96}{0,027} = 779,3 \text{ Вт / м}$$

Удельные тепловые потери обратного неизолированного теплопровода:

$$q_{\text{неиз2}} = \frac{t_{\text{в2}} - t_{\text{кан}}}{R_{\text{н2}}^L}$$

$$\frac{50 - 68,96}{0,039} = -486,2 \text{ Вт / м}$$

Суммарные тепловые потери составят:

$$q_{\text{неиз}} = q_{\text{неиз1}} + q_{\text{неиз2}}$$

$$q_{\text{неиз}} = 779,3 - 486,2 = 293,1 \text{ Вт / м}$$

Эффективность тепловой изоляции составит:

$$\eta = \frac{q_{\text{неиз}} - q_{\text{из}}}{q_{\text{неиз}}} \times 100\% = \frac{293,1 - 152,4}{293,1} \times 100\% = 48\%$$

Эффективность стен канала из материала с добавлением ЗШО:

$$q_{\text{неиз1}} = \frac{t_{\text{в2}} - t_{\text{кан}}}{R_{\text{н2}}^L}$$

$$\eta = \frac{q_{\text{неиз}} - q_{\text{неиз. ЗШО}}}{q_{\text{неиз}}} \times 100\% = \frac{317,4 - 293,1}{317,4} \times 100\% = 8\%$$

Заключение

1. Ресурсосбережение. Частичное замещение традиционных наполнителей в бетонах золошлаковыми отходами ТЭЦ ведет к ресурсосбережению и экономической эффективности при производстве материала.

2. Эффективность стен канала из материала с наполнителем из ЗШО составляет 8%.

3. Стены канала с золошлаковыми отходами играют роль дополнительного теплоизоляционного материала, благодаря чему появляется возможность уменьшить толщину теплоизоляции Цилиндр ТЕХНО 80 компании «ТехноНИКОЛЬ» для подающего теплопровода на 10 мм, для обратного на 40 мм, что при использовании в тепловых сетях большой протяженности дает хорошую экономическую выгоду.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Саломатов В.В. Использование золошлаковых отходов ТЭЦ / В.В. Саломатов // Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 40–45.
2. Косарев А.С. Оценка возможности использования золошлаковых отходов теплоэнергетики при производстве гранулированного пористого заполнителя для легких бетонов и теплоизоляционных засыпок / А.С. Косарев, В.А. Смолий, А.В. Скориков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 67–71.

3. Худякова Л.И. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций. XXI век / Л.И. Худякова, А.В. Залуцкий, П.Л. Палеев // Техносферная безопасность. – 2019. – № 4. – С. 30–34.
4. Семке А.П. Получение пористых теплоизоляционных материалов на основе золошлаковых отходов / А.П. Семке, О.В. Казьмина // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск. – 2018. – № 1. – С. 79–83.
5. Shi1 D. Study on the durability of concrete using granulated blast furnace slag as fine aggregate / D. Shi1, Q. Liu1, X. Xue1 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 322. – Pp. 21–22.
6. Пат. 2667940 Российская Федерация, МПК С 04 В 18/10. Способ переработки золошлаковых отходов тепловых электростанций для производства строительных изделий / В.А. Краснов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Малое инновационное предприятие «Модификация цементных систем» (RU). – № 2017113034; заявл. 15.04.2017; опубл. 25.09.2018, Бюл. № 27 – С. 4.
7. Казьмина О.В. Получение пеностекляных материалов на основе золошлаковых отходов тепловых электростанций / О.В. Казьмина, Н.А. Верещагин, В.П. Казьмин // Известия Томского политехнического университета. – Томск. – 2011. – Т. 319. – № 3. – С. 55–58.
8. Медведева Г.А. Переработка отходов теплоэнергетики в водостойкие теплоизоляционные материалы строительного назначения / Г.А. Медведева, Р.Т. Ахметова, Ю.Н. Пятко // Журнал Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на промышленных предприятиях, в строительстве, на транспорте и в сельском хозяйстве: Сб. статей XII Междунар. науч.-практич. конференции. – Пенза. – 2012. – № 1. – С.30–35.
9. Ахметова Р.Т. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ при изготовлении серных бетонов в присутствии хлорида фосфора / Р.Т. Ахметова, А.А. Юсупова, Г.А. Медведева // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 11. – С. 43–47.
10. Низамов И.И. Использование современных видов изоляции трубопроводов для повышения энергетической эффективности инженерных систем / И.И. Низамов, Р.Р. Самигуллин, Г.М. Ахмерова // Тенденции развития науки и образования. – 2018. – № 44 – С. 54–55.
11. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов: Свод правил. – Москва : [б. и.], 2013. – 53 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Calomatov B.B. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov TjeC [Use of TTP ash waste] / B.B. Calomatov // Nauka i tehnika [Science and technology]. – 2014. – № 4. – Pp. 40–45. [in Russian]
2. Kosarev A.S. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya zoloshlakovykh otkhodov teplojenergetiki pri proizvodstve granulirovannogo poristogo zapolnitelja dlja legkih betonov i teploizoljacionnyh zasypok [Assessment of the possibility of using ash heat waste and power engineering in the production of granulated porous aggregate for light concrete and heat-insulating backfill] / A.S. Kosarev, V.A. Smolij, A.V. Skorikov // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki [University bulletin. The North Caucasus region. Technical sciences]. – 2018. – № 3. – Pp. 67–71. [in Russian]
3. Hudjakova L.I. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov teplovykh jelektrostantsij. XXI vek [Use of ash waste of thermal stations. XXI century] / L.I. Hudjakova, A.V. Zaluckij, P.L. Paleev // Tehnosfernaja bezopasnost' [Technosphere safety]. – 2019. – № 4. – Pp. 30–34. [in Russian]
4. Semke A.P. Poluchenie poristykh teploizoljacionnykh materialov na osnove zoloshlakovykh otkhodov [Production of porous heat-insulating materials based on ash waste] / A.P. Semke, O.V. Kaz'mina // Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet [National Research Tomsk Polytechnic University]. – Tomsk. – 2018. – № 1. – Pp. 79–83. [in Russian]
5. Shi1 D. Study on the durability of concrete using granulated blast furnace slag as fine aggregate / D. Shi1, Q. Liu1, X. Xue1 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 322. – Pp. 21–22.
6. Pat. 2667940 Rossijskaja Federacija, MPK S 04 V 18/10. Sposob pererabotki zoloshlakovykh otkhodov teplovykh jelektrostantsij dlja proizvodstva stroitel'nykh izdelij [Method for ash waste processing from thermal stations for construction products manufacture] / V.A. Krasnov; zajavitel' i patentoobladatel' Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju "Maloe innovacionnoe predpriatije «Modifikacija cementnykh sistem» (RU). – № 2017113034; zajavl. 15.04.2017; opubl. 25.09.2018, Bjul. № 27 – P. 4. [in Russian]
7. Kaz'mina O.V. Polyčenie penostekol'nykh matepialov na ocnove zoloshlakovykh otkhodov teplovykh jelektrostantsij [Sponge-glass materials production based on thermal stations waste ash] / O.V. Kaz'mina, N.A. Bepeshhagin, V.P. Kaz'min // Izveštija Tomckogo politehničeskogo univepciteta [National Research Tomsk Polytechnic University Bulletin]. – Tomsk. – 2011. – Т. 319. – № 3. – Pp. 55–58. [in Russian]
8. Medvedeva G.A. Pererabotka otkhodov teplojenergetiki v vodostojkie teploizoljacionnye materialy stroitel'nogo naznachenija [Recycling of heat and power waste into water-resistant thermal insulation materials for construction] / G.A. Medvedeva, R.T. Ahmetova, Ju.N. Pjatko // Zhurnal Jekologija i resurso- i jenergosberegajushhie tehnologii na promyshlennykh predpriyatijah, v stroitel'stve, na transporte i v sel'skom hozjajstve [Ecology and resource- and energy-saving technologies in industrial enterprises, construction, transport and agriculture]: Collection of articles XII International scientific and practical conference. – Penza. – 2012. – № 1. – Pp.30–35. [in Russian]
9. Ahmetova R.T. Utilizacija zoloshlakovykh otkhodov TJeC pri izgotovlenii sernyh betonov v prisutstvii hlorida fosfora [Utilization of TTP ash waste in the production of sulfur concrete with presence of phosphorus chloride] / R.T. Ahmetova, A.A. Jusupova, G.A. Medvedeva // Sovremennye naukoemkie tehnologii [Modern science technologies]. – 2018. – № 11. – Pp. 43–47. [in Russian]
10. Nizamov I.I. Ispol'zovanie sovremennykh vidov izoljicii truboprovodov dlja povyšeniya jenergetičeskoj jeffektivnosti inženernykh sistem [Use of modern types of pipelines insulation to improve the energy efficiency of engineering systems] / I.I. Nizamov, R.R. Samigullin, G.M. Ahmerova // Tendencii razvitija nauki i obrazovanija [Science and education development tendencies]. – 2018. – № 44 – Pp. 54–55. [in Russian]

11. SP 61.13330.2012. Teplovaja izoljacija oborudovanija i truboprovodov [Thermal insulation of equipment and pipelines]. – Moscow : 2013. – 53 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.014>

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАРТОВОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ САМОЛЕТОВ

Научная статья

Лиховидов Д.В.¹, Скребова Е.Г.²*, Калинин Н.С.³, Ильин А.Е.⁴

² ORCID: 0000-0001-9850-3973;

^{1, 2, 3, 4} Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия

* Корреспондирующий автор (dolgorukaja1[at]rambler.ru)

Аннотация

В статье рассматривается основная проблема, возникающая при проведении буксировки воздушных судов, связанная с началом движения. Для решения проблемы предложена конструкция стартового устройства для буксировки воздушных судов и способ регулирования начальной скорости движения самолета в буксировочной системе. Цель исследования заключается в проведении оценки эффективности использования стартового устройства для увеличения тяговых возможностей аэродромных колесных тягачей. В статье использовались математические методы, в том числе методы геометрических преобразований. В результате получены наибольшие значения силы тяги тягача с колодками, входящими в состав стартового устройства. Полученные результаты исследования показывают экономически выгодное и надежное использование аэродромных колесных тягачей с применением стартовых устройств, что соответствует основным направлениям развития средств буксировки воздушных судов.

Ключевые слова: аэродромный тягач, воздушное судно, начало движения, стартовое буксировочное устройство, значения силы тяги тягача с колодками.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF A LAUNCHING DEVICE DURING THE TRANSPORTATION OF AIRCRAFT

Research article

Lihovidov D.V.¹, Skrebova E.G.²*, Kalinin N.S.³, Il'in A.E.⁴

² ORCID: 0000-0001-9850-3973;

^{1, 2, 3, 4} Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu. Gagarin, Voronezh, Russia

* Corresponding author (dolgorukaja1[at]rambler.ru)

Abstract

The article examines the main problem of towing an aircraft, related to the start of movement. To solve the problem, the design of a launching device for aircraft towing and a method for controlling the initial speed of movement of a towing system are proposed. The purpose of the study is to evaluate the effectiveness of the use of the launch device to increase the traction capacity of airfield wheeled tractors. Mathematical methods, including methods of geometric transformations, were used in the article. As a result, the highest values of draft force of the tractor with pads, which are included in the launch device, were obtained. The obtained results of the study show the economically profitable and reliable use of airfield wheeled tractors with launch devices, which coincides to the main directions of development of means of aircraft towing.

Keywords: airfield tractor, aircraft, start of the movement, launching tow device, draft force of the tractor with pads.

Введение

При проведении буксировки воздушных судов (ВС) тягачу для повышения силы тяги загружают на шасси дополнительный балласт [4], что существенно влияет на эксплуатационные затраты. Важный вопрос, который необходимо учитывать при буксировке заключается в том, что тягачу в момент начала движения с зацепленным ВС необходимо развить усилие, превышающее в два раза усилие его прямолинейного движения [1]. Способы решения этой задачи многогранны, одним из общепринятых является погрузка передней стойки самолета на шасси [2], [7].

Авторы статьи предлагают решение проблемы эффективно и с минимальными затратами – использованием стартового устройства [8]. На рисунке 1 представлен тягач, оборудованный предлагаемым устройством, в состав которого входят следующие основные составляющие: стартовый гидроцилиндр 2, соединенный с задними стойками через трос, догружающее устройство 3, колодки 5, которые автоматически убираются в необходимый момент. Использование устройства позволяет повысить стабильность разгона ВС независимо от состояния аэродромного покрытия, обеспечивая качественное регулирование начальной скорости его движения [3].

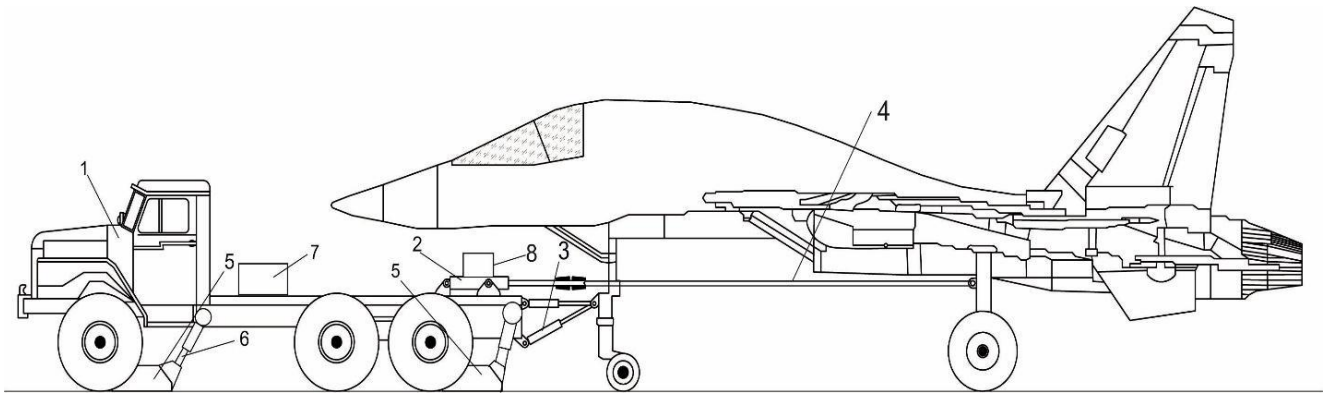


Рис. 1 – Буксировщик, оборудованный стартовым устройством:

1 – тягач; 2 – стартовый гидроцилиндр; 3 – догружающее устройство; 4 – трос; 5 – колодки; 6 – тормозные колодки; 7 – блок управления; 8 – датчик приближения

Основные результаты

Регулирование начальной скорости движения ВС достигается установкой под колеса буксировщика тормозных колодок с использованием механизма установки и автоматического извлечения 6. При начале движения ВС оптический датчик приближения 8 дает команду на блок управления 7 для извлечения колодок 5 и водителю на начала движения. Догружающее устройство 3 позволяет повысить сцепной вес тягача для увеличения его силы тяги [14].

Положительный эффект от использования тормозных колодок возникнет в том случае, когда коэффициент трения колодки с опорной поверхностью будет больше чем у колеса [15]. Для этого нужно подобрать материал и микрорельеф опорной части колодки с коэффициентом сцепления большим, чем у шин тягача.

Взаимодействие колеса с колодкой описывает методика оценки эффективности использования колодок для увеличения тяговых возможностей буксировщика [11].

На рисунке 2 представлена схема сил, приложенных к колодке при ее равновесии на аэродромном покрытии. Согласно этой схеме неравенство, при выполнении которого колодка не будет скользить по поверхности:

$$R \times \sin \alpha \leq T_{mp}, \quad (1)$$

где $T_{тр}$ – сила трения колодки по опорной поверхности;

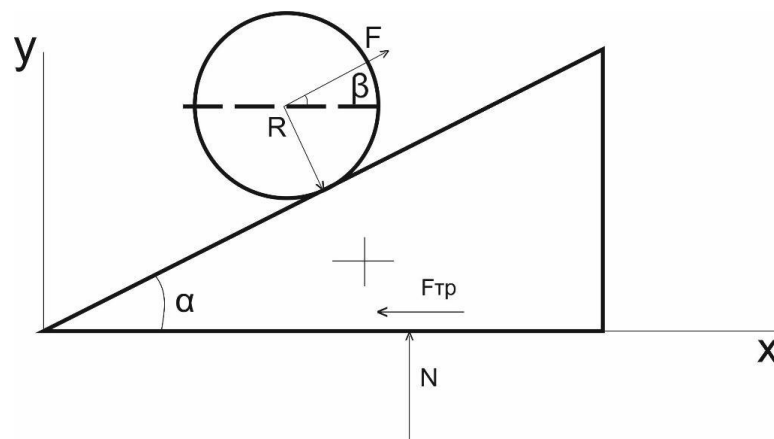


Рис. 2 – Схема сил, приложенных к колодке при ее равновесии на аэродромном покрытии:

R – нормальное давление колеса на колодку;

N – сила нормального давления опорной поверхности на колодку;

$F_{тр}$ – сила трения колодки; F – силу тяги на колесном движителе

Представленные на рисунке 2 силы рассчитываются по следующим выражениям: сила трения:

$$F_{mp} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения между опорой и колодкой; N – сила нормального давления опорной поверхности на колодку.

Сила нормального давления N должна удовлетворять равенству $N - R \cos \alpha = 0$, то есть $N = R \cos \alpha$.

С учетом выше выведенного неравенство (1) примет вид $R \sin \alpha \leq \mu R \cos \alpha$, или

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \mu \quad (2)$$

При соблюдении условия данного неравенства колодка будет неподвижна, и максимальный допустимый угол наклона колодки определяется величиной коэффициента трения между колодкой и опорной поверхностью:

$$\alpha = \arctg \mu \quad (3)$$

При буксировке воздушного судна в начальный период, когда еще тягач не начал движение, колодка не должна двигаться относительно поверхности аэродрома и соответственно колесный движитель не должен перемещаться по наклонной поверхности колодки. Это условие будет соблюдаться при сумме проекций сил на наклонную поверхность колодки, равной нулю:

$$F \cos(\beta - \alpha) - G \sin \alpha = 0 \quad (4)$$

Из выражения выделим силу тяги на колесном движителе:

$$F = \frac{G \sin \alpha}{\cos(\beta - \alpha)} \quad (5)$$

Сила сопротивления со стороны колодки выражается следующим образом:

$$T_{\text{кол}} = F \cos \beta = \frac{G \sin \alpha \cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)}. \quad (6)$$

Как известно, сила тяги тягача определяется с учетом коэффициента сцепления колесных движителей с опорной поверхностью [16]. По аналогии можно вывести выражение силы сопротивления со стороны колодки через величину так называемого коэффициента сцепления колодки $\varphi_{\text{кол}}$:

$$T_{\text{кол}} = G \varphi_{\text{кол}} \quad (7)$$

В результате проведенных исследований и выведенных выражений можно сделать вывод о том, что эффект от применения колодок будет достигнут в случае выполнения неравенства [11]:

$$\varphi_{\text{кол}} > \varphi_{\text{цп}} \quad (8)$$

Максимальное значение коэффициента сцепления колодки $\varphi_{\text{кол}}$ будет достигаться при определении угла β по уравнению:

$$\frac{d\varphi_{\text{кол}}}{d\beta} = \sin \alpha \times \frac{d}{d\beta} \left[\frac{\cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)} \right] = 0 \quad (9)$$

После вычисления производной вытекают два решения:

$$\sin \beta = 0 \text{ и } \frac{\cos \beta - \cos(\beta - \alpha)}{\cos^2(\beta - \alpha)} = 0 \quad (10)$$

В первом случае $\beta = 0$, во втором $\alpha = 0$, что говорит об отсутствии колодки.

Исходя из этого максимальное значение $\varphi_{\text{кол}}$ равно

$$\varphi_{\text{кол}} = \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)} \quad (11)$$

Учитывая, что $\beta = 0$ и косинус имеет четную составляющую, следует выражение:

$$\varphi_{\text{кол}} = \text{tg}\alpha \quad (12)$$

Выведенное ранее неравенство (2) можно записать с учетом выше изложенного

$$\mu > \varphi_{\text{сцп}} \cdot (9) \quad (13)$$

Таким образом, эффект от применения колодок в этом способе буксировки воздушных судов достигается при условии, когда коэффициент трения колодки по опорной поверхности аэродрома μ превышает коэффициент сцепления колес тягача $\varphi_{\text{сцп}}$ с той же опорой. Тем не менее выполнение неравенства (9) в общем случае не обеспечивается, и при положительном решении эффект от колодки не будет значительным. Так как угол α (угол наклона колодки) вообще отсутствует в выражении, то вместо колодки возможно использование плоской подставки, имеющей высокий коэффициент трения.

Заключение

Проведенное исследование показало, что использование колодок со свободными колесами нецелесообразно, но в то же время для управления тягачом в момент трогания с места являлось бы удобным. Ранее [6] указывалось, что для оценки силы тяги по сцеплению за счет использования колодок целесообразно использовать коэффициент эффективности колодок. Используя этот коэффициент можно рассчитать [12] наибольшее значение силы тяги тягача с колодками:

$$T_{\text{кол}} = G\varphi_{\text{сцп}}k_{\text{кол}} \quad (14)$$

Таким образом применение стартовых устройств при буксировке ВС с тормозными колодками обеспечивает экономически выгодное и надежное использование аэродромных колесных тягачей, что соответствует основным направлениям развития средств буксировки воздушных судов [9], [13].

Авторы статьи провели анализ возможностей российских предприятий по изготовлению конструктивных составляющих предлагаемого буксировочного устройства [5], который показал положительные результаты, что соответствует требованиям руководства нашей страны [10].

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Великанов А.В. Помощник самолета / А.В. Великанов, Д.В. Лиховидов, Д.Е. Дьяков и др. // Армейский сборник. – 2020. – № 5. – С. 38–44.
2. Дьяков Д.Е. Проблемы эксплуатации аэродромных буксировщиков и пути их решения / Д.Е. Дьяков, Д.В. Лиховидов, Р.А. Мачехин и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/115-12123> (дата обращения 18.11.2021).
3. Зацепин В.В. Повышение эффективности работы аэродромного буксировщика в начальный период движения / В.В. Зацепин, И.В. Саяпин // Сборник статей по материалам XXII межвузовской НПК Перспектива. – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. – С. 34–48.
4. Канарчук Г.Н. Авиационная наземная техника / Г.Н. Канарчук. – Москва : Транспорт, 1989, – С. 102–113.
5. Лиховидов Д.В. Выбор российских комплектующих для чалочного (стартового) устройства транспортирования воздушных судов / Д.В. Лиховидов, Н.С. Калинин, В.А. Свиридов // Сборник статей XI Международной НПК «Актуальные вопросы современной науки и образования». – Пенза, 2021. – С. 67–71.
6. Петренко А.М. Расчет тягово-скоростных свойств топливной экономичности специализированных транспортных средств / А.М. Петренко. – Москва : МАДИ, 2013. – 74 с.
7. Пат. РФ № 2505460 МПК 7 В64F 1/22. Способ буксировки воздушных судов / А.В. Великанов, Е.В. Носов, С.В. Лазарев, Д.В. Лиховидов (РФ); патентообладатель: ФГОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) МО РФ. – опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. – 6 с.
8. Пат. РФ № 2654240 МПК 7 В64F 1/22. Устройство для транспортирования воздушных судов / А. В. Великанов, Д.Е. Дьяков, И.В. Саяпин, Д.В. Лиховидов (РФ); патентообладатель: ФГВКОУ ВПО «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). – опубл. 17.05.2018, Бюл. № 14. – 8 с.
9. Пикалов А.Д. Пути развития средств транспортирования самолетов / А.Д. Пикалов, Н.С. Калинин, Д.В. Лиховидов // Материалы Международной НПК «Наука сегодня: задачи и пути решения», Научный центр «Диспут». – Вологда, 2021. – С. 24–26.
10. О подтверждении производства промышленной продукции на территории РФ : постановление Правительства РФ от 17.07.2015 года № 719.
11. Саяпин И.В. Методика оценки эффективности использования тормозных колодок для повышения тяговых возможностей буксировщика, оборудованного стартовым устройством / И.В. Саяпин, А.В. Великанов // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – №2. – С.144–145. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-engineering.ru/article/view?id=579>(дата обращения 18.11.2021).

12. Свидетельство на программу для ЭВМ № 2021612053 РФ. Программа расчета внешней скоростной характеристики транспортного средства / Д.Е. Дьяков, Д.В. Лиховидов, Л.А. Великанова; заявитель Дьяков Д.Е. – заявл. 25.01.2021; опублик. 10.02.2021. – 1 с.
13. Свиридов В.А. Современное состояние и перспективы развития средств буксировки воздушных судов / В.А. Свиридов, С.А. Косинов, Н.С. Калинин и др. // *Материалы Международной НПК «Вопросы современных научных исследований»*. Научный журнал «Вестник современных исследований». – Омск, 2020. – № 2–1(32). – С. 34–41.
14. Спасибухов Ю.Н. Повышение эффективности буксировки самолетов с использованием чалочного (стартового) устройства / Ю.Н. Спасибухов, Д.В. Лиховидов // *Материалы национальной НПК «Наука, образование и инновации в современном мире»* – Воронеж, 2018. – С. 316–320.
15. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин: учебник для студентов машиностроительных специализированных вузов / Г.А. Смирнов. – Москва : Машиностроение, 1990. – 352 с.
16. Ульянов Н.А. Основы теории и расчета колесного движителя землеройных машин / Н.А. Ульянов. – Москва : Машгиз, 1962. – 208 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Velikanov A.V. Pomoshhnik samoleta [Aircraft assistant] / A.V. Velikanov, D.V. Lihovidov, D.E. D'jakov et al. // *Armejskij sbornik [Army Collection]*. – 2020. – № 5. – Pp. 38–44. [in Russian]
2. D'jakov D.E. Problemy jekspluatacii ajerodromnyh buksirovshhikov i puti ih reshenija [Problems of operation of airfield tugs and ways to solve them] / D.E. D'jakov, D.V. Lihovidov, R.A. Machehin et al. // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija [Modern problems of science and education]*. – 2014. – № 1. [Electronic resource]. URL: [https:// science-education.ru/115-12123](https://science-education.ru/115-12123) (accessed: 18.11.2021). [in Russian]
3. Zacepin V.V. Povyshenie jeffektivnosti raboty ajerodromnogo buksirovshhika v nachal'nyj period dvizhenija [Improving the efficiency of the airfield towing vehicle in the initial period of movement] / V.V. Zacepin, I.V. Sajapin // *Sbornik statej po materialam XXII mezhvuzovskoj NPK Perspektiva [Collection of articles based on the materials of the XXII interuniversity research and development complex Perspektiva]*. – Voronezh : VUNC VVS «VVA», 2013. – Pp. 34–48. [in Russian]
4. Kanarchuk G.N. Aviacionnaja nazemnaja tehnika [Aviation ground equipment] / G.N. Kanarchuk. – Moscow : Transport, 1989. – Pp. 102–113. [in Russian]
5. Lihovidov D.V. Vybtor rossijskikh komplektujushhij dlja chalochnogo (startovogo) ustrojstva transportirovanija vozdušnyh sudov [The choice of Russian components for the pull (launch) device for transporting aircraft] / D.V. Lihovidov, N.S. Kalinin, V.A. Sviridov // *Sbornik statej XI Mezhdunarodnoj NPK «Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki i obrazovanija» [Collection of articles of the XI International SPC «Topical issues of modern science and education»]*. – Penza, 2021. – Pp. 67–71. [in Russian]
6. Petrenko A.M. Raschet t'jagovo-skorostnyh svojstv toplivnoj jekonomichnosti specializirovannyh transportnyh sredstv [Calculation of traction and speed properties of specialized vehicles fuel efficiency] / A.M. Petrenko. – Moscow : MADI, 2013. – 74 p. [in Russian]
7. Pat. RF № 2505460 MPK 7 B64F 1/22. Sposob buksirovki vozdušnyh sudov [Aircraft towing method] / A.V. Velikanov, E.V. Nosov, S.V. Lazarev, D.V. Lihovidov (RF); the applicant: FGOU VPO «Military Aviation Engineering University» (Voronezh) of the Ministry of Defense of the Russian Federation. – publ. 27/01/2014, Bul. № 3. – 6 p. [in Russian]
8. Pat. RF № 2654240 MPK 7 B64F 1/22. Ustrojstvo dlja transportirovanija vozdušnyh sudov [Device for transporting aircraft] / A.V. Velikanov, D.E. D'jakov, I.V. Sajapin, D.V. Lihovidov (RF); the applicant: FGVKOU VPO «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh). – publ. 17/05/2018, Bul. № 14. – 8 p. [in Russian]
9. Pikalov A.D. Puti razvitija sredstv transportirovanija samoletov [Ways of means of transporting aircraft development] / A.D. Pikalov, N.S. Kalinin, D.V. Lihovidov // *Materialy Mezhdunarodnoj NPK «Nauka segodnja: zadachi i puti reshenija», Nauchnyj centr «Disput» [Materials of the International Research and Production Association «Science Today: Tasks and Solutions», Scientific Center «Dispute»]*. – Vologda, 2021. – Pp. 24–26. [in Russian]
10. O podtverzhenii proizvodstva promyshlennoj produkcii na territorii RF [On confirmation of the production of industrial products on the territory of the Russian Federation] : Decree of the Russian Federation Government of 17/07/2015 № 719. [in Russian]
11. Sajapin I.V. Metodika ocenki jeffektivnosti ispol'zovanija tormoznyh kolodok dlja povyshenija t'jagovyh vozmožnostej buksirovshhika, oborudovannogo startovym ustrojstvom [Methodology for evaluating the efficiency of using brake pads to increase the traction capabilities of a towing vehicle equipped with a starting device] / I.V. Sajapin, A.V. Velikanov // *Nauchnoe obozrenie. Tehniceskie nauki [Scientific Review. Technical science]*. – 2014. – № 2. – Pp.144–145. [Electronic resource]. URL: <https://science-engineering.ru/article/view?id=579>(accessed: 18.11.2021). [in Russian]
12. Svidetel'stvo na programmu dlja JeVM № 2021612053 RF. Programma rascheta vneshnej skorostnoj harakteristiki transportnogo sredstva [Certificate for the computer program No. 2021612053 RF. The program for calculating the external speed characteristics of the vehicle] / D.E. D'jakov, D.V. Lihovidov, L.A. Velikanova; the applicant D'jakov D.E. – appl. 25/01/2021; publ. 10/02/2021. – 1 p. [in Russian]
13. Sviridov V.A. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija sredstv buksirovki vozdušnyh sudov [The current state and prospects for the development of aircraft towing facilities] / V.A. Sviridov, S.A. Kosinov, N.S. Kalinin et al. // *Materialy Mezhdunarodnoj NPK «Voprosy sovremennyh nauchnyh issledovanij». Nauchnyj zhurnal «Vestnik sovremennyh issledovanij» [Proceedings of the International SPC «Issues of modern scientific research». Scientific journal «Bulletin of Modern Research»]*. – Омск, 2020. – № 2–1(32). – Pp. 34–41. [in Russian]
14. Spasibuhov J.N. Povyshenie jeffektivnosti buksirovki samoletov s ispol'zovaniem chalochnogo (startovogo) ustrojstva [Improving the efficiency of aircraft towing using a pull (start) device] / J.N. Spasibuhov, D.V. Lihovidov // *Materialy nacional'noj NPK «Nauka, obrazovanie i innovacii v sovremennom mire» [Materials of the national NPC «Science, education and innovation in the modern world»]*. – Voronezh, 2018. – Pp. 316–320. [in Russian]

15. Smirnov G.A. Teorija dvizhenija kolesnyh mashin: uchebnik dlja studentov mashinostroitel'nyh specializirovannyh vuzov [Theory of wheeled vehicles motion: Textbook for students of specialized engineering universities] / G.A. Smirnov. – Moscow : Mashinostroenie, 1990. – 352 p. [in Russian]

16. Ul'janov N.A. Osnovy teorii i rascheta kolesnogo dvizhitelja zemlerojnyh mashin [Fundamentals of the theory and calculation of the wheel mover of earth-moving machines] / N.A. Ul'janov. – Moscow : Mashgiz, 1962. – 208 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.015>

ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ОЦЕНКЕ ПЛАНА РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Научная статья

Таваров С.Ш.^{1,*}, Сидоров А.И.², Калегина Ю.В.³

¹ ORCID: 0000-0002-2875-2752;

² ORCID: 0000-0001-5024-6728;

³ ORCID: 0000-0001-6879-9371;

^{1, 2, 3} Южно-Уральский Государственный университет, Челябинск, Россия

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

Аннотация

Сезонные колебания в потреблении электроэнергии, неравномерность нагрузки питающих линий снижают не только показатель энергоэффективности сетей, но и способствуют снижению сроков службы элементов систем электроснабжения.

Для решения задач прогнозирования электропотребления предлагается применение теории нечетких множеств для оценки эффективного развития энергосистемы Республики Таджикистан. По статистическим данным электропотребления за предыдущий период предлагаются лингвистические переменные, качественно описывающая интервал количественных значений электропотребления в зимний период времени крупных городов Республики Таджикистан. Полученные интервалы статистических значений электропотребления позволили предложить величину математического ожидания возможностную характеристику электропотребления зимой. Применение нечётких множеств позволило сделать процедуру перехода от балльной шкалы оценки качества планов развития энергосистемы Республики Таджикистан к числовой, более гибкой. Выведены числовые значения (числовой показатель 3-2-1) оценивающие качество плана развития энергосистемы Республики Таджикистан. Данный показатель соответствует лингвистическим переменным (эффективный режим, условно эффективный режим, неэффективный).

Ключевые слова: энергоэффективность, электропотребления, бытовые потребители, энергосистемы.

APPLICATION OF FUZZY SET THEORY IN THE EVALUATION OF THE POWER GRID DEVELOPMENT PLAN

Research article

Tavarov S.SH.^{1,*}, Sidorov A.I.², Kalgina YU.V.³

¹ ORCID: 0000-0002-2875-2752;

² ORCID: 0000-0001-5024-6728;

³ ORCID: 0000-0001-6879-9371;

^{1, 2, 3} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

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

Abstract

Seasonal fluctuations in electricity consumption and load imbalance of supply lines not only reduce the energy efficiency indicators, but also the service life of the elements of the power supply system.

In order to anticipate the amount of electrical consumption, it is proposed to apply the fuzzy sets theory for evaluating the effective development of the energy system of the Republic of Tajikistan. According to the statistical data on electrical consumption for the previous period, linguistic variables qualitatively describing the interval of electricity consumption value in the winter period in big cities of the Republic of Tajikistan are proposed. The obtained intervals of statistical values of electrical consumption allowed to propose an expected utility value of a possible characteristic of electric consumption in winter. The use of fuzzy sets made it possible to make more flexible the transition procedure from a point scale quality assessment of development plans of the Republic of Tajikistan electric energy system to a numerical one. Numerical values (numerical indicator 3-2-1) for evaluation of the quality of the electric energy system development plan of the Republic of Tajikistan have been deduced. The indicator corresponds to linguistic variables (effective mode, relatively effective mode, ineffective).

Keywords: energy efficiency, energy consumption, residential users, energy systems.

Введение

Традиционно и стратегические задачи формирования планов (долгосрочных, среднесрочных, оперативных) развития энергосистемы региона, и тактические задачи коррекции энергорезима в своих решениях опираются на массивы данных статистического учета энергопотребления, охватывающие определенные временные периоды дни, недели, месяцы, сезоны и годы. Обработка данных осуществляется методами статистического анализа, применяются элементы теории вероятности. Однако в реализации планов основным, хотя и ограниченным источником информации о риске являются субъективные экспертные оценки. Так эксперт-оператор генерации и сети руководствуется протоколами действий, которые содержат указания, использующие естественный язык, качественные, а не количественные оценки: «в случае значительного превышения величины» или «в ситуации приближения значений к критическим», «если риск отключения довольно велик» и т.д. Принятие оператором решения в таких случаях затруднено, оно во многом зависит от его квалификации, интуиции. Эффективность решения, риск неверного решения носят характер случайной величины, что, кроме технических рисков, несет в себе и риски экономические [1], [2], [3], [4].

В таких условиях появляется потребность в других, отличных от вероятностного, подходах к оценке имеющейся неопределённости.

Постановка задачи

Таким подходом является возможностный подход, возникший в рамках теории нечетких множеств [1], [2], [3], он менее точно оценивает ситуацию, но в случаях дефицита информации работает более устойчиво. Возможностный подход позволяет обрабатывать экспертные оценки, данные в форме естественных высказываний с применением качественных критериев, формализовать их и придать критериям хоть и гибкий, но количественный вид. Одновременно, применение этого подхода расширяет для эксперта-оператора множество возможных решений, позволяет мягче, вариативнее прогнозировать и сравнивать количественные критерии объектов, решать задачи оптимизации.

В исследуемой нами энергосистеме такими качественными показателями стали соответствие стратегическим целям компании, удовлетворенность потребителя, экологичность. Эти качественные показатели выражаются в виде балльной оценки, представляемой одним или несколькими экспертами.

Для решения этой задачи необходимо пройти несколько этапов:

1. На первом этапе мы находим относительный вес для каждого показателя. Нахождение весов для показателей осуществлялось в соответствии с методом построения аналитического иерархического процесса, предложенного Т.Л. Саату [4]. На этом этапе, были определены приоритеты этих показателей относительно друг друга, что, в конечном итоге, повлияло на содержание и вид управленческого решения. Самым приоритетным показателем стал показатель соответствия значения энергопотребления концепции компании. Для пары показателей экспертами было выработано число, которое показывает, насколько первый показатель превосходит второй. Считается, что в идеальной ситуации выполняется равенство:

$$\alpha_{ij} = \alpha_i / \alpha_j$$

где: α_i и α_j – веса факторов i и j соответственно.

2. На втором этапе производим оценивание каждого показателя проекта нечётким числом. В работах [7], [9], [10], [11] конструкция Т.Л. Саату была перенесена на случай нечетких множеств. Концепция компании направлена на приближение текущего энергорегима к центру тяжести нечеткого числа энергопотребления в каждый сезон. Если он приближается к нему, то режим называется эффективным, если находится в диапазоне – то режим называется условно эффективным, если попадает в интервал 2100 – 2158 кВт·ч. или 2758 – 2823,1 кВт·ч. – неэффективным.

3. На третьем этапе осуществляем нормирование показателей. Целью нормировки является приведение количественного значения показателя к нечёткому числу, лежащему на интервале от 0 до 1.

Теория. Результаты экспериментов

Для анализа мы используем полученные ранее статистические данные электропотребления зимой [5], [6] для городов Республики Таджикистан. Описание интервалов количественных значений электропотребления произведём с помощью лингвистических перемены (табл. 1).

Таблица 1 – Лингвистические переменные, качественно описывающие интервал количественных значений энергопотребления зимой для городов Республики Таджикистан

Интервалы статистических значений энергопотребления, в кВт·ч.	Лингвистическая переменная, качественно описывающая интервал количественных значений
Зимой	
От 2100 до 2800	Эффективные
От 2800 до 2850	Условно эффективное
Выше 2850	Неэффективное

Зафиксируем множество значений от (2100-2800) электропотребления в регионе зимой, обозначив его множество через X .

Посредством задания функции принадлежности $\mu_Y: X \rightarrow [0,1]$ сформируем множество Y . Значение $\mu_Y(x)$ есть число, лежащее между 0 и 1, показывающее степень принадлежности элемента X к нечёткому множеству Y . Равенство $\mu_Y(x) = 1$ означает, что x точно принадлежит множеству Y ; равенство $\mu_Y(x) = 0$ говорит о том, что x точно не принадлежит множеству Y . При этом множество Y нечеткое и нормированное, поскольку существует элемент x , что $\mu_Y(x) = 1$.

В связи с тем, что множество $X=R$ – множество нечётких вещественных чисел, то в целях удобства практических вычислений представим его несимметричным трапециевидным, с функцией принадлежности, задаваемой формулой, включающей четверку чисел – границ частотных интервалов (a, b, c, d), где: $a=2100$ кВт·ч.; $b=2458$ кВт·ч.; $c=2463$ кВт·ч.; $d = 2850$ кВт·ч.

Следует определить наиболее вероятное значение электропотребления, отклонение от которого может служить сигналом к фокусировке особого внимания эксперта-оператора. Это может быть среднее арифметическое значение электропотребления, равное 2463 кВт·ч, полученное как результат абстрактных вычислений.

Но если рассматривать электропотребления как нечеткое число, то мы свяжем с этим числом (2100; 2458; 2463; 2850) кВт·ч., величину $E(Y)$ – математическое ожидание, возможностную характеристику электропотребления зимой, определим по формуле 1.

$$E(Y) = \frac{a + 2b + 2c + d}{6} \quad (1)$$

По формуле 1 была определена величина математического ожидания, характеризующего электропотребление зимой, которая составила $E(Y) = 2458$ кВт·ч.

Это значение может быть позиционировано как центр тяжести, оптимальное среднее на указанном интервале времени, отклонение от которого с дисперсией $\text{Var}(Y)$, найденной по формуле 2:

$$\text{Var}(Y) = \frac{\sqrt{((d-a)^2 + 2(d-a)(c-b) + 3(c-d)^2)}}{24} \quad (2)$$

Подставив значения в формулу 2 получим

$$\text{Var}(Y) = 562500 + 1050000 + 1470000 = \sqrt{107344} = 300$$

Полученное значение дает основание для принятия решений, корректирующих текущий энергорежим, в соответствии с концепцией энергогенерирующей и поставляющей электроэнергию компанией. То есть значение электропотребления 2158 кВт·ч. и 2758 кВт·ч. являются границами интервала размытости. Нечеткое число электропотребления принимает вид симметричной трапеции (рис. 1).



Рис. 1 – Нечеткое число энергопотребления в виде симметричной трапеции

Выход за границы требует корректировки режима.

Аналогичные рассуждения, обращения возможно применить и для других сезонов года. Результаты расчёта центра тяжести и интервала размытости для зимнего сезона приведём в табл. 2.

Таблица 2 – Центр тяжести и интервал размытости для зимнего сезона

Время года	Центра тяжести	Дисперсия	Левый интервал размытости	Правый интервал размытости
Зима	2458	300	2100-2158	2758-2850

Возможностный подход даёт средство и для оценки нечётких условий-ограничений. В рамках возможностного подхода нечетких множеств проанализируем ограничения, которые используются при решении задач формирования плана развития энергосистемы. Для этого нужно сравнить количество электропотребления A с имеющимися энергомощностями в рамках условия ограничения B .

Пусть A (2100, 2158, 2758, 2850) кВт·ч. – нечёткое число энергопотребления зимой в 9 городах Республики Таджикистан, где: $a_1=2100$ кВт·ч.; $a_2=2158$ кВт·ч.; $a_3=2758$ кВт·ч.; $a_4=2850$ кВт·ч., B (0,0, b_3 , 3000) – трапециевидное нечеткое число B (b_1, b_2, b_3, b_4) – условие ограничения, представляющее интегральный показатель ограничения энергопотребления, зависящее от многих технических факторов (мощности генератора, пропускной способности сети, оперативной обстановки в общей системе) и экономических факторов, в котором b_3 – нечёткое число, наиболее вероятное значение энергопотребления, фиксируемое в документах генерирующей компании экспертом-стратегом и поставщика как основание решений эксперта-оператора, $a=3000$ – максимально возможное значение генерации и поставки энергии, интегральный показатель, обусловленный технико-экономическими характеристиками.

Зафиксируем некоторый уровень надежности решений оператора о необходимости коррекции экспертом-оператором текущего энергорежима, а экспертом-стратегом плана развития системы γ , $0 < \gamma < 1$. Будем считать, что число A удовлетворяет ограничению B с уровнем надежности $\gamma=0,9$, если выполнено соотношение $\text{Pos}(A \in B) < 1 - \gamma$. Число $N_A(B)$ – назовем степенью удовлетворения числа A условию B . Это условие эквивалентно следующему неравенству:

$$N_A(B) \equiv \min \max(1 - \mu_A(y), \mu_B(y)) > \gamma \quad (3)$$

Условие надежности решений оператора $N_A(B) \geq \gamma$ эквивалентно следующему неравенству [4]:

$$(1 - \gamma) \cdot a_3 + \gamma \cdot a_4 \leq \gamma \cdot b_3 + (1 - \gamma) \cdot b_4 \quad (4)$$

Подставляя данные об энергопотреблении в неравенство зимой в регионе с уровнем надежности 0,9 решим его относительно

$$(1 - 0,9) \cdot 2758 + 0,9 \cdot 2850 \cdot a_4 \leq 0,9 \cdot b_3 + (1 - 0,9) \cdot 3000 \quad (5)$$

где: $b_3 \geq 2823,1$

Полученное значение позволяет принимать решение о коррекции текущего энергорежима при достижении значения энергопотребления 2823,1 кВт·ч, а не 3000 кВт·ч., что усиливает аварийность системы.

Таким образом, эксперт-оператор получает более гибкие характеристики значений, ограничивающих электропотребления, позволяющих принимать оперативные управленческие решения, адекватные мышлению человека-эксперта.

Появление нечётких множеств позволило сделать процедуру перехода от балльной шкалы оценки качества планов развития системы региона к числовой более гибкой. Базовой характеристикой в построении планов развития региона является электропотребления (сезонное и годовое). Учет данных ведется непрерывно, он подвергается статистической обработке, осуществляется прогнозирование его значений. Уже в сложившейся методике прогнозирования электропотребления является функцией нескольких переменных (температуры окружающего воздуха, высоты над уровнем моря, конструкция жилого дома, благосостояния населения) [5], [6]. Однако в построении планов развития системы региона, являющейся элементом более масштабной системы само энергопотребление может быть рассмотрено как независимая величина, обуславливающая функцию качества плана развития энергосистемы региона. При разработке, корректировке и оценивании плана развития энергосистемы рассматривается не только количественные показатели электропотребления, экономическая рентабельность и др., но и качественные.

Для ее нахождения наряду с числовыми показателями используются качественные показатели. Для анализа качественных показателей плана развития экспертами была разработана 3-балльная интегративная шкала оценок социальных (удовлетворенность потребителя и соответствие стратегическим целям компании), экологических (экологический эффект от развития энергосистемы региона), технико-экономических критериев энергопотребления (пропускная способность, согласованность с работой систем других регионов, экономическая привлекательность): «неэффективно», «условно эффективно», «эффективно».

В табл. 3 приведен показатель соответствия энергопотребления концепции компании.

Таблица 3 – Показатель соответствия энергопотребления концепции компании

Концепции компании	Балл	Лингвистическая переменная
Значение энергопотребления 2158-2758, степень соответствия концепции компании 0,9	3	эффективный режим
2100-2158 степень соответствия концепции компании 0,55-0,9	2	условно эффективный режим
2758-2823,1 степень соответствия концепции компании 0-0,55	1	неэффективный
Показатель удовлетворенности потребителя текущим состоянием развития энергосистемы региона		
70% опрошенных потребителей и выше удовлетворены	3	эффективно
55%-69% опрошенных потребителей удовлетворены	2	условно эффективно
От 0 до 55 % опрошенных потребителей удовлетворены	1	неэффективно

Если $A = a_1 a_2 a_3 a_4$ – это $(A(0, 0,55, 0,9, 1))$ – нечёткие значение степени соответствия показателя энергопотребления для конкретного варианта плана развития концепции компании, а возможные значения показателя для всех планов ограничены сверху числом, заявленным в концепции компании – 1 (соответствует 3000 кВт·ч), то после нормировки показатель проекта будет равен $N_1(0,7, 0,72, 0,92, 0,95)$.

Нечеткое число значений показателя удовлетворенность потребителя, в процентах $X = (0; 0,55; 0,7; 1)$, при этом возможное значение показателя для всех планов ограничено сверху 100%. После нормировки показатель проекта $N_2=X$.

4. На четвертом этапе необходимо интегрировать нечёткие оценки с заданными весами и получить обобщенную оценку.

$$K=(0,6 \cdot 0+0,3 \cdot 0+0,1 \cdot 1+0,6 \cdot 0,55+0,3 \cdot 0,55+0,1 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 0,9+0,3 \cdot 0,7+0,1 \cdot 0,25; 0,6 \cdot 1+0,3 \cdot 0,9+0,1 \cdot 0)$$

Итак, общая качественная оценка плана $K=(0,1; 0,6; 0,78; 0,87)$.

В дальнейшем балльная шкала соотносится с числовой. Каждому из баллов поставим в соответствие трапециевидное нечёткое число в соответствии с табл. 4. Это число будет считаться нечёткой оценкой показателя.

Таблица 4 – Нечёткая оценка показателя

Балл	0,78-0,87	0,6-0,78	(0,1-0,6)
Оценка	Эффективно	Условно эффективно	Неэффективно

Числовые значения, полученные по сезонному показателю одного года интегрируются в один числовой показатель 3-2-1, которому ставится в соответствие лингвистическая переменная «эффективно», «условно эффективно», «неэффективно».

Такая методика позволяет совместить в оценке качества плана развития энергосистемы региона количественные и качественные показатели и принимать своевременные, и даже опережающие управленческие решения по корректировке стратегии и тактики управления энергосистемой региона.

Выводы

1. По статистическим данным электропотребления за предыдущий период предложена лингвистическая переменная, качественно описывающая интервал количественных значений электропотребления в зимний период времени крупных городов Республики Таджикистан.

2. Полученные интервалы статистических значений электропотребления позволили предложить величину математических ожиданий, возможностную характеристику электропотребления зимой.

3. Выведенные числовые значения (числовой показатель 3-2-1) позволяют оценивать качества плана развития энергосистемы Республики Таджикистан. Данные показатели соответствуют предлагаемым лингвистическим переменам (эффективный режим, условно эффективный режим, неэффективный) поддержанием которых решает поставленную задачу.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Cengiz K. Capital budgeting techniques using discounted fuzzy versus probabilistic cash flows /K. Cengiz, R. Da, T. Ethem // Information Sciences. – 2002. – Vol. 142. – Iss. 1-4. – Pp. 57–76. DOI:org/10.1016/S0020-0255(02)00157-3.
2. Taliento M. Corporate Valuation: Looking Beyond the Forecast Period Through New Fuzzy Lenses /M. Taliento // IEEE Transactions on Engineering Management. – 2021. – Vol. 68. – №. 2. – Pp. 467–482. DOI: 10.1109/TEM.2019.2904955.
3. Appadoo S.S. Possibilistic Fuzzy Net Present Value Model and Application /S.S. Appadoo // Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – Vol. 11 – P. 20–31. DOI: 10.1155/2014/865968.
4. Saaty T.L. How to handle dependence with the analytic hierarchy process /T.L. Saaty // Mathematical Modelling. – 1987. – Vol. 9 – Iss. 3–5. – P. 369–376. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90494-5.
5. Sidorov A.I. Method for forecasting electric consumption for household users in the conditions of the Republic of Tajikistan /A.I. Sidorov, S.S. Tavarov // International Journal of Sustainable Development and Planning. – 2020. – Vol. 15. – №. 4. – Pp. 569–574. DOI: 10.18280/ijdsdp.150417.
6. Tavarov S.S. Improving energy efficiency by household consumers in the Republic of Tajikistan based on the developed forecasting method /S.S.Tavarov, A.I. Sidorov // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2020. – Vol. 15. – №. 6. – Pp. 829-834. DOI: 10.18280/ijdsdp.150608.
7. Vojtovic S. The impact of socio-economic indicators on sustainable consumption of domestic electricity in Lithuania / S. Vojtovic, A. Stundziene, R. Kontautiene // Sustainability. – 2018. – № 10(2): 162. DOI: 10.3390/su10020162.
8. Da-Yong C. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP /C. Da-Yong // European Journal of Operational Research. – 1996. – Vol. 95. – Is. 3. – P. 649–655. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00300-2.
9. Abdallah S.B. Fuzzy Volatility Effect on Major Projects Timing /S.B. Abdallah, I. Kouatli // IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). – 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2018.8491567.
10. Talebi A. Online fuzzy control of HVAC systems considering demand response and users' comfort /A. Talebi, A. Hatami // Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy. – 2020. – Vol.15. – Is.7–9. – P. 403–422.
11. Kim Y. Optimal Investment Timing with Investment Propensity Using Fuzzy Real Options Valuation /Y. Kim, E.B. Lee // Int. J. Fuzzy Syst. – 2018. – Vol. 20. – P.1888–1900. DOI: 10.1007/s40815-018-0493-4.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.016>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ СПЛАВОВ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ, АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ SiC ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ

Научная статья

Ленковец А.С.¹, Олешко А.Ю.², Галанцев А.П.³, Тронза Е.И.⁴, Тюрин С.А.^{5,*}, Юдин Г.А.⁶, Дальская Г.Ю.⁷
⁵ ORCID:0000-0002-6671-1337;

^{1, 2, 3} АО «Композит», Королев, Россия;

^{4, 5, 6, 7} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (tyurina_s[at]mirea.ru)

Аннотация

Ресурс высокотемпературной прочности традиционно применяемых материалов в ракетно-космической технике на основе алюминиевых и титановых сплавов практически исчерпан. Рабочая температура большинства алюминиевых сплавов не превышает 200-300 °С, а титановых 400-600 °С, что не соответствует современным условиям эксплуатации современных космических аппаратов (КА).

Для обеспечения требуемых значений прочностных характеристик применяемых деталей в условиях высоких температур и динамических нагрузок, как правило применяются жаростойкие сплавы на основе никеля, ниобия, молибдена и др., что приводит к значительному повышению массы изделий и, как следствие, снижению масса-габаритных характеристик КА. Существенный прирост прочностных свойств может быть достигнут армированием металлов и их сплавов высокомодульными волокнами карбида кремния (SiC), в результате чего решается задача повышения жесткости и сопротивления высокотемпературной ползучести, одновременно с этим обеспечивается снижение плотности материала за счет более легкого армирующего волокна.

Работа посвящена изучению влияния плазменного напыления матричного сплава на прочностные свойства не металлических волокон в процессе получения полуфабриката для дальнейшего использования при изготовлении композиционного материала.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, титановый сплав, волокна, карбид кремния, прочность, плазменное напыление, металлокомпозит, прочность, микроструктура.

STUDY OF THE INFLUENCE OF PLASMA COATING PROCESS OF TITANIUM AND ALUMINIUM ALLOYS ON THE ENDURANCE PROPERTIES OF RAW MATERIALS REINFORCED WITH FIBER SiC IN THE PRODUCTION OF PERSPECTIVE METAL COMPOSITES.

Research article

Lenkovec A.S.¹, Oleshko A.YU.², Galancev A.P.³, Tronza E.I.⁴, Tyurina S.A.^{5,*}, Yudin G.A.⁶, Dal'skaya G.YU.⁷
⁵ ORCID:0000-0002-6671-1337;

^{1, 2, 3} Stock company «Kompozit», Korolyov, Russia;

^{4, 5, 6, 7} Russian Technological University MIREA, Moscow, Russia

* Corresponding author (tyurina_s[at]mirea.ru)

Abstract

The service life of high-temperature strength of materials traditionally used materials in rocket and space equipment, based on aluminum and titanium alloys, is almost exhausted. The working temperature of most aluminum alloys is below 200-300 °С, and titanium ones – below 400-600 °С, which does not comply with the modern conditions of modern space vehicle (SV) operations.

Heat-resistant alloys based on nickel, niobium, molybdenum, etc., are generally used to ensure the required strength of the parts used in high temperatures and dynamic loads, which leads to a significant increase in the mass of the components and, as a result, to a decrease in the mass and overall characteristics of the SV. The significant increase in mechanical properties can be achieved through reinforcement of metals and their alloys with high-modulus silicon carbide fibers (SiC), thus solving the problem of increasing the strength and resistance to high-temperature creep, at the same time reducing material density with lighter reinforcing fibre.

The article is dedicated to studying the influence of matrix alloy plasma coating on the mechanical properties of non-metal fibers in the process of raw material production for further use in the composite material manufacture.

Keywords: Aluminium alloy, titanium alloy, fibres, silicone carbide, strength, plasma coating, metal composite, microstructure.

Введение

Для обеспечения требуемых значений прочностных характеристик применяемых деталей в условиях высоких температур и динамических нагрузок, как правило применяются жаростойкие сплавы на основе никеля, ниобия, молибдена и др., что приводит к значительному повышению массы изделий и, как следствие, снижению масса-габаритных характеристик КА. Существенный прирост прочностных свойств может быть достигнут армированием металлов и их сплавов высокомодульными волокнами карбида кремния (SiC), в результате чего решается задача повышения жесткости и сопротивления высокотемпературной ползучести, одновременно с этим обеспечивается снижение плотности материала за счет более легкого армирующего волокна.

При изготовлении изделий и заготовок из композиционных материалов, армированных неметаллическими волокнами, большое значение уделяется технологиям их изготовления, которая напрямую зависит от геометрической

формы изделия [1], [2], [3], [4]. Помимо геометрической формы, технология оказывает существенное влияние на прочностные характеристики материала. Поэтому исследование технологических параметров на каждой операции, влияющих на конечные прочностные свойства, являются одними из ключевых факторов при разработке новых металлокомпозитов.

Основная часть

Одной из наиболее широко распространённых технологий по изготовлению осесимметричных заготовок из волокнистых композиционных материалов состоит из следующих основных операций:

- намотка не металлического волокна на цилиндрическую оснастку;
- плазменное напыление матричного материала на технологическую оснастку с намотанным волокном для получения полуфабриката в виде ленты;
- сборка полуфабрикатов на специальную оснастку для прессования;
- проведение горячего изостатического прессования;
- удаление специальной оснастки для прессования;
- проведение механической обработки для обеспечения необходимых геометрических размеров.

На сегодняшний день подобная технология реализована в опытно-промышленном производстве силовых элементов из композиционного материала на основе сплава алюминия, армированного непрерывными волокнами бора. Подобные силовые элементы имеют широкое применение в ракетно-космической и авиационной технике.

Ранее [5] установлено, что при реализации данной технологии существуют операции, которые оказывают существенное влияние на прочность композиционного материала. Показано, что это операция плазменного напыления матрицы и операция горячего изостатического прессования. Поэтому при разработке и дальнейшем изготовлении новых перспективных материалов на основе волокон карбида кремния, необходимо исследовать физические процессы, влияющие на конечные прочностные свойства металлокомпозита.

В рамках данной работы будут рассмотрены основные технологические параметры плазменного напыления алюминиевой и титановой матриц, влияющие на прочностные свойства карбидкремниевых волокон. На рис. 1 показана схема плазменного напыления материалов матриц на технологическую оснастку с намотанным волокном.

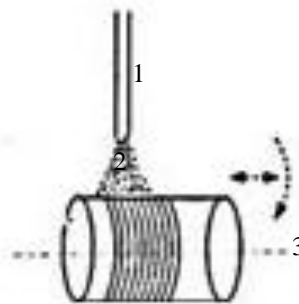


Рис. 1 – Технологическая схема плазменного напыления материала матрицы:
1 – плазматрон; 2 – материал матрицы; 3 – технологическая оснастка с намотанным волокном

Процесс плазменного напыления в общем виде заключается в подаче напыляемого материала в плазматрон для его расплавления и дальнейшего переноса в виде отдельных частиц с последующим налипанием их на подложку. В работе [6] более подробно описаны процессы плазменного напыления. Исходными материалами для плазменного напыления, в зависимости от конструкции плазматронов, могут быть как проволока, так и порошковые материалы.

Поскольку процесс формирования покрытий при плазменном напылении обеспечивается послойным налипанием расплавленных частиц, то соответственно идет воздействие на подложку как тепловое, так и ударное (механическое). На температуру осаждаемых частиц в большей степени влияет мощность используемого плазматрона. Она в свою очередь выбирается из следующего основного условия – обеспечение проплавления напыляемого материала и одновременно недопущение значительного перегрева частиц, так как при перегретых частицах не будет происходить их послойное налипание. Таким образом процесс напыления будет сопровождаться сильным перегревом подложки и неравномерным по толщине процессом напыления покрытий вследствие растекания перегретых частиц. Поэтому для каждого отдельного сплава экспериментально выбирается диапазон мощности плазматрона, который обеспечивает одновременное проплавление и не перегревает частицы напыляемого материала [7], [8], [9].

Наиболее важным технологическим параметром при плазменном напылении является дистанция напыления от плазматрона до подложки. Дистанция значительно влияет как температуру частиц, так и на скорость, с которой они ударяются о поверхность подложки. Таким образом, варьируя дистанцией плазменного напыления, возможно управлять сразу двумя технологическими факторами. Чем меньше дистанция напыления, тем больше тепловое и механическое воздействие и, следовательно, чем больше дистанция, тем меньше подобное взаимодействие частиц на подложку [10], [11].

Для исследования влияния процесса напыления сравнивались значения прочности волокон карбида кремния после плазменного напыления со значениями прочности до напыления. Испытания по определению прочности на растяжение проводились на испытательной машине Instron 5900. Для набора необходимых статистических данных по измерению прочности брали не менее 12 образцов исходных волокон карбида кремния (рис. 2).

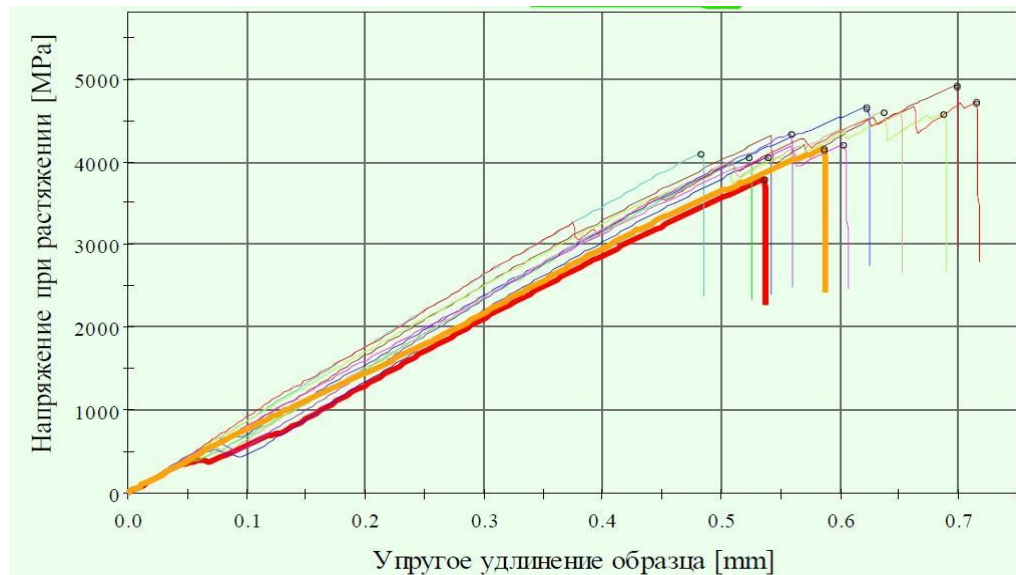


Рис. 2 – Зависимость упругого удлинения образцов волокон карбида кремния от растягивающего напряжения

Усредненное значение предела прочности исходных волокон составило порядка 4350 МПа. Из графика видно, что минимальное значение растягивающего напряжения составило порядка 3800 МПа, а максимальная 4900 МПа. Основные точки располагаются в диапазоне значений от 4000 МПа до 4600 МПа, что свидетельствует о достаточно узком диапазоне полученных значений.

Эксперименты по нанесению алюминиевой и титановой матриц осуществлялись на плазменной установке УПУ-3Д. Определены оптимальные значения мощности плазматрона установки для алюминиевой и титановой матриц, которая составила 4 и 6 кВт соответственно. Для сплава алюминия дистанция варьировалась от 100 до 110 мм, а для сплава титана от 100 до 155 мм. После проведения процесса плазменного напыления алюминиевых и титановых матриц волокна карбида кремния вручную извлекались из полученного полуфабриката и проводились испытания по определению растягивающих напряжений. Для набора необходимой статистики испытывали по 12 волокон для каждой дистанции плазменного напыления с шагом в 5 мм и бралось среднее значение. По результатам измерений растягивающих напряжений построена зависимость (рисунок 3) изменения остаточной прочности волокон карбида кремния после процесса плазменного напыления алюминиевой и титановой матриц. Как видно из графика, для сплава алюминия (АМг6) оптимальной дистанцией напыления является 110 мм. При данной дистанции идет увеличение среднего значения растягивающего напряжения (прочности) по сравнению с исходным на 8,5 %. Обратный эффект можно наблюдать после напыления сплава титана ВТ1-0. При дистанции плазменного напыления 110 мм идет значительное снижение прочности по сравнению с исходной. При увеличении дистанции напыления значение прочности увеличивается и при 155 мм достигает оптимального значения порядка 4180 МПа.

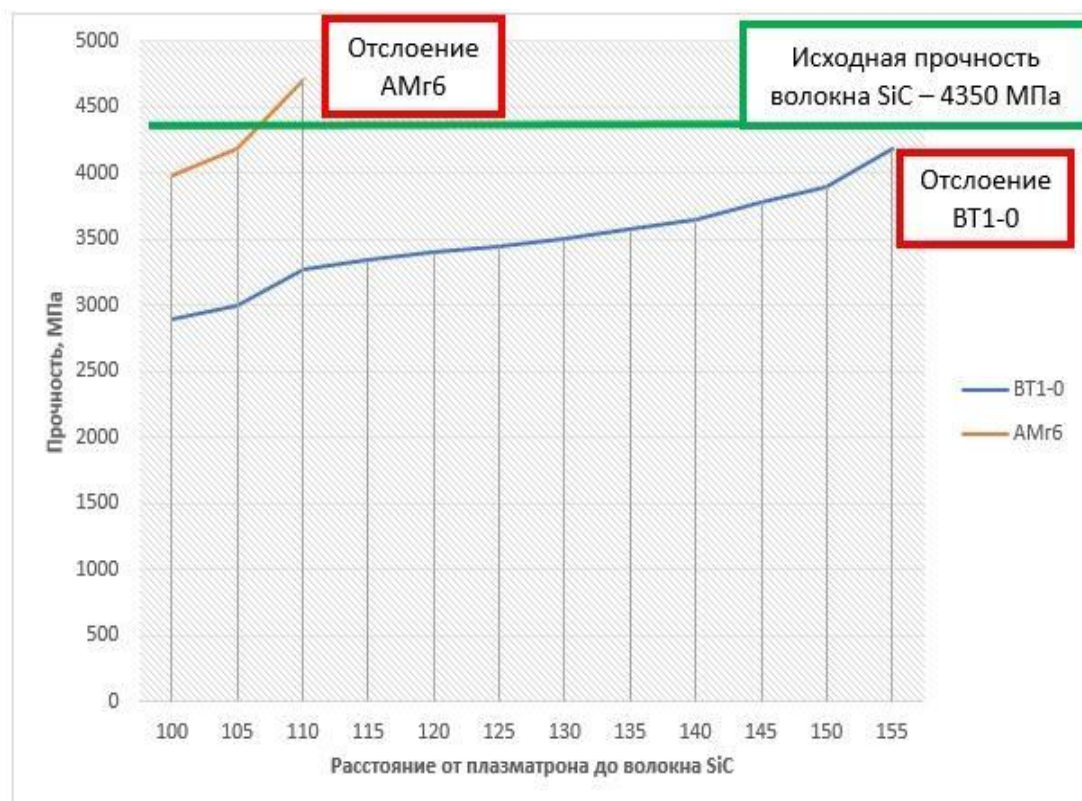


Рис. 3 – Зависимость остаточной прочности волокна SiC от дистанции напыления для сплавов алюминия и титана

Дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к отслоению сплава титана, что говорит о снижении кинетической энергии напыляемых частиц и их остывании. Таким образом видно, что в зависимости от напыляемого материала значительно изменяются остаточная прочность. Поэтому установление факторов, влияющих на это изменение прочности, является определяющим при операции изготовления полуфабрикатов.

Как говорилось ранее, при плазменном напылении важнейшим фактором является температурное и ударное (термомеханическое) воздействие напыляемых частиц на поверхность подложки, в данном случае поверхность карбидкремниевое волокна. Помимо термомеханического воздействия также возможно диффузионное взаимодействие карбидкремниевое волокна с материалами матриц.

Для оценки диффузионного взаимодействия материалов матриц с карбидкремниевым волокном исследовалась микроструктура изломов полученных полуфабрикатов в виде лент (рисунок 4), нанесенных по режимам для алюминиевого сплава с дистанцией 110 мм, для титанового сплава 155 мм. На рисунке 4а показана структура исходного волокна карбида кремния. Съемка проводилась с торца излома. Видно, что волокно состоит из центральной части (керна), основной части (карбид кремния) и наружного покрытия толщиной 1-2 мкм. На рисунке 4б отчетливо видно, что структура волокна не нарушена, сохраняются четкие границы как внутри волокна, так и на границе раздела волокно-матрица, а в некоторых зонах присутствует отслоения, которые связаны, скорее всего, с подготовкой торца излома. Структура алюминиевого сплава является типичной для быстро закаленного материала после плазменного напыления. Аналогичная картина наблюдается также с напыленным титановым сплавом ВТ1-0.

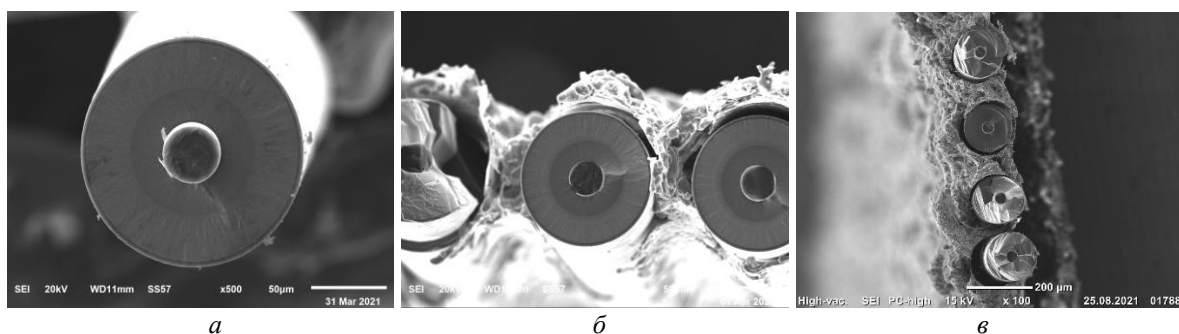


Рис. 4 – Микроструктуры исследуемых образцов:
а – микроструктура исходного волокна; б – полуфабрикат в виде ленты с матрицей АМг6;
в – полуфабрикат в виде ленты из титанового сплава

Таким образом, можно сделать заключение, что при плазменном напылении не происходит диффузионного взаимодействия волокна карбида кремния с исследуемыми материалами матриц. Также не изменяется структура исследуемого волокна карбида кремния.

Заключение

В работе показано, что одной из основных операций, влияющих на конечную прочность металлокомпозитов, армированных волокнами карбида кремния, оказывается технологическая операция плазменного напыления. Экспериментально получены зависимости остаточной прочности волокна карбида кремния от дистанции плазменного напыления. При этом для сплава АМг6 характерно увеличение прочности, а для титанового сплава ВТ1-0 ее снижение. Исследования микроструктуры показали, что после плазменного напыления не происходит диффузионного взаимодействия волокна карбида кремния с материалами матриц. Исходя из полученных результатов можно сделать предположение, что на остаточную прочность волокна карбида кремния наибольшее влияние оказывает термомеханическое воздействие при напылении. Также стоит отметить возможное влияние модуля упругости конкретных сплавов при напылении, так как они значительно отличаются у выбранных материалов. Для подтверждения предположений планируется в дальнейших работах провести более детальные исследования как поверхности волокон, так и влияния плазменного напыления других перспективных матриц на основе никеля, ниобия и др. на остаточную прочность волокна карбида кремния.

Данные исследования являются фундаментальными при разработке новых композиционных материалов с уникальными физическими характеристиками, которые позволят в свою очередь значительно улучшить тактико-технические характеристики космических и летательных аппаратов.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Пат. № CN106544604. Способ изготовления и устройство для армированного волокном металлического композита. МПК C22C47/18, C22C49/06, C22C49/14 / патентообладатель huaihai inst technology. – опубл. 2017.03.29.
2. Пат. № US5400505. Способ изготовления армированных волокном комплектующих энергетических установок. МПК – B22P 15/00 / патентообладатель MTU Motoren – and Tirbinen – Unoin München GmbH. – опубл. 03.28.1995
3. Пат. № US6698645. Способ изготовления металлических элементов, армированных волокном МПК – B21D 39/00 / патентообладатель MTU Aero Engines GmbH. – опубл. 03.02.2004
4. Изотова А.Ю. Композиционные материалы на основе титана, армированные волокнами / А.Ю. Изотова, О.И. Гришина, А.А. Шавнев // Труды ВИАМ. – № 5(53). – 2017 – С. 42–49.

5. Олешко, А. Ю. Управление качеством процесса изготовления боралюминиевых трубчатых элементов / А.Ю. Олешко // Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сборник статей по материалам участников V ежегодной научной конференции (аспирантов ФТА). – Королев, 2014. – С. 381–386.
6. Газотермическое напыление: учеб. пособие / под общей ред. Л.Х. Балдаева. – Москва : Маркет ДС, 2007. – 344 с.
7. Yamazakia Y. Relationship between the mechanical properties and structure of a suspension plasma-sprayed thermal barrier coating with columnar microstructure / Y. Yasuhiro, M. Masahiro, H. Tatsuya et al. // *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 439. – 2022. – 128430.
8. Pature N.P. TBCs for gas-turbine engine applications / N.P. Pature, M. Gell, E.H. Jordan // *Science*. – 2002. – № 296. – Pp. 280–284.
9. Ganvir A. Characterization of microstructure and thermal properties of YSZ coatings obtained by axial suspension plasma spraying (ASPS) / A. Ganvir, N. Curry, S. Björklund et al. // *Therm. Spray Technol.* – 2015. – № 24. – Pp. 1195–1204.
10. Yamazaki Y. Improved thermal fatigue resistance in thermal barrier coatings via suspension plasma spray technique / Y. Yamazaki, S. Matsuura, T. Hamaguchi et al // *Mater. Lett.* – 2020. – № 280. – 128608.
11. Shinozaki M. A methodology, based on sintering-induced stiffening, for prediction of the spallation lifetime of plasma-sprayed coatings / M. Shinozaki, T.W. Clyne // *Acta Mater.* – 2013. – № 61. – Pp. 579–588.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pat. № CN106544604. Sposob izgotovleniya i ustrojstvo dlya armirovannogo voloknom metallichesкого kompozita [Manufacturing method and device for a fibre reinforced metal composite]. МПК C22C47/18, C22C49/06, C22C49/14 / the patentee huaihai inst technology. – publ. 2017/03/29. [in Russian]
2. Pat. № US5400505. Sposob izgotovleniya armirovannyh voloknom komplektuyushchih energeticheskikh ustanovok [Method for manufacturing power plant components reinforced with fibre]. IPC – B22P 15/00 / the patentee MTU Motoren – and Turbinen – Unoin München GmbH. – publ. 03/28/1995 [in Russian]
3. Pat. № US6698645. Sposob izgotovleniya metallichesких elementov, armirovannyh voloknom [Method for manufacturing metal elements reinforced with fibre] / the patentee IPC – B21D 39/00. MTU Aero Engines GmbH. – publ. 03/02/2004 [in Russian]
4. Izotova A.Y. Kompozicionnye materialy na osnove titana, armirovannye voloknami [Titanium-based composite materials reinforced with fibre] / A.Y. Izotova, O.I. Grishina, A.A. SHavnev // *Trudy VIAM [Collection of VIAM]*. – 2017. – № 5(53). – Pp. 42–49. [in Russian]
5. Oleshko, A.Y. Upravlenie kachestvom processa izgotovleniya boralyuminievyh trubchatyh elementov [Quality management of boron aluminum tubulous elements manufacturing process] / A.Y. Oleshko // *Innovacionnye aspekty social'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona: sbornik statej po materialam uchastnikov V ezhegodnoj nauchnoj konferencii [Innovative aspects of social and economic development of the region: collection of papers on materials of V annual scientific conference]*. – Korolyov, 2014. – Pp. 381–386. [in Russian]
6. Gazotermicheskoe napylenie: ucheb. posobie [Thermal spraying: study guide] / edited by L.C. Baldaev. — Moscow : Market DS publishing house, 2007. – 344 p. [in Russian]
7. Yamazakia Y. Relationship between the mechanical properties and structure of a suspension plasma-sprayed thermal barrier coating with columnar microstructure / Y. Yasuhiro, M. Masahiro, H. Tatsuya et al. // *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 439. – 2022. – 128430.
8. Pature N.P. TBCs for gas-turbine engine applications / N.P. Pature, M. Gell, E.H. Jordan // *Science*. – 2002. – № 296. – Pp. 280–284.
9. Ganvir A. Characterization of microstructure and thermal properties of YSZ coatings obtained by axial suspension plasma spraying (ASPS) / A. Ganvir, N. Curry, S. Björklund et al. // *Therm. Spray Technol.* – 2015. – № 24. – Pp. 1195–1204.
10. Yamazaki Y. Improved thermal fatigue resistance in thermal barrier coatings via suspension plasma spray technique / Y. Yamazaki, S. Matsuura, T. Hamaguchi et al // *Mater. Lett.* – 2020. – № 280. – 128608.
11. Shinozaki M. A methodology, based on sintering-induced stiffening, for prediction of the spallation lifetime of plasma-sprayed coatings / M. Shinozaki, T.W. Clyne // *Acta Mater.* – 2013. – № 61. – Pp. 579–588.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.017>

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА

Научная статья

Тронза Е.И.¹, Тюринна С.А.^{2,*}, Дальская Г.Ю.³, Юдин Г.А.⁴

² ORCID:0000-0002-6671-1337;

^{1, 2, 3, 4} МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (tyurina_s[at]mirea.ru)

Аннотация

Работа посвящена изучению возможности использования отходов, образующихся при производстве базальтового волокна, в качестве армирующего компонента для композиционных материалов на основе бетона.

Базальт представляет собой широко распространенную горную породу, из которой изготавливаются базальтовые волокна, обладающие химической устойчивостью, негорючестью, хорошими электроизоляционными свойствами, высокой механической прочностью. В настоящее время технология получения базальтовых волокон стала доступна широкому кругу отечественных производителей и вызывает большой интерес к развитию данного производства, которое, к сожалению, сопровождается образованием значительного количества отходов, требующих утилизации.

В ходе проведенной научно-исследовательской работы, показано, что армирование опытных образцов базальтовым волокном в сочетании с выдержкой их в камере с постоянной влажностью позволяет улучшить комплекс механических свойств материала.

Ключевые слова: базальтовое волокно, портландцемент, полифракционный песок, предел прочности на растяжение при изгибе, предел прочности при сжатии, относительная деформация при сжатии, модуль деформации.

RESEARCH OF CEMENT-BASED COMPOSITE MATERIAL

Research article

Tronza E.I.¹, Tyurina S.A.^{2,*}, Dal'skaya G.YU.³, Yudin G.A.⁴

² ORCID:0000-0002-6671-1337;

^{1, 2, 3, 4} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

* Corresponding author (tyurina_s[at]mirea.ru)

Abstract

The article is dedicated to the study of the possibility of using wastes from the production of basalt fibre as a reinforcing component for concrete-based composite materials.

Basalt is a widespread geologic material, out of which basalt fibers with chemical endurance, nonflammability, good electric insulation properties, high mechanical strength are made. Today, the technology of basalt fibres production has become available to a wide range of domestic manufacturers and is of great interest in terms of its development, which, unfortunately, is accompanied by a significant amount of waste requiring recycling.

Over the course of the research work carried out, it is shown that the reinforcement of experimental samples with basalt fiber in combination with a constant humidity chamber allows to improve the complex mechanical properties of the material.

Keywords: basalt fiber, portland cement, polyfractional sand, tensile strength, compression resistance, compression unit strain, modulus of deformation.

Введение

Одним из путей решения проблемы утилизации отходов при производстве базальтовых волокон является высокотемпературное сжигание в инсинераторах «ИЗНТЕ», представляющих собой двухкамерные печи, топливом для которых являются дизель или газ [1]. Однако более перспективным, на наш взгляд, является ресурсосберегающий метод, связанный с использованием базальтовых волокон в качестве упрочнителя для композиционных материалов [2]. При таком подходе решаются сразу две задачи:

- 1) утилизируются отходы производства базальтового волокна и изделий из него;
- 2) создается новый материал с улучшенным комплексом свойств и минимальными затратами на его изготовление.

В литературе имеются сведения о применении базальтовых волокон в качестве упрочнителя цементов [3], однако конкретных данных о влиянии характера компонентов композиционного материала и условий его изготовления на эксплуатационные свойства очень мало.

В связи с этим, целью нашего исследования явилось изучение эффективности использования именно отходов базальтового волокна в качестве армирующего компонента.

В нашей работе изучено базальтовое волокно, произведенное НПО «Стеклопластик» из базальта украинского месторождения с применением крахмального замасливателя. Средний диаметр элементарного волокна 14 мкм. Для армирования цемента применялось рубленое волокно длиной 12 мм.

В качестве матрицы использовался нормальнотвердеющий портландцемент класса прочности 32,5, (ГОСТ 31108-2016) [4] производителя ООО «Холсим (Рус) СМ» и строительный кварцевый сухой песок производства фирмы «Боларс».

Формы для экспериментальных образцов-балочек изготавливались согласно ГОСТ 30744 – 2001 [5].

Подготовленную форму устанавливали на платформу встряхивающего стола и закрепляли зажимами.

Для приготовления одного замеса цементного раствора, необходимого для изготовления пяти образцов-балочек, взвешивали 1000 г цемента, использовали одну упаковку стандартного полифракционного песка массой 3000 г и

отмеряли 550 г воды. При дальнейшем добавлении армирующего волокна определенного процентного содержания его массу отнимали от массы песка, чтобы не нарушить общую массу одного замеса.

Максимальное количество вводимого в композиционный материал упрочнителя решено было ограничить 12 % по объему, так как испытания первых трех партий показали, что при увеличении доли волокна сильно снижается модуль деформации, что далеко не всегда желательно.

Заполненную форму с образцами помещали в камеру (шкаф) влажного хранения. Через (24 ± 1) ч с момента изготовления форму с образцами вынимали из шкафа и осторожно расформовывали. Готовые образцы представлены на рисунке 1.

Таким же образом была изготовлена вторая партия образцов, которые выдерживались в камере постоянной влажности в течение 7 суток

Исследование проводилось на машине для испытания асфальтобетонных материалов ДТС-06-50. Данная машина предназначена для испытания на изгиб и сжатие асфальтобетонных смесей по методам, изложенным в ГОСТ 12801-98 [6].

Образцы с выдержкой 2 и 7 суток сравнивались по пределу прочности при изгибе, пределу прочности при сжатии, по относительным деформациям при сжатии, модулям деформации и работе на разрушение.

Все перечисленные характеристики рассчитывались по формулам, приведенным в ГОСТ 12801-98 [6]. На сжатие испытывались половинки разрушенных в результате изгиба образцов.



Рис. 1 – Готовые образцы

Результаты эксперимента представлены на рисунках 2 – 6

Очевидно, что предел прочности при изгибе возрастает при увеличении количества базальтового наполнителя (рис. 2), что закономерно.

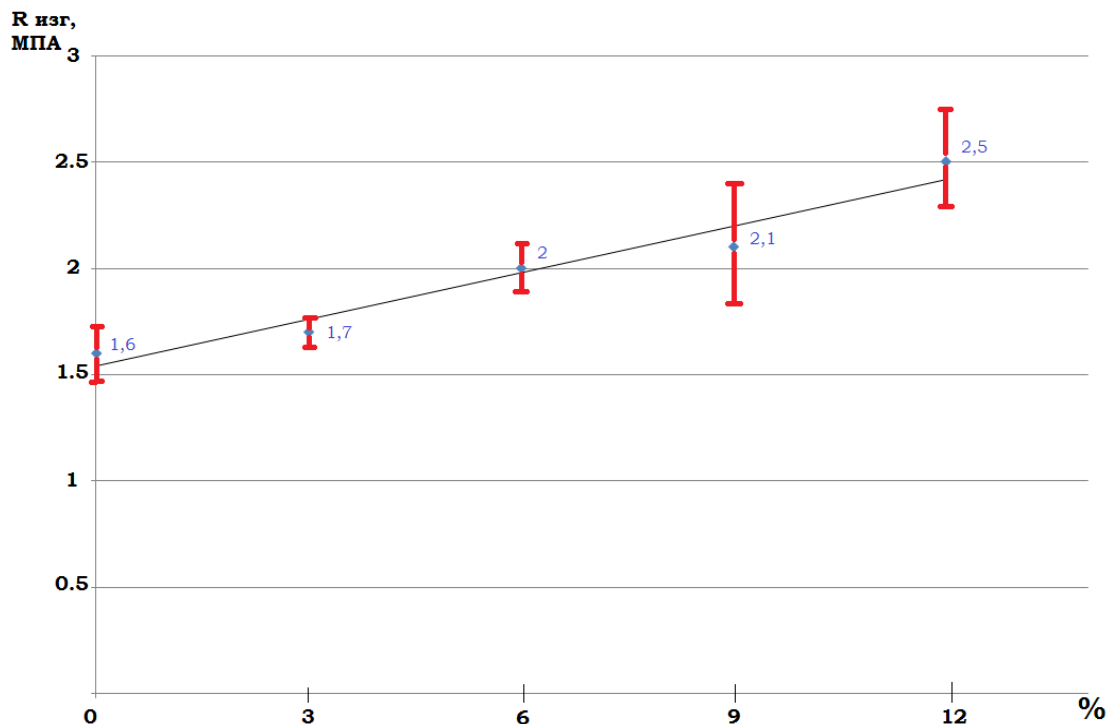


Рис. 2 – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от количества наполнителя

Из графика, приведенного на рис.3 следует, что для модуля деформации наблюдается другая тенденция: он резко уменьшается с увеличением объемной доли базальтового волокна. Это означает, что при одном и том же значении прогиба у двух разных материалов в одном возникают меньшие напряжения, а в другом, у которого модуль деформации выше, большие напряжения. Следовательно, для любого материала, который в первую очередь должен быть прочным,

так как применяется в ответственных конструкциях и должен выдержать определенные нагрузки, модуль деформации бетона должен быть как можно меньше. В противном случае можно будет с уверенностью сказать, что данный состав не нельзя применять, например, для таких конструкций как фундамент или перекрытия [7]. Тем не менее далеко не всегда следует выбирать материал с минимальным модулем деформации – все зависит от того, где конкретно он будет использоваться. Например, у асфальтового покрытия с низким модулем деформации (низкая деформативность) появляются трещины и выбоины, а с высоким – сдвиги и наплывы на покрытии. Следует отметить, что снижение модуля деформации уже при 12 % волокна по объему столь значительно, что мы сочли нецелесообразным изготовление более наполненных образцов.

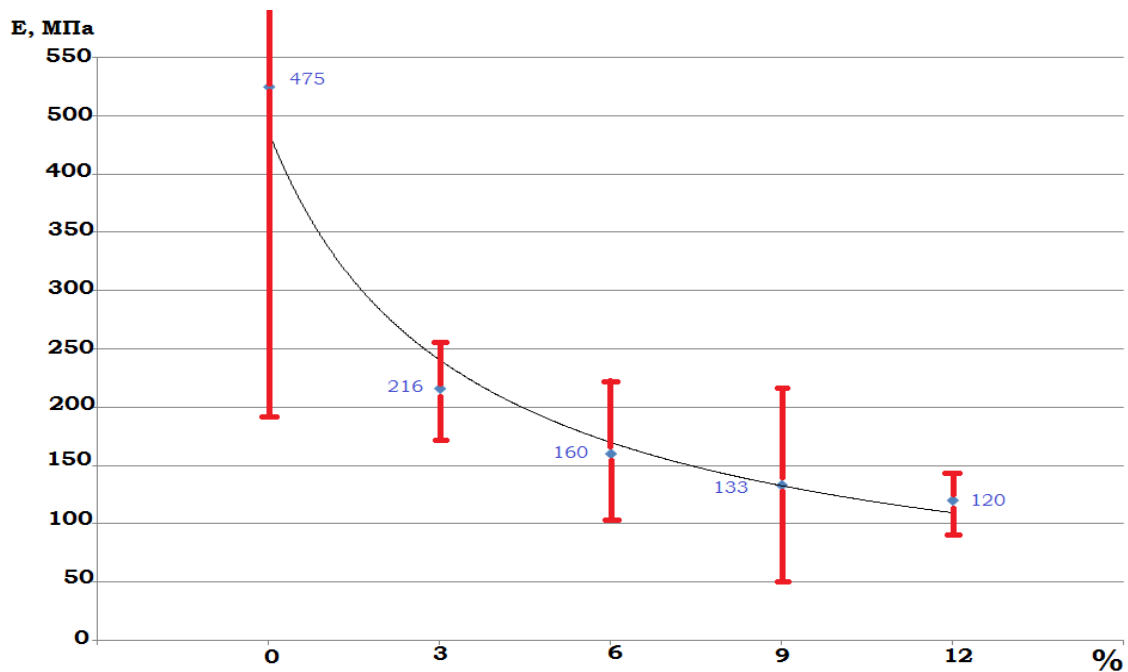


Рис. 3 – Зависимости модуля деформации от количества наполнителя

Зависимость, представленную на рис.4, показывает, что с увеличением объемной доли волокна с 9 до 12 % предельная относительная деформация растяжением несколько снижается, поэтому её можно аппроксимировать кривой с максимумом. Однако на графиках, иллюстрирующих изменение предел прочности при сжатии (рис. 5) и работы, затраченной на разрушение при сжатии (рис.6), экстремумы выражены слабо и данные зависимости вполне можно описывать линейной моделью.

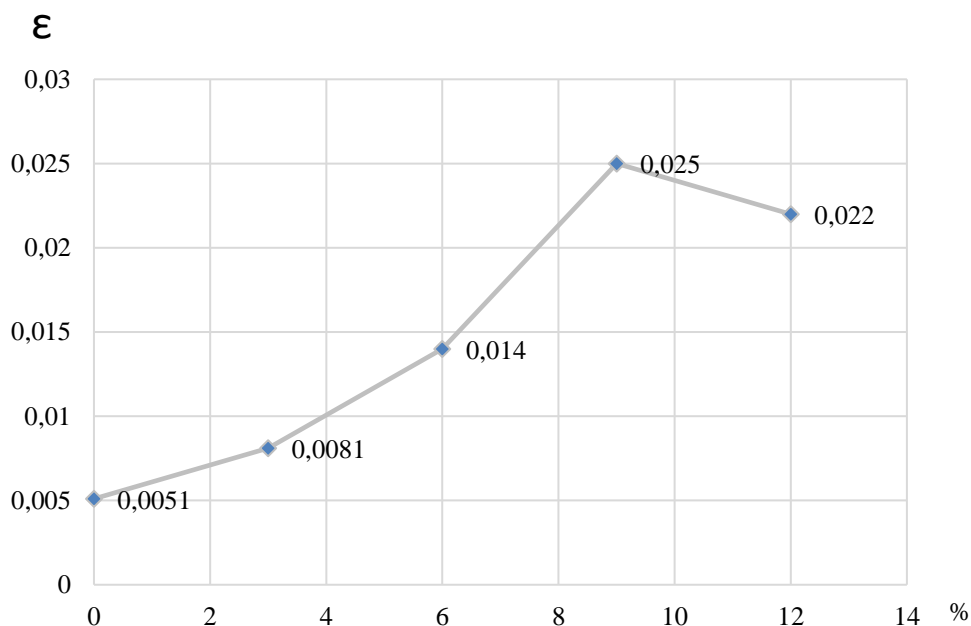


Рис. 4 – Зависимость предельной относительной деформации растяжения при изгибе от количества наполнителя

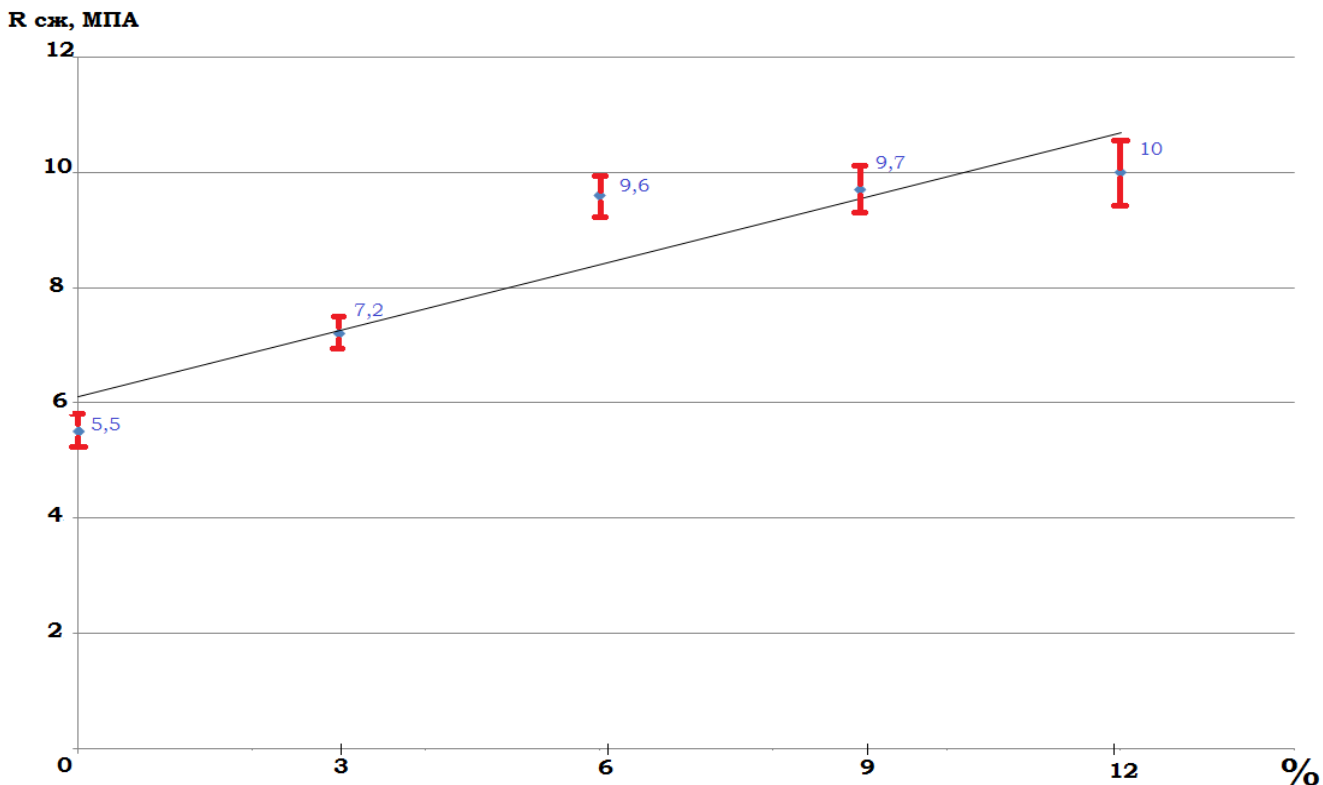


Рис. 5 – Зависимость предела прочности при сжатии от количества наполнителя

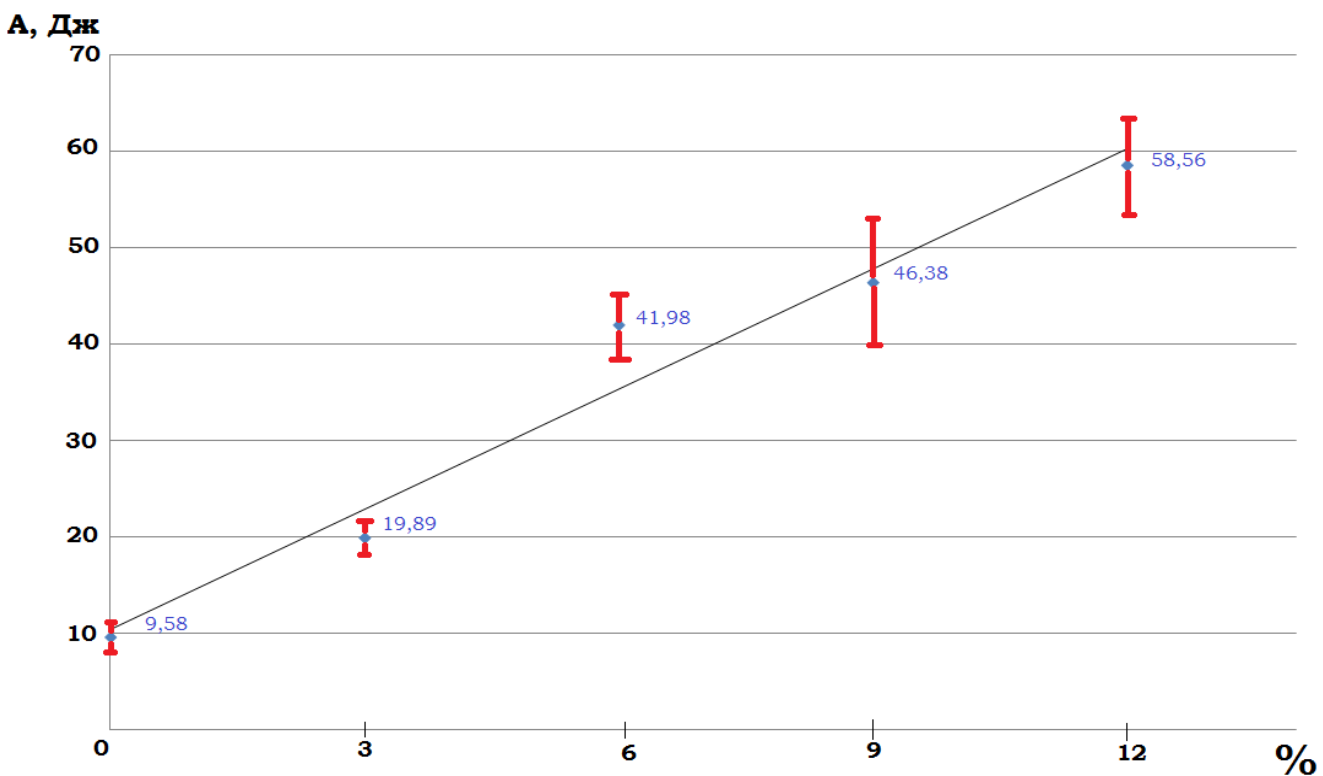


Рис. 6 – Зависимость работы, затраченной на разрушение при сжатии от количества наполнителя

Во второй части работы было изучено влияние времени выдержки во влажной камере на все перечисленные выше характеристики механических свойств. Для сокращения числа опытов мы провели этот эксперимент только для образцов, вообще не содержащих армирующий компонент и содержащих его максимальное количество (12 % по объему).

Как видно, предел прочности на растяжение при изгибе существенно повышается при увеличении времени выдержки во влажной камере для обоих типов образцов. Так как остальные характеристик прочности изменяются аналогичным образом, мы приводим только одну диаграмму (рис. 7).

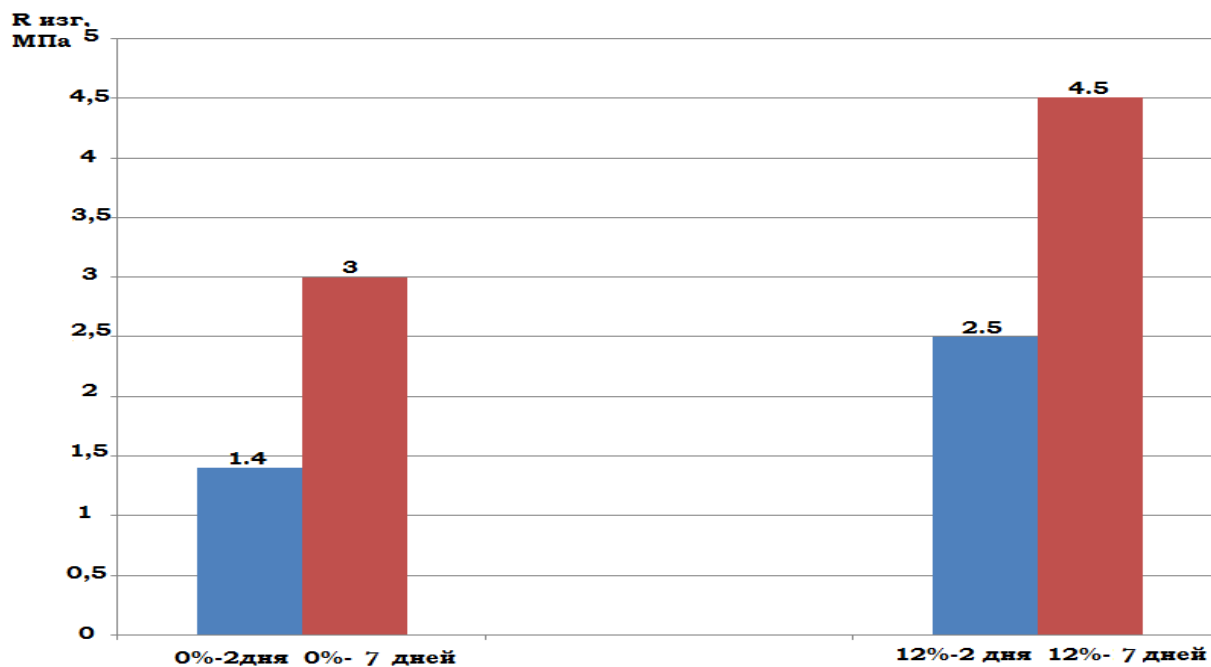


Рис. 7 – Влияние времени выдержки во влажной камере на прочность при изгибе

Следует отметить, что влияние времени вылеживания на модуль деформации при изгибе неоднозначно, а именно, что для образцов с 12 % наполнителя вылеживание приводит к повышению модуля деформации, хотя он все равно остается значительно меньше, чем у неупрочненного (рис. 8). Возможно, это связано с процессами физико-химическими взаимодействиями на границе раздела волокно-матрица. Известно, что эти процессы в разных материалах имеют различную природу, а могут и отсутствовать вообще, как например, в некоторых композитах на металлической основе. В нашей работе не ставилась задача их анализа или изучения.

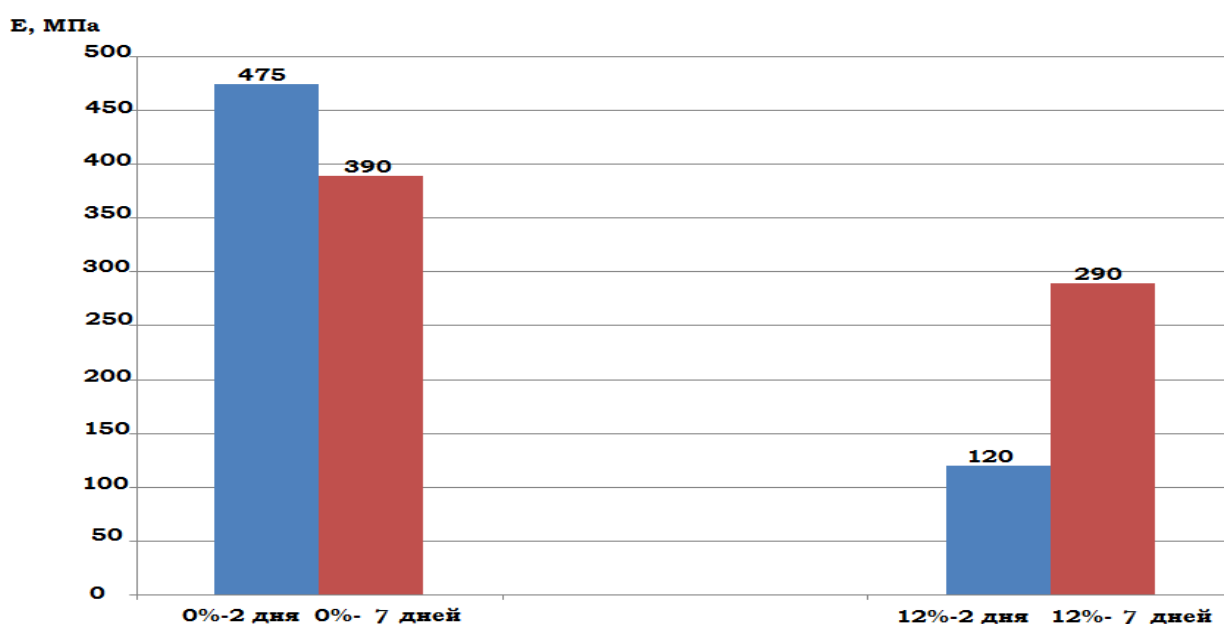


Рис. 8 – Влияния времени выдержки во влажной камере на модуль деформации при изгибе

Существенно также, что мы не планировали получить оптимальные значения концентрации базальтового волокна или времени выдержки во влажной камере. Нашей задачей было выяснение принципиальной возможности создания композиционного материала на основе отходов промышленного производства, а также переработки изделий из базальтовых волокон, которые в ходе эксплуатации уже утратили свои полезные свойства.

Заключение

В ходе проведенных исследований показано, что увеличение количества наполнителя до 12 % (по объему) приводит к повышению прочности композиционного материала.

Установлено, что увеличение времени выдержки образцов в камере с постоянной влажностью позволяет повысить характеристики прочности, пластичности и работу на разрушение при сжатии.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Аблесимов Н.Е. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных системах. Базальты: от извержения до волокна / Н.Е. Аблесимов, А.Н. Земцов // Москва : ИТиГ ДВО РАН, 2010. – 400 с.
2. Оснос С.П. Проведение исследований и выбор базальтовых пород для производства непрерывных волокон / С.П. Оснос, М.С. Оснос // Композитный мир. – 2018. – № 1. – С. 56–62.
3. Оснос М.С. Исследование процессов плавления базальтовых пород при производстве непрерывных волокон / М.С. Оснос, С.П. Оснос // Композитный мир. – 2018. – № 2. – С. 70–75.
4. Петропавловская В.Б. Утилизация отходов минерального волокна в производстве гипсовых изделий / В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова, А.Ф. Бурьянов и др. // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – Вып. 12(111). – С. 1392–1398.
5. ГОСТ 31108-2016 Цементы общестроительные. Технические условия/ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – Введ. 2017-03-01. – Москва : Стандартиформ, 2019.
6. ГОСТ 12801-98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Введ. 1999-01-01. – Москва : ГУП ЦПП, 1999.
7. Оснос М.С. Базальтовое непрерывное волокно – вчера, сегодня и завтра. Развитие технологий и оборудования, промышленных производств и сбыта / М.С. Оснос, С.П. Оснос // Композитный мир. – 2015. – № 2. – С. 24–30.
8. Базальтоволокнистые материалы: сборник статей / сост. О.Н. Семенов. – Москва : Информконверсия, 2001. – 307 с.
9. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова // Монография. – Москва : Теплоэнергетик, 2002. – 416с.
10. Кац Г.С. Наполнители для полимерных композиционных материалов / Г.С. Кац, Д.В. Милевски – Москва : Химия, 1981. – 736 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ablesimov N.E. Relaksacionnye efekty v neravnovesnykh kondensirovannykh sistemah. Bazal'ty: ot izverzheniya do volokna [Relaxation effects in non-equilibrium condensed systems. Basalt: from eruption to fiber] / N.E. Ablesimov, A.N. Zemcov. – Moscow : ITiG DVO RAS, 2010. – 400 p. [in Russian]
2. Osnos S.P. Provedenie issledovanij i vybor bazal'tovykh porod dlya proizvodstva nepreryvnykh volokon [Research and selection of basalt rocks for of continuous fibre production] / S.P. Osnos, M.S. Osnos // Kompozitnyj mir [Composite world]. – 2018. – № 1. – Pp. 56–62. [in Russian]
3. Osnos M.S. Issledovanie processov plavleniya bazal'tovykh porod pri proizvodstve nepreryvnykh volokon [Study of the basalt rocks melting processes in the production of continuous fibre] / M.S. Osnos, S.P. Osnos // Kompozitnyj mir [Composite world]. – 2018. – № 2. – Pp. 70–75. [in Russian]
4. Petropavlovskaya V.B. Utilizaciya othodov mineral'nogo volokna v proizvodstve gipsovyykh izdelij [Utilization of mineral fibre waste in gypsum articles production] / V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova, A.F. Bur'yanov et al. // Vestnik MGSU [Bulletin of MSUCE]. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 12(111). – Pp.1392–1398. [in Russian]
5. GOST 31108-2016 Cementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya [General-purpose cements. Technical conditions]/ GOST30744-2001 Cementy. Metody ispytaniy s ispol'zovaniem polifrakcionnogo peska [Test methods using polyfractional sand]. – Introduced 2017-03-01. – Moscow : Standartinform, 2019.
6. GOST 12801-98 Materialy na osnove organicheskikh vyazhushchih dlya dorozhnogo i aerodromnogo stroitel'stva. Metody ispytaniy [Materials based on organic binders for road and airfield construction. Test methods]. – Introduced 1999-01-01. – Moscow : GUP CPP, 1999.
7. Osnos M.S. Bazal'tovoe nepreryvnoe volokno – vchera, segodnya i zavtra. Razvitie tekhnologij i oborudovaniya, promyshlennykh proizvodstv i sbyta [Basalt continuous fiber – yesterday, today and tomorrow. Development of technology and equipment, industrial production and marketing] / M.S. Osnos, S.P. Osnos // Kompozitnyj mir [Composite world]. – 2015 – № 2 – Pp.24–30. [in Russian]
8. Bazal'tovoloknistye materialy [Basalt materials] / comp. by O.N. Semenov. – Moscow : LLC «Informkonversiya», 2001. – 307 p. [in Russian]
9. Dzhigiris D.D. Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdelij [Basics of basalt fibers and products manufacture] / D.D. Dzhigiris, M.F. Mahova // Monograph. – Moscow : Teploenergetik publishing house, 2002. – 416 p. [in Russian]
10. Kac G.S. Napolniteli dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Fillers for polymer composite materials] / G.S. Kac, D.V. Milevski – Moscow : Himiya publishing house, 1981. – 736 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.018>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНОГО НЕФТЕПРОВОДА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Научная статья

Егорова Т.Р.^{1,*}, Кычкина В.Г.², Колесов А.Е.³

¹ ORCID: 0000-0002-7117-9218;

² ORCID: 0000-0003-1419-3715;

³ ORCID: 0000-0001-9969-1195;

^{1, 2, 3} Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

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

Аннотация

Активное начало освоения нефтегазовых месторождений в северных регионах, где распространены многолетнемерзлые грунты (ММГ), создает большие техногенные воздействия на хрупкую природу Якутии.

В статье рассматриваются проблемы процесса оттаивания мерзлых грунтов от термического воздействия нефтепровода. Вследствие этого существует вероятность пространственного перемещения, выпучивания участков, деформации трубопроводов, что в итоге может привести к аварийным ситуациям. В работе исследуется термическое воздействие нефтепровода на ММГ на основе математических моделей. В ходе исследований была изучена математическая модель Стефана. Предложен вариант использования нефтепровода с дополнительной теплоизоляцией для осуществления заблаговременного проведения мероприятий по экологической безопасности и предупреждению чрезвычайных ситуаций, обусловленного нефтеразливом.

Рекомендовано учитывать особенности климатических и инженерно-геокриологических условий местности при проектировании магистральных нефтепроводов в районах распространения ММГ, по которой осуществляется перекачка нефти с подогревом.

Ключевые слова: подземный нефтепровод, экологическая безопасность, оттаивание, замерзание, многолетнемерзлый грунт, математическое моделирование.

PREDICTION OF TEMPERATURE INTERACTION BETWEEN UNDERGROUND OIL PIPELINE AND PERMAFROST SOIL

Research article

Egorova T.R.^{1,*}, Kychkina V.G.², Kolesov A.Y.³

¹ ORCID: 0000-0002-7117-9218;

² ORCID: 0000-0003-1419-3715;

³ ORCID: 0000-0001-9969-1195;

^{1, 2, 3} M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

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

Abstract

The active beginning of the development of oil and gas fields in the northern regions, where permafrost soils are widespread, creates large technogenic impacts on the fragile nature of Yakutia.

The article deals with the problems of the process of thawing frozen soils from the thermal impact of the oil pipeline. As a result, there is a possibility of spatial movement, buckling of sections, deformation of pipelines, which can ultimately lead to emergency situations. The paper investigates the thermal effect of an oil pipeline on the permafrost soils based on mathematical models. In the course of the research, the mathematical model of Stefan studied. A variant of the use of an oil pipeline with additional thermal insulation for the implementation of early measures for environmental safety and the prevention of emergencies caused by an oil spill is proposed.

It is recommended to take into account the peculiarities of the climatic and engineering-geocryological conditions of the area when designing main oil pipelines in the areas of distribution of the permafrost soils, through which oil is pumped with heating.

Keywords: underground oil pipeline, environmental safety, thawing, freezing, permafrost, mathematical modeling.

Введение

В последние годы на территории Республики Саха (Якутия) развиваются обвальнo-осыпные процессы, термокарст, процессы подтопления и криогенное пучение грунтов. Это обусловлено тем, что вся площадь Якутии входит в зону ММГ, мощность которой – максимальная на земном шаре (в среднем 300–400 м).

На территории Мирнинского и Ленского района приравненному к крайнему северу [1], проложен магистральный нефтепровод в двухниточном исполнении с Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения до магистрального нефтепровода Восточная Сибирь-Тихий океан (СБНГКМ-ВСТО) предназначенный для транспортировки товарной нефти с подогревом от центрального пункта сбора нефти (ЦПС) Среднеботуобинского месторождения до узла учета нефти на приемо-сдаточный пункт (ПСП) «Ленск» к магистральному нефтепроводу системы «ВСТО», прокладка нефтепровода в подземном исполнении в стандартной заводской полимерной изоляции без дополнительной теплоизоляции.

При подземной прокладке трубопроводов может наблюдаться изменчивость и неоднородность свойств грунта вдоль трассы трубопровода, неравномерное распределение различных по форме и размерам ледяных включений. Изменение теплофизических и физико-механических свойств грунтов в процессе строительства трубопроводов и активное течение криогенных процессов приводят к неоднородному оттаиванию и обводнению ММГ. Оттаивание ММГ в свою очередь

сопровождается формированием вокруг трубопровода ореола оттаивания, неравномерной просадке и деформации оттаивающего под трубопроводом грунта и, как следствие, к возникновению изгибных деформаций трубопровода, его перенапряжению и разрушению [2]. В зависимости от своей структуры мерзлые грунты дают разную осадку [3].

Чтобы не допустить непроизводительные затраты и негативные экологические последствия для безопасной эксплуатации трубопроводов, сооружаемых в ММГ, необходимо учитывать различные факторы: перемещение и деформацию трубопровода, процессы термокарста подземных льдов; морозобойное растрескивание и жильное льдообразование; процессы пучения; эрозионную деятельность временных водотоков; расчленение рельефа местности [4].

Целью работы является прогнозирование температурного взаимодействия нефтепровода на ММГ. Для достижения поставленной цели будут сформулированы следующие задачи:

- 1) оценка потенциально опасных участков разлива нефти;
- 2) изучить математическую модель процесса теплопередачи с фазовыми переходами;
- 3) провести моделирование теплового взаимодействия грунта с нефтепроводом.

Объект исследования

Первая нитка магистрального нефтепровода «СБНГКМ–ВСТО» построена с применением труб условным диаметром 273 мм, толщиной стенки 10 мм, из стали 09Г2С с заводской полимерной изоляцией. Введена в эксплуатацию 2013 г. Вторая нитка имеет условный диаметр 530, толщину стенки 14 мм, заводскую полимерную изоляцию и марку стали –17Г1С-У, ввод в эксплуатацию 2017 г. Основной способ прокладки нефтепроводов принят подземный.

Исходя из условия обеспечения защиты магистрального нефтепровода от механических повреждений, а также руководствуясь требованиями раздела 9 [5], глубина заложения нефтепровода предусмотрена не менее – 0.8 м до верха трубы на минеральных грунтах и 0.6 м до верха балластирующих конструкций на болотах I и II типов.

Объект отнесен к категории опасных производственных объектов по признаку использования оборудования, работающего под избыточным давлением более 0.07 МПа и обращения опасного вещества – товарная нефть.

Гидрометеорологические и экологические особенности района расположения объектов

Климат Мирнинского и Ленского районов резко континентальный, с низкими температурами воздуха зимой и высокими летом, с малой облачностью и относительно слабыми, особенно в зимний период, ветрами. Особенности зимнего периода проявляются в очень низких температурах. Абсолютный минимум достигает до -57°C . Температура воздуха наиболее холодной пятидневки -52°C . Весна и начало лета характеризуются большей засушливостью, то есть отмечается малое количество осадков, а также низкие значения относительной влажности воздуха в дневное время. Годовая сумма осадков изменяется от 371 мм до 482 мм. Из них количество осадков за апрель – октябрь 267 мм. Распределение осадков по сезонам очень неравномерное. Устойчивый переход через $+5^{\circ}\text{C}$ средней суточной температуры обычно приходится на первые числа июня, начинается вегетационный период. Летние средние температуры невысокие. Абсолютный максимум температуры воздуха $+39^{\circ}\text{C}$. Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца 24.8°C .

Лето на данной территории короткое, но жаркое. Средняя продолжительность безморозного периода – 162 дня. В связи с возможностью вторжения арктических масс воздуха можно ожидать довольно низкие температуры в любой летний месяц, абсолютный минимум июля составляет от 0 до минус 3°C . Продолжительность периода со снежным покровом в среднем составляет $202\div 205$ дней в году.

Сочетание сильных морозов с небольшой высотой снежного покрова ведут к промерзанию почвы на значительную глубину. Промерзание почв начинается с конца сентября и продолжается до конца апреля. Средняя годовая температура на поверхности почвы отрицательная и составляет минус $6^{\circ}\text{C} \div$ минус 8°C .

Инженерно-геологические условия территории

Территория трубопровода расположена в зоне развития островной многолетней мерзлоты. Мощность многолетнемерзлых грунтов (ММГ) составляет 3.4–13.5 м, глубина их кровли от 1.5–7.6 м. По льдистости грунты слабольшедистые. Преобладающие температуры от минус 0.2 до минус 1.3°C . Общая длина участков с наличием многолетнемерзлых грунтов составляет 2427 м.



Рис. 1 – Фотографии грунта в зоне прокладки трубопровода

Коррозионная активность грунтов к стали – от низкой до средней. Гидрогеологические условия трассы характеризуются наличием надмерзлотных и подмерзлотных горизонтов подземных вод. По степени опасности морозного пучения грунты сезонно мерзлого слоя характеризуются как пучинистые, сильнопучинистые, чрезмернопучинистые. К непучинистым отнесены скальный и гравийный грунты.

Прогнозирование объёмов и площадей разливов нефти

В процессе строительства и эксплуатации нефтепроводов в зонах ММГ происходит нарушение динамического равновесия, сопровождающегося активацией опасных природных процессов, негативным влиянием на техническое состояние нефтепроводов, приводящим нередко к аварийным ситуациям[2].

Наиболее опасными в отношении больших объёмов и, соответственно, площадей разлива нефти могут быть аварии на нефтепроводе «СБНГКМ-ВСТО» Ду 530. В силу особенности прокладки (по болотам, через водные преграды), большой протяженности, высокого рабочего давления и других факторов возможны существенные разливы нефти и загрязнение больших площадей.

Разливы нефти уничтожают практически все живое. При контакте с нефтью растительность погибает полностью в течение 2–3 лет, длительное время не восстанавливаясь. В интенсивной зоне загрязнения также почти полностью исчезают беспозвоночные животные, а птицы и млекопитающие ее обычно избегают.

Прогнозирование объёмов разливов нефти выполнено в соответствии с требованиями [6]:

- трубопровод при порыве – 25 % максимального объема прокачки в течение 6 часов и объем нефти между запорными задвижками на поврежденном участке трубопровода;
- трубопровод при проколе – 2 % максимального объема прокачки в течение 14 дней.

Максимально возможный разлив нефти при аварии на трубопроводах представлены следующие участки в таблице 1.

Таблица 1 – Максимально возможные разливы нефти при аварии на трубопроводах

№ п/п	Максимально возможный разлив нефти при аварии на напорном трубопроводе, т			
	Наименование трубопровода	Наименование простого участка трубопровода	$M_{нпор}$	$M_{нпрок}$
1	Магистральный нефтепровод Ду 273	Нефтепровод от ЦПС до задвижки № 5	1069,7	862,4
2	Нефтепровод Ду 530	Нефтепровод от ЦПС до задвижки № 4	2251,2	3835,4
3	Нефтепровод Ду 530	Нефтепровод от задвижки № 13 до задвижки № 14	1910,9	3835,4
4	Нефтепровод Ду 530	Нефтепровод от задвижки № 22 до ПСП	2795,6	3835,4
5	Нефтеоборный внутрипромысловый трубопровод	Трубопровод узел 2 – узел 4	113,1	333,4

В таблице 2 приведены следующие участки значения площадей разлива нефти на территории.

Таблица 2 – Площадь разлива нефти на территории

№ п/п	Трубопроводы		Площадь разлива, м ²	
	Наименование трубопровода	Наименование простого участка трубопровода	S _{нпор}	S _{нпрок}
1	Магистральный нефтепровод Ду 273	Нефтепровод от ЦПС до задвижки № 5	6219,3	5014,0
2	Нефтепровод Ду 530	Нефтепровод от ЦПС до задвижки № 4	13088,2	22299,1
3	Нефтепровод Ду 530	Нефтепровод от задвижки № 13 до задвижки № 14	11110,0	22299,1
4	Нефтепровод Ду 530	Нефтепровод от задвижки № 22 до ПСП	16253,4	22299,1
5	Нефтесборный внутрипромысловый трубопровод	Трубопровод узел 2 – узел 4	657,5	1938,3

Наиболее опасной чрезвычайной ситуацией обусловленной нефтеразливом на системе нефтепроводов, являются случаи порывов и проколов нефтепроводов. Вероятными последствиями возможного разлива нефти при авариях на нефтепроводах могут стать:

- выброс в атмосферу загрязняющих веществ в результате испарения нефти с поверхности разлива;
- возгорание разлива нефти;
- взрыв (вспышка) топливно-воздушной смеси;
- выброс в атмосферу токсичных продуктов горения нефти при возгорании разлива;
- гибель и травмирование персонала (обходчиков трубопровода), находящегося в зоне действия поражающих факторов пожара и взрыва при разливе нефти;
- загрязнение прилегающей территории;
- экономические потери, обусловленные нарушением нормальной работы производственного объекта.

Моделирование термического взаимодействия нефтепровода на ММГ

Для математического моделирования температурного взаимодействия трубопровода с грунтами будем использовать модель Стефана, которая описывает тепловые процессы с учетом фазового перехода, поглощения и выделения скрытой теплоты [7]

$$(C(\phi) + m\rho_v L\phi') \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \times (\lambda(\phi) \nabla T) = 0 \quad (1)$$

где T – распределение температуры в грунте, m – пористость грунта, L – удельная теплота плавления льда, ρ_v – плотность воды. Коэффициенты теплоемкости и теплопроводности определяются как

$$C(\phi) = (1 - \phi)C_M + \phi C_T, \lambda(\phi) = (1 - \phi)\lambda_M + \phi\lambda_T \quad (2)$$

где C_M , C_T , λ_M , λ_T – объемные теплоемкости и теплопроводности талой и мерзлой зоны, соответственно, ϕ – функция Хэвисайда, равная 1 при положительной температуре и 0 при отрицательной.

Уравнение (1) необходимо дополнить начальными и граничными условиями. Начальная температура грунта будет равна T_0 . На дневной поверхности будет происходить конвективный теплообмен с окружающей средой. На сторонах грунта используем условие отсутствия теплового взаимодействия. На нижней границе грунта предполагаем постоянную температуру T_0 . Наконец, на границе грунта с трубопроводом также используем постоянную температуру T_T [8].

Для решения уравнения (1) используется вычислительный пакет FEniCS [9], который позволяет автоматизировать численное решение уравнений математической физики с помощью метода конечных элементов на языке программирования Python. Геометрическая область и расчетная сетка построена на программе Gmsh. Для просмотра результатов моделирования используется программа ParaView. Графики были построены с помощью библиотеки matplotlib. Все используемые в исследовании программы являются бесплатными и свободно распространяемыми.

Проведено моделирование температурного взаимодействия нефтепровода без теплоизоляции и с дополнительной теплоизоляцией с ММГ. Рассматривается модельная задача в двухмерном участке грунта общей глубиной 10 м, структура которой распределена содержанием песка 0–4 м, супеси 4–5.5 м, песчано-гравийной смеси (ПГС) 5.5–10 м с шириной 5 м. Расстояние между двумя нефтепроводами по оси равна 5 м. Характеристики трубопроводов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики нефтепроводов

	I нитка	II нитка
Наружный диаметр, мм	273	530
Толщина стенки, мм	10	14
Марка стали	09Г2С	17Г1С-У
Центр нефтепровода расположен на глубине, мм	936.5	1065
Толщина пенополиуретана, мм	44	70

Начальная температура грунта $T_0 = -2$ °С. Предположим, что температура нефти в трубе постоянная и равна $T_T = 33$ °С. Теплофизические свойства талого и мерзлого грунта (песка, супеси, ПГС), стали и пенополиуретана представлены в таблице 4.

Для области с нефтепроводом без теплоизоляции используется сетка с 53377 ячейками, для области с дополнительной теплоизоляцией – 15032 ячейками. В первой сетке ячеек намного больше из-за сгущения в области нефтепровода. Расчеты проведены с шагом по времени 1 день в течение 3 лет (1095 шагов по времени).

Таблица 4 – Теплофизические свойства

Элементы	Объемная теплоемкость $C_p \cdot 10^{-6}$		Теплопроводность k		Удельная теплота таяния $L \cdot 10^{-6}$
	талый	мерзлый	талый	мерзлый	
Песок	1,51	2,01	1,86	1,67	60,437
Супесь	3,15	2,35	1,51	1,7	71,957
ПГС	2,51	2,06	1,42	1,84	64,769
Сталь	461		80		7890
Пенополиуретан	1470		0,028		40

Результаты расчетов представлены на рисунках 2 и 3, где слева показано распределение температуры в грунте с нефтепроводом на сентябрь первого года эксплуатации, справа на февраль второго года эксплуатации без теплоизоляции и с дополнительной теплоизоляцией. На рисунках сплошной белой линией показаны изотермы с температурой 0 °С, т. е. зона протаивания грунта.

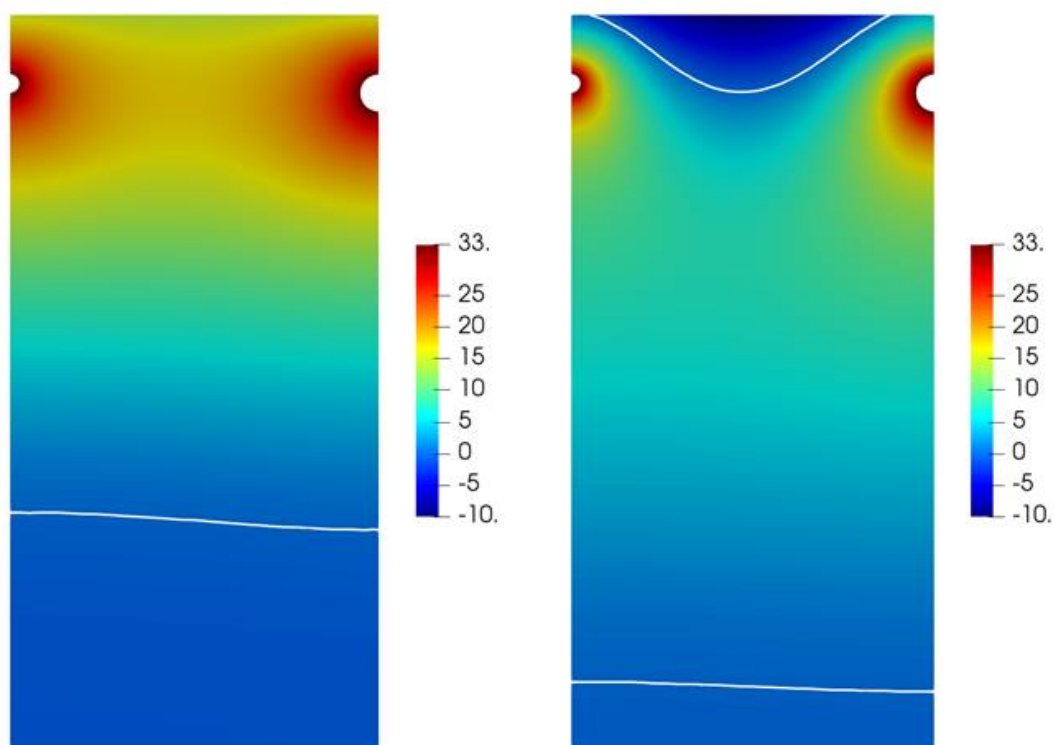


Рис. 2 – Распределение температуры в грунте с нефтепроводом без теплоизоляции

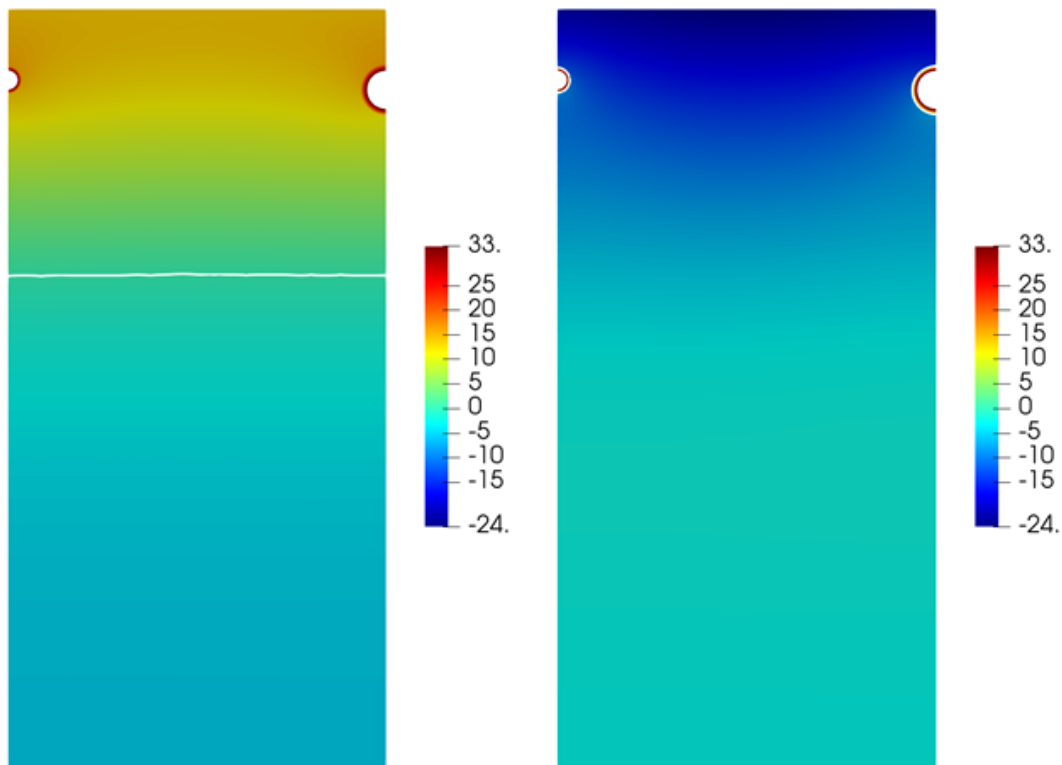


Рис. 3 – Распределение температуры в грунте с нефтепроводом с дополнительной теплоизоляцией

На рисунке 4 видно, что при прокладке нефтепровода без теплоизоляции ММГ полностью тает в зоне расчетной модели в течение полутора лет. Что приведет к усадке грунта в зоне прокладки магистральных нефтепроводов. А в месте перехода от малопросадочных грунтов в область просадочных будет наблюдаться зависание трубопровода [10]. При наличии дополнительной теплоизоляции в нефтепроводах из пенополиуритана толщиной 44 мм и 70 мм для нефтепроводов Ду 273 и Ду 530 соответственно, глубина протаивания грунта будет достигать до 4 м с зонами замерзания в период зимнего времени года.

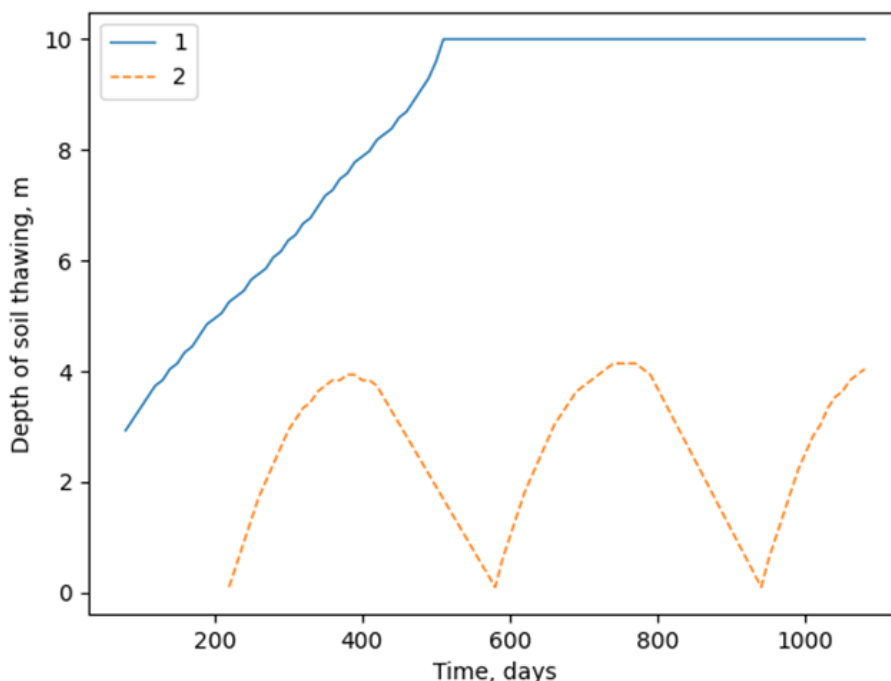


Рис. 4 – Глубина таяния ММГ

Заключение

Исходя из вышеизложенного приходим к выводу, что при проектировании нефтепровода на территории ММГ, по которой осуществляется перекачка нефти с подогревом, необходимо предусмотреть дополнительную теплоизоляцию. Строительство нефтепроводов с теплоизоляцией предотвращает процессы таяния мерзлоты в зоне прокладки от термического взаимодействия нефтепровода в окружающий грунт, тем самым обеспечивая экологическую безопасность при эксплуатации магистральных нефтепроводов на Крайнем Севере.

Обозначены участки с большим риском возможных разливов нефти при аварии на трубопроводах и оценены потенциальные площади разлива нефти на территории, а также приведены последствия возможного разлива нефти при авариях на нефтепроводах.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность доценту кафедры Недропользования Геологоразведочного факультета Алексею Ивановичу Сивцеву за предоставленные материалы.

Acknowledgement

The authors express their sincere gratitude to Aleksey Ivanovich Sivcev, Associate Professor of the Geological Department of Subsoil Management for provided materials.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Постановление Совета Министров СССР от 10 ноября 1967 года N 1029 О порядке применения Указа Президиума Верховного Совета СССР от 26 сентября 1967 г. (О расширении льгот для лиц, работающих в районах Крайнего Севера и в местностях, приравненных к районам Крайнего Севера) (с изменениями на 18 июля 1994 года)
2. Таранов Р.А. Особенности проектирования, строительства и эксплуатации магистральных нефтепроводов в зонах вечной мерзлоты / Р.А. Таранов, А.В. Марченко // Вестник науки и образования. – 2019. – № 12(66).
3. Царапов М.Н. Свойства мерзлых грунтов при оттаивании / М.Н. Царапов, П.И. Котов // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – С. 31 – 34.
4. Ефимов В.М. Геотехнический мониторинг в ММГ как условие обеспечения инженерно-экологической безопасности промышленного освоения территории / В.М. Ефимов, И.В. Ядрихинский, О.И. Молдаванов // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». – Москва, 2019.
5. СП 36.13330.2012 Свод правил магистральные трубопроводы.
6. О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов: постановление Правительства РФ № 613 от 21.08.2000 г. (в редакции от 15.04.2002 г.).
7. Вабищевич П.Н. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги / П.Н. Вабищевич, С.П. Варламов, В.И. Васильев и др. // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28. – № 10. – С. 110–124.
8. Afanaseva N.V. Numerical solution of the thermal influence of oil well cluster on permafrost / N.V. Afanaseva, A.E. Kolesov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1773. – №. 1. – P. 110001.
9. Alnæs M.S. The FEniCS Project Version 1.5 / M.S. Alnæs, J. Blechta, J. Hake et al. // Archive of Numerical Software. – 2015. – Vol. 3. – № 100. – Pp. 9–23.
10. Новиков П.А. Выявление опасных участков магистральных нефтепроводов на основе долгосрочного прогнозирования ореола оттаивания многолетнемерзлых грунтов, дис. канд.техн.наук / П.А. Новиков. – Москва, 2016.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Postanovlenie Soveta Ministrov SSSR ot 10 nojabrja 1967 goda N 1029 O porjadke primenenija Ukaza Prezidiuma Verhovnogo Soveta SSSR ot 26 sentjabrja 1967 g. (O rasshirenii l'got dlja lic, rabotajushhih v rajonah Krajnego Severa i v mestnostjah, priravnennyh k rajonom Krajnego Severa) (s izmenenijami na 18 ijulja 1994 goda) [Resolution of the Council of Ministers of the USSR of November 10, 1967 No. 1029 On the Procedure for the Application of the Decree of the Presidium of the Supreme Soviet of the USSR of September 26, 1967 (On the extension of Benefits for Persons Working in the Regions of the Far North and in Localities Equated to the Regions of the Far North) (as amended on July 18, 1994)]. [in Russian]
2. Taranov R.A. Osobennosti proektirovanija, stroitel'stva i jekspluatacii magistral'nyh nefteprovodov v zonah vечноj merzloty [Features of design, construction and operation of trunk oil pipelines in permafrost zones] / R.A. Taranov, A.V. Marchenko // Vestnik nauki i obrazovanija [Bulletin of Science and Education]. – 2019. – № 12(66). [in Russian]
3. Tsarapov M.N. Svojtstva merzlyh gruntov pri ottaivanii [Properties of frozen soils during thawing] / M.N. Tsarapov, P.I. Kotov // Put' i putevoe hozjajstvo [Path and track economy]. – 2013. – Pp. 31–34. [in Russian]
4. Efimov V.M. Geotehnicheskij monitoring v MMG kak uslovie obespechenija inzhenerno-jekologicheskoj bezopasnosti promyshlennogo osvoenija territorii [Geotechnical monitoring in MMG as a condition for ensuring engineering and environmental safety of industrial development of the territory] / V.M. Efimov, I.V. Yadrkhinsky, O.I. Moldavanov // Materialy XV Obshherossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii «Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii» [Materials of the XV All-Russian scientific and practical Conference "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation"]. – Moscow, 2019. [in Russian]
5. SP 36.13330.2012 Svod pravil magistral'nye truboprovody [SP 36.13330.2012 Code of Rules main pipelines]. [in Russian]
6. Postanovleniem Pravitel'stva RF № 613 ot 21.08.2000 g. «O неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов» (v redakcii ot 15.04.2002 g.) [Decree of the Government of the Russian Federation No. 613 dated 08/21/2000 "On urgent measures to prevent and eliminate emergency oil and petroleum product spills" (as amended on 04/15/2002)]. [in Russian]
7. Vabishevich P.N. Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polja mnogoletnemerzlogo gruntovogo osnovanija zheleznoj dorogi [Numerical modeling of the temperature field of the permafrost soil base of the railway] / P.N. Vabishevich, S. P. Varlamov, V.I. Vasiliev et al. // Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical modeling]. – 2016. – Vol. 28. – № 10. – Pp. 110–124. [in Russian]
8. Afanaseva N.V. Numerical solution of the thermal influence of oil well cluster on permafrost / N.V. Afanaseva, A.E. Kolesov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1773. – № 1. – P. 110001.
9. Alnæs M.S. The FEniCS Project Version 1.5 / M.S. Alnæs, J. Blechta, J. Hake et al. // Archive of Numerical Software. – 2015. – Vol. 3. – № 100. – P. 9–23.
10. Novikov P.A. Vyjavlenie opasnyh uchastkov magistral'nyh nefteprovodov na osnove dolgosrochnogo prognozirovanija oreola ottaivanija mnogoletnemerzlyh gruntov [Identification of dangerous sections of trunk oil pipelines based on long-term forecasting of the halo of thawing of permafrost zones]. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences / P.A. Novikov. – Moscow, 2016. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.019>

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Научная статья

Проскурин А.Ю.*

ORCID: 0000-0001-8723-1343,

Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (proskurinayu[at]mgsu.ru)

Аннотация

В настоящее время ветроэнергетика является одним из наиболее развивающихся направлений, что обусловлено, прежде всего, отсутствием выбросов вредных веществ в атмосферу. Ветроэнергетика позволяет обеспечить электроэнергией отдаленные районы, где доставка топлива, а также строительство тепловых электростанций трудоемки и затратны. Электрогенератор для бытовой ветроустановки должен обеспечивать электроэнергию в широком диапазоне скоростей вращения и иметь возможность автономной работы без автоматики и внешних источников энергии. Исследование численной реализации метода аэродинамического анализа лопасти ветрогенератора во вращательном движении в программном комплексе ANSYS CFD на сегодняшний день является наиболее перспективным и динамично развивающимся направлением в области расчетов аэродинамики. Предварительно представлены результаты апробации смешанного метода расчета с использованием динамически изменяемой и стационарной конечно-объемной сетки. Использование смешанной расчетной схемы позволяет проводить расчеты ветровых турбин внутри здания, при этом появляется возможность минимизировать необходимую для исследования мощность.

Ключевые слова: численное моделирование, аэродинамические процессы, Ansys CFD, энергоэффективность, альтернативные источники энергии в строительстве, ветротурбина, лопасть ветротурбины, уравнения Навье-Стокса.

APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGIES FOR THE SOLUTION OF AERODYNAMIC PROBLEMS

Research article

Proskurin A.Y.*

ORCID: 0000-0001-8723-1343,

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

* Corresponding author (proskurinayu[at]mgsu.ru)

Abstract

Currently, wind energy is one of the most rapidly developing spheres, which is primarily due to the absence of harmful emissions into the atmosphere. Wind power provides electricity to remote areas where fuel delivery and the construction of thermal power plants are labor-intensive and costly. An electric generator for a household wind turbine should provide electricity in a wide range of rotative speed and be able to operate independently without automation or external energy sources. The study of the numerical implementation of aerodynamic analysis method of the wind turbine blade in rotative motion in the software complex ANSYS CFD today is the most promising and dynamically developing direction in the field of aerodynamics calculations. The results of preliminary approbation of the mixed-mode calculation method with the use of dynamically variable and stationary finite-volume mesh are presented. The use of mixed wind turbine calculation allows its work inside the building, and so it becomes possible to minimize the power required for the research.

Keywords: computational simulation, aerodynamic processes, Ansys CFD, energy efficiency, alternative sources of energy in construction, wind turbine, wind turbine blade, Navier–Stokes equations.

Введение

Задача создания энергонезависимых зданий в современном мире очень важна для всего мира. Ресурсы Земли неумолимо иссякают и человечеству необходимо уделять большое внимание разработке новых альтернативных источников энергии. Современные архитектурные решения при строительстве мегаполисов стремятся использовать высокотехнологичные фотоэлектрические фасады, и гибкие солнечные мембраны для получения солнечной энергии, необходимой для возведения объектов капитального строительства. Благодаря совместному использованию энергии ветра и солнца, у нас есть возможность спроектировать здание, объединяющее различные методы получения экологически чистой энергии, что в свою очередь позволит довести здание до предполагаемой полной самодостаточности в электроэнергии.

Методы и принципы исследования

Для решения проблемы оценки аэродинамических характеристик была принята однолопастная ортогональная высокоэффективная турбина. (патент США Виктор Лятхер, US 8007235 B1, 30 августа 2011 г., патент РФ 2426911 С1). Поскольку профиль исследуемой лопасти соответствует в поперечном сечении авиационному профилю НАСА-0021, было решено принять геометрические характеристики в соответствии со справочными материалами. [1] Сечение исследуемого профиля лопасти (см. рисунок 1).

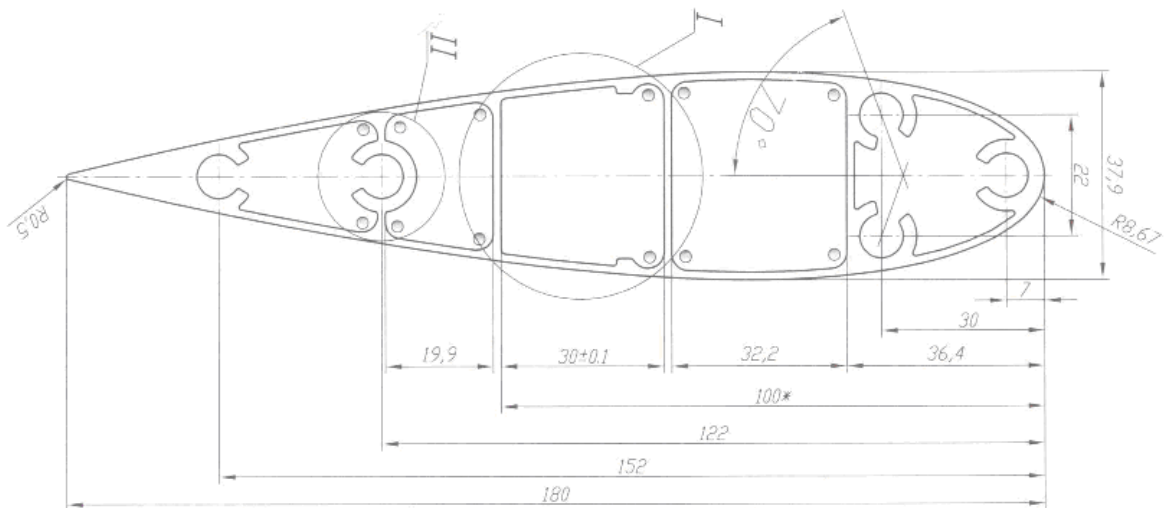


Рис. 1 – Поперечное сечение исследуемого профиля лопатки

Целью данной работы является тестирование методики численного моделирования серии лопастей ветрогенератора внутри пространства здания с учетом проектных особенностей, позволяющих искусственно увеличить скорость воздушного потока. Проблемой данной задачи является поиск геометрических характеристик позволяющих искусственно увеличить скорость воздушного потока, а также дать оценку энергоэффективности работе серии лопаток при совместной эксплуатации. На данный момент исследование заключается в определении аэродинамических характеристик и средней оценке энергоэффективности установки, а также поиске расчетной модели, позволяющей увеличить скорость набегающего воздушного потока. В качестве метода исследования было использовано компьютерное моделирование воздушного потока вокруг лопасти ветровой турбины в программном пакете ANSYS [2].

Решение нестационарного уравнения Навье-Стокса выполняется в каждый расчетный момент времени с учетом предыдущих результатов, полученных на предыдущем шаге. Этот метод очень трудоемкий и ресурсоемкий, но он позволяет анализировать поведение потока при обтекании вокруг вращающегося тела [3].

Этапы исследования сеточной сходимости

Поскольку нет данных, по которым представляется возможным определить параметры рассчитанной сетки, был сделан вывод о необходимости проведения серии проверочных расчетов. Геометрические параметры сеток (см. таблицу 1).

С помощью встроенного модуля Ansys Workbench Meshing была создана тетраэдральная сетка.[4] Во всех случаях размер ячейки в области цилиндра и в хвостовой части сетки имел одинаковый размер 0,06 м; во внешней области размер принимался равным 0,75 м. Задача решалась для четырех вариантов расчетной сетки с целью нахождения оптимальных параметров расчетной сетки. Для получения точных результатов необходимо создать область пограничного слоя по всему профилю лопатки. Размер пограничного слоя определялся на основе геометрии профиля, числа Рейнольдса и модели турбулентности [5], [6].

Таблица 1 – Геометрические параметры сеток

Модель	Гидравлический диаметр	Число Рейнольдса	Расчетный $Y +$	Расчетное расстояние от стенки	Сгущение сетки в продольном направлении
1	0,38	5,0e+4	1	1,3e-4	1,0e-2
2	0,38	5,0e+4	40	5,0e-3	5,0e-2
3	0,38	5,0e+4	50	6,3e-3	1,0e-2
4	0,38	5,0e+4	80	1,0e-2	1,0e-2

Ниже приведены результаты задач верификации, значения аэродинамических характеристик при различных геометрических характеристиках и различных коэффициентах $Y +$. (см. таблицу 2,3).

Таблица 2 – Сравнение аэродинамических коэффициентов с экспериментальными данными (C_d , C_l , C_m) для всех вариантов расчета ($Y + = 1$, $Y + = 40$, $Y + = 50$, $Y + = 80$)

$Y +$	C_d (эксперимент)	C_d (расчет)	C_d (погрешность)	C_l (эксперимент)	C_l (расчет)	C_l (погрешность)	C_m (эксперимент)	C_m (расчет)	C_m (погрешность)
1	0,042	0,029	-30,9 %	0,79	0,469	-40,6%	-0,045	-0,018	-60%
40	0,042	0,024	-42,85%	0,79	0,7	-11,39%	-0,045	-0,028	-37,7%
50	0,042	0,039	-19,04%	0,79	0,72	-8,86%	-0,045	-0,039	13,6%
80	0,042	0,0323	-23,09%	0,79	0,749	-5,189%	-0,045	-0,03	-33,3%

Таблица 3 – Сравнение аэродинамических коэффициентов (C_d , C_l , C_m) для всех вариантов расчета ($Y + = 1$, $Y + = 40$, $Y + = 50$, $Y + = 80$)

$Y +$	50 (эксперимент)	1	погрешность	50 (эксперимент)	40	погрешность	50 (эксперимент)	80	погрешность
C_d	0,034	0,029	20,8%	0,024	0,024	0%	0,034	0,0223	-7,1%
C_l	0,72	0,469	-34,9%	0,72	0,7	-2,7%	0,72	0,749	4,1%
C_m	-0,039	-0,02	-37,8%	-0,039	-0,03	-3,4%	-0,039	-0,03	7,1%

После анализа и сравнения результатов расчетных параметров CFD-расчетов с результатами, представленными в справочном материале, модель $Y + 50$ является наиболее точной для проведенного нестационарного расчета на основе предыдущего опыта, который показал наименьшую ошибку при определении аэродинамических коэффициентов в совокупности. При оценке коэффициента сопротивления наибольшая ошибка составляет -46,9%, коэффициента подъемной силы -40,6%, коэффициента подъемной силы - 60%.

В результате верификационных исследований наименьшее расхождение критериальных параметров с экспериментальными данными было получено для расчетного случая с $Y + = 50$, поэтому было принято решение использовать данную сетку в качестве расчетной сетки для моделирования вращающейся лопасти под действием аэродинамической нагрузки.

Граничные и начальные условия. Параметры расчета

Расчетная геометрия представлена в виде круга, что позволяет исследовать проблему при различных углах вхождения воздушного потока. Скорость потока была принята равной 15 м/с с процентом турбулентности до 7%. С обеих сторон модели условия были построены таким образом, чтобы учесть кривизну круга и смоделировать обтекание перпендикулярно лопасти ветряной турбины. В нижней части модели были приняты условия "стенки скольжения" (FreeSlipWall, $U = V = W = 0$ м/с). В верхней части были заданы открытые граничные условия. Внутри основной цилиндрической области была задана г-образная труба с прямоугольным сечением. Данная геометрия была принята исходя из соображений, что в данной расчетной модели имеется возможность создать эффект «сквозняка». Поскольку с наветренной стороны и подветренной возникает разница давлений, поток воздуха стремился бы выровнять данный дисбаланс, что привело бы к увеличению скорости потока воздуха, проходящего через трубу.[7] Ниже изображена геометрическая модель, выполненная в программном пакете Autodesk AutoCad.

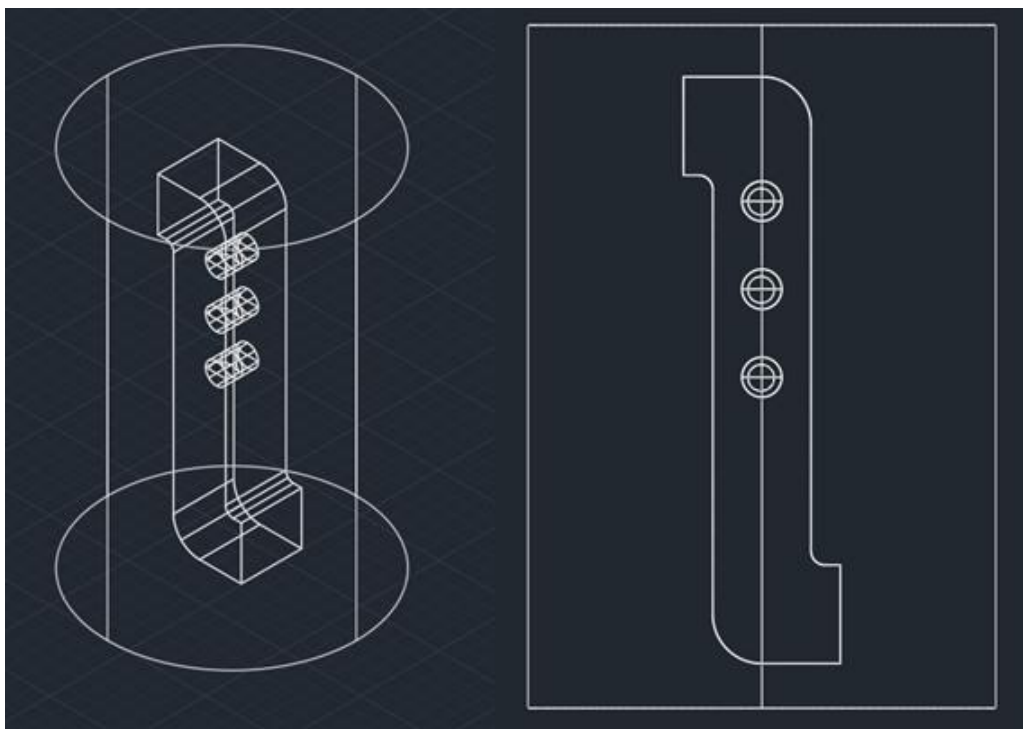


Рис. 2 – Расчетная модель в программном пакете Autodesk AutoCad

Основные результаты

Расчеты проводились в трехмерной нестационарной постановке [8]. Для аэродинамических расчетов $Re = 50\ 000$ приведены следующие основные физические характеристики потока.

На рис. 4-7 представлены основные результаты вычислительных исследований, выполненных при обтекании серии лопастей ветро-турбин в различные моменты времени, анализ аэродинамических характеристик.

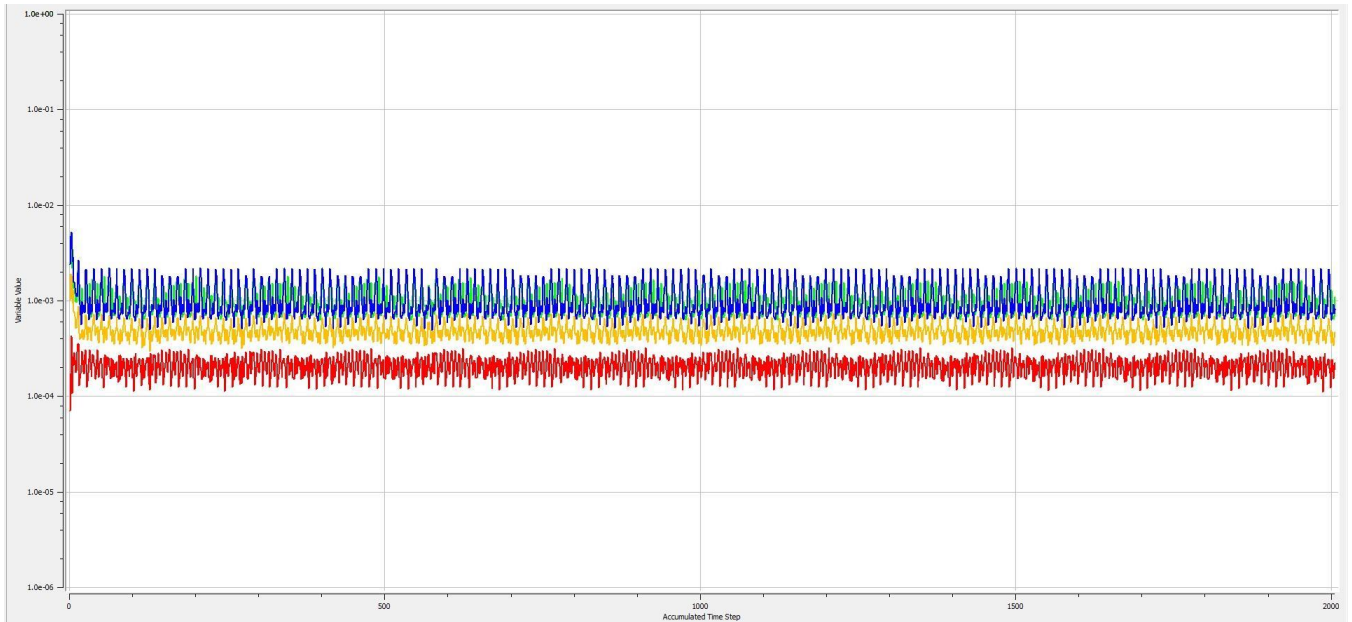


Рис. 3 – Расчет в программном пакете CFX (массы и моменты)

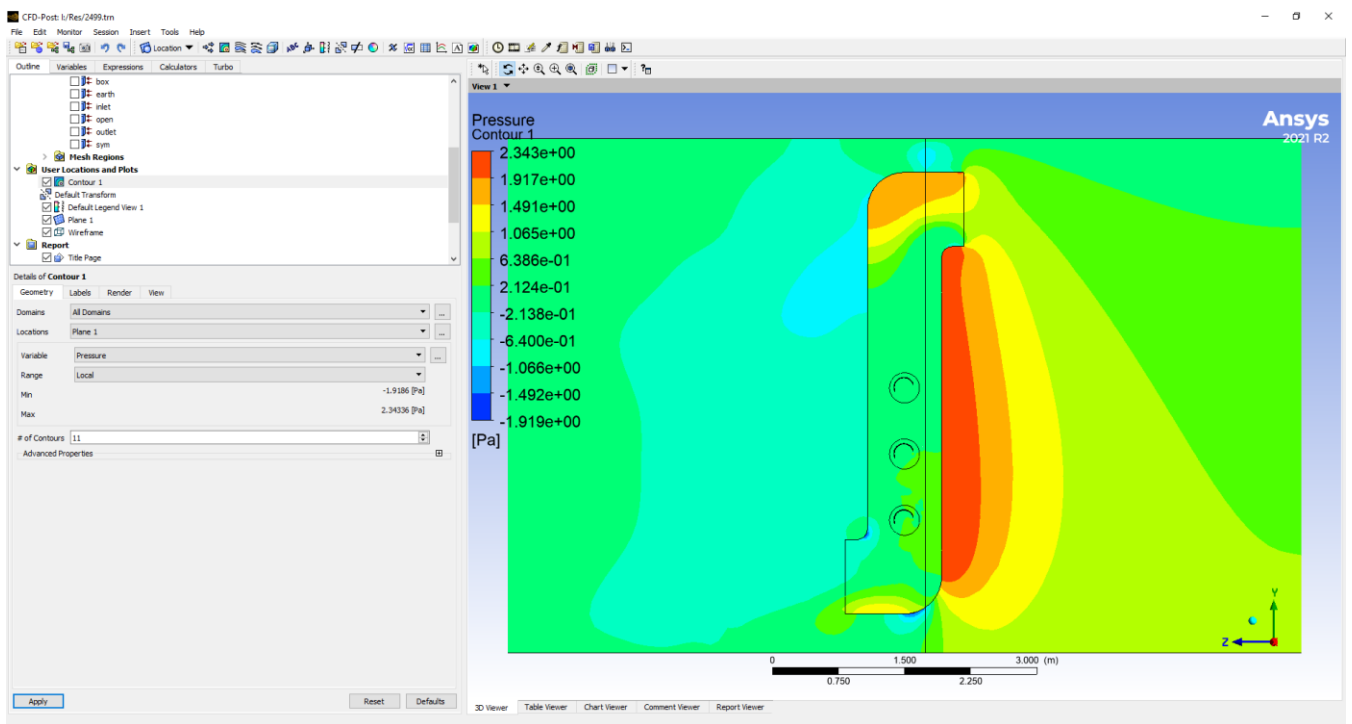


Рис. 4 – Изополя давления

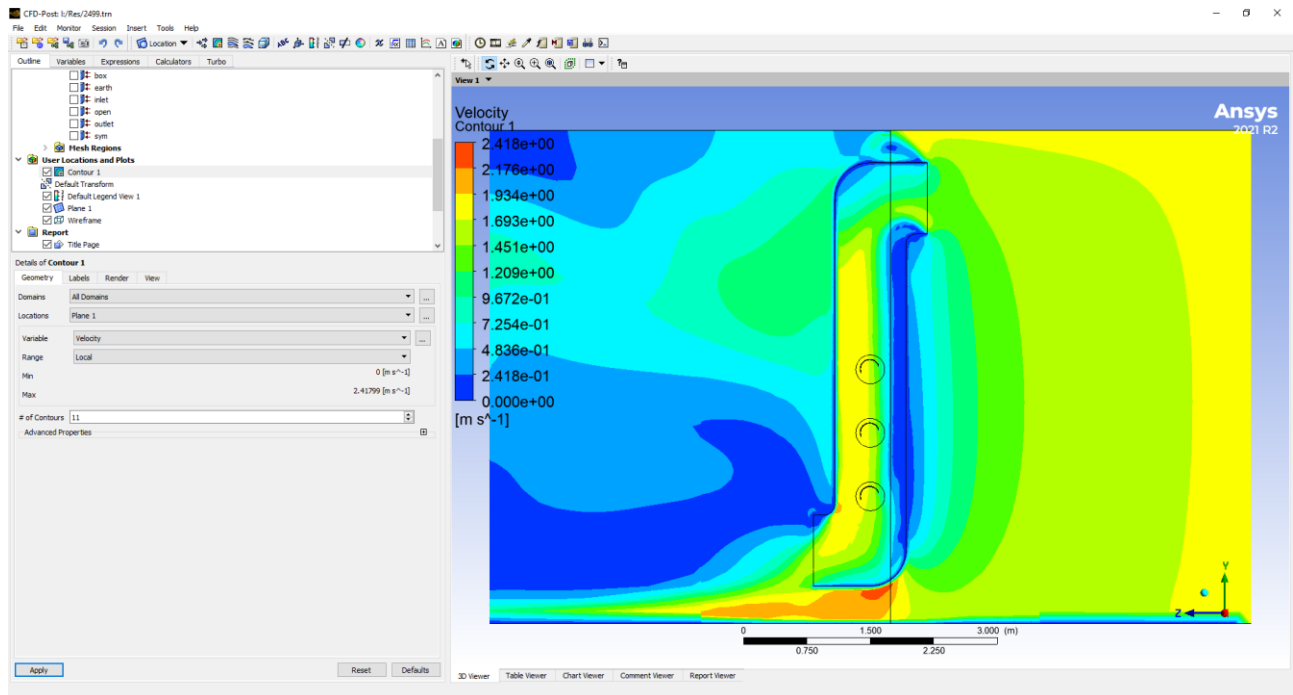


Рис. 5 – Изополя скоростей

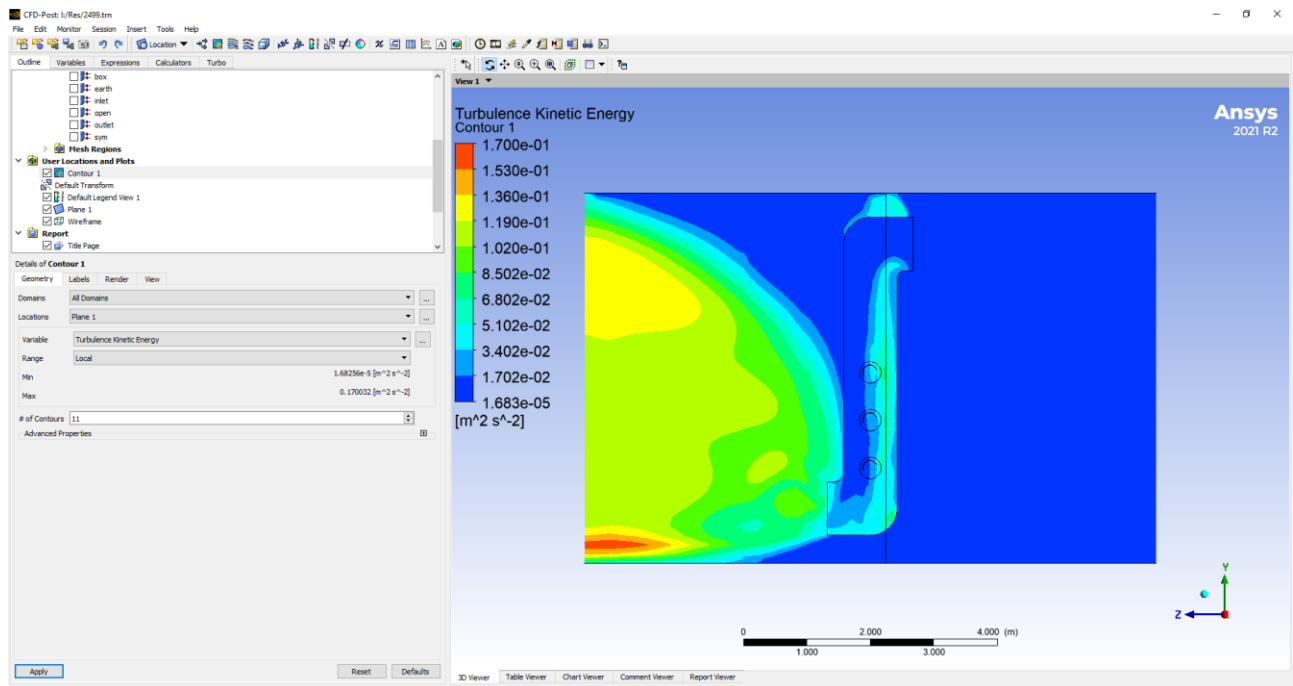


Рис. 6 – Изополя кинетической энергии турбулентности

Расчет энергоэффективности

К сожалению, исходных данных недостаточно для полного анализа данных по энергоэффективности, однако, известные размеры позволяют определить количество вырабатываемой энергии на основе площади «ометания» [9].

В таблице 4 приведены значения генерируемой энергии при различных скоростях воздушного потока. Эти значения рассчитаны на основе размера площади метания.

Таблица 4 – Сводная таблица выработки электроэнергии

Скорость потока, м/с	Плотность воздуха, кг/м ³	Количество выработанной энергии одной лопаткой, кВт	Количество выработанной энергии системой лопаток, кВт
2	1,185	0,09	0,27
5	1,185	1,475	4,425
10	1,185	11,8	35,4
15	1,185	39,8	119,4
20	1,185	94,4	283,2
25	1,185	184,3	552,9

Обсуждение

Как видно из таблицы 4, при скорости потока 25 м/с лопасть практически полностью позволяет снабжать энергией значительное количество систем дома. Это позволяет сделать вывод, что большое количество таких генераторов сможет заменить нынешние "вредные" электростанции на более экологичные. Реализована задача по исследованию геометрических особенностей конструкций для увеличения скорости потока воздуха при обтекании лопаток ветрогенератора.

Однако, исследование физики процесса показывает необходимость включить разность температур внутри трубы и окружающей среды, что будет являться вопросом исследования следующего отчетного периода.

Заключение

Как видно из таблицы 4, при скорости потока в 25 м/с лопатка практически полностью позволяет обеспечить энергией небольшой дом. Использование серии ветрогенераторов позволяет увеличить объем вырабатываемой энергии. Использование дополнительных методов получения «чистой» энергии позволит вывести здание на полное самообеспечение электроэнергией.

Решение текущих задач показало состоятельность проекта и его актуальность, в дальнейшем необходимо провести численное решение связанной задачи которая будет состоять из расчета несущей способности здания с учетом аэродинамической составляющей и параллельным расчетом ветровой установки на энергоэффективность и аэродинамические характеристики и передачу вибраций от вращения ветрогенератора.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Справочник Авиационных Профилей. [Электронный ресурс]. URL: http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic_avia_profiley.pdf (дата обращения: 12.04.2022)
2. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. Учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. – Санкт-Петербург, 2012.
3. Луцкий А.Е. Простейшая реализация метода пристеночных функций / А.Е. Луцкий, А.В. Северин. – Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2013. – № 038. – 22 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – 36 с.
5. Кожухов Ю.В. Численный эксперимент в программном комплексе ansys cfx для рабочего колеса и без лопаточного диффузора модельной центробежной компрессорной ступени средней быстроходности / Ю.В. Кожухов, Л.В. Решетникова, Г.И. Жалмурзиева // XLI Неделя науки СПбГПУ.: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. – Санкт-Петербург : изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 104 с.
6. Горлин С.М. Экспериментальная аэродинамика / С.М. Горлин. – Москва : Высшая школа, 1970. – 423 с.
7. Берг О.И. Принципы построения и элементы систем управления автономных комплексов электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О.И. Берг. – 2015. – 88 с.
8. ANSYS CFX 14.5: User's Manual / ANSYS Inc. – 2014. [Electronic resource]. URL: <http://www.ansys.com> (accessed: 12.04.2022)
9. ANSYS, Inc., "ANSYS 15 Help". – 2014. [Electronic resource]. URL: <http://www.ansys.com> (accessed: 12.04.2022)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Spravochnik Aviacionnyh Profilej [Handbook Of Aviation Profiles]. [Electronic resource]. URL: http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic_avia_profiley.pdf (accessed: 12.04.2022) [in Russian]
2. Garbaruk A.V. Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnyh techenij [Turbulence modeling in calculations of complex flows]. Textbook / A.V. Garbaruk, M.H. Strelets, M.L. Shur. – Saint Petersburg, 2012. [in Russian]
3. Lutsky A.E. Prostejshaja realizacija metoda pristenocnyh funkcij [The simplest implementation of the method of wall functions] / A.E. Lutsky, A.V. Severin. – Preprints of IPM named after M.V. Keldysh. – 2013. – № 038. – 22 p. [in Russian]
4. Schlichting G. Teorija pogranichnogo sloja [Theory of the boundary layer] / G. Schlichting. – 36 p. [in Russian]
5. Kozhukhov Y.V. Chislennyj jeksperiment v programmnom komplekse ansys cfx dlja rabocheho kola i bez lopatochnogo diffuzora model'noj centrobezhnoj kompressornoj stupeni srednej bystrohodnosti [Numerical experiment in the ansys cfx software package for an impeller and without a paddle diffuser of a model centrifugal compressor stage of medium speed] / Y.V. Kozhukhov, L.V. Reshetnikova, G.I. Zhalmurzjeva // XLI Nedelja nauki SPbGPU.: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [XLI Week of Science of St. Petersburg State University.: materials of the international scientific and practical conference]. Part III. – St. Petersburg : Publishing House of the Polytechnic. Un. – 2012. – 104 p. [in Russian]
6. Gorlin S.M. Jeksperimental'naja aerodinamika [Experimental aerodynamics] / S.M. Gorlin. – Moscow : Higher school, 1970. – 423 p. [in Russian]
7. Berg O.I. Principy postroenija i jelementy sistem upravlenija avtonomnyh kompleksov jelektrosnabzhenija na vobnovljaemyh istochnikah jenerгии [Principles of construction and elements of control systems of autonomous power supply complexes on renewable energy sources] / O.I. Berg. – 2015. – 88 p. [in Russian]
8. ANSYS CFX 14.5: User's Manual / ANSYS Inc., 2014. [Electronic resource]. URL: <http://www.ansys.com> (accessed: 12.04.2022)
9. ANSYS, Inc., "ANSYS 15 Help", 2014. [Electronic resource]. URL: <http://www.ansys.com> (accessed: 12.04.2022)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.020>

СРАВНЕНИЕ YOLO V5 И FASTER R-CNN ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИИ В ПОТОКОВОМ РЕЖИМЕ

Научная статья

Тимошкин М.С.^{1,*}, Миронов А.Н.², Леонтьев А.С.³

¹ ORCID: 0000-0003-1842-8331;

^{1,2,3} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (max030511[at]gmail.com)

Аннотация

С каждым годом проблема очередей становится все острее. Ее решение в условиях текущей эпидемиологической обстановки имеет особую значимость. В работе рассмотрена возможность решения данной проблемы при помощи информационных технологий. В качестве инструмента рассматривается машинное обучение. В данной работе рассматривается сбор и аннотирование подходящего набора данных для обучения, приводится описание наиболее распространенных моделей обнаружения объектов: YOLOv5 и Faster R-CNN, а также проводится их обучение и валидация на собранном наборе данных. Для осуществления сравнительного анализа рассматриваются основные метрики машинного обучения. На основе полученных в ходе эксперимента результатов осуществляется выбор наиболее подходящей для данной проблемы модели.

Ключевые слова: машинное обучение, обнаружение людей, Faster R-CNN, YOLOv5, обнаружение в потоковом режиме, компьютерное зрение.

COMPARISON OF YOLO V5 AND FASTER R-CNN FOR DETECTING PEOPLE IN THE IMAGE IN STREAMING MODE

Research article

Timoshkin M.S.^{1,*}, Mironov A.N.², Leontev A.S.³

¹ ORCID: 0000-0003-1842-8331;

^{1,2,3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (max030511[at]gmail.com)

Abstract

The problem of queues becomes more acute with every year. Its solution in the current epidemiological situation is of particular importance. The article analyzes the possibility of its solving with the help of information technologies. Machine learning is considered as a tool. This work studies gathering and annotating of a suitable data set for training, describes the most common object detection models: YOLOv5 and Faster R-CNN, and conducts their training and validation on the collected data set. Basic machine learning metrics are considered for comparative analysis. On the basis of the experimental results, the most appropriate model is selected.

Keywords: machine learning, detection of people, Faster R-CNN, YOLOv5, detection in streaming mode, computer vision.

Введение

Пребывание в очередях – неотъемлемая часть жизни каждого человека. По результатам опроса агентства «Русопрос» было выявлено, что общее время, которое россияне проводят в очередях, в среднем составляет 130 часов в год [1].

В результате проведенного социологического исследования была составлена диаграмма, которая показывает статистику проведенного времени людьми в очередях (см. рисунок 1).

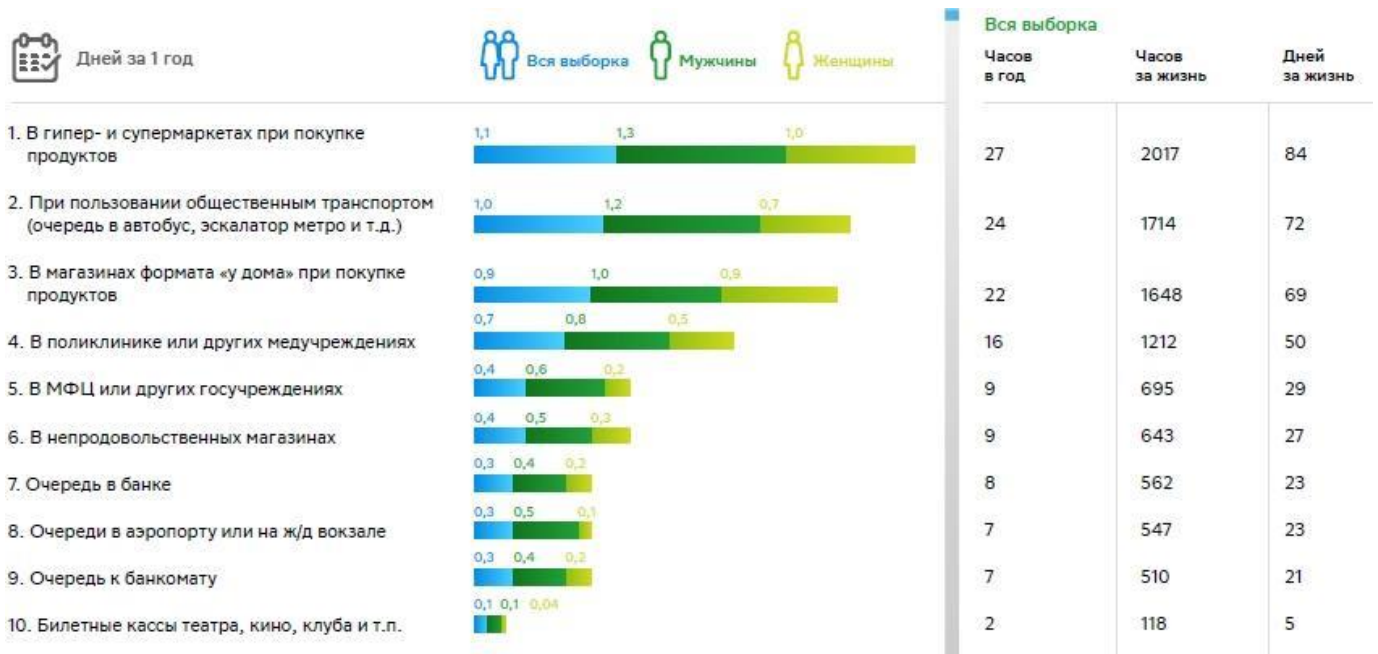


Рис. 1 – Статистика проведенного времени людьми в очередях

Имея возможность отслеживать заполненность помещений или количество людей в очередях, люди могли бы выбирать другое заведение или кассу/стойку, что позволило бы распределить нагрузку. В текущей эпидемиологической ситуации сбор подобной информации и принятие на его основе решений играют особую значимость.

На данный момент в большинстве случаев используют ручной подсчет входящих и выходящих посетителей, что позволяет своевременно открывать и закрывать вход из эпидемиологических соображений, при этом задачи подсчета очередей и информирования посетителей не выполняются.

Использование информационных технологий, машинного обучения, в частности, может решить задачу своевременного информирования о количестве посетителей, сведя участие человека к минимуму.

Технологии отслеживания объектов, основанные на глубоком обучении

Машинное обучение широко применяется в компьютерном зрении и обработке изображений [2]. Уровень развития машинного обучения и наличие разнообразных комплексных моделей могут позволить с достаточной точностью обнаруживать на изображении людей, что обеспечит возможность их подсчета. Видеопоток с заведений может быть получен с систем видеонаблюдения, которых с каждым годом становится все больше.

Точности модели будет являться одним из основных показателей, на основе которого можно сделать вывод о пригодности модели для ее практической эксплуатации. Однако с учетом специфики выявленной задачи, также стоит обратить внимание на скорость работы модели, так как необходима обработка данных в потоковом режиме. Если модель будет обрабатывать данные слишком долго, пользователи могут получить неактуальную информацию о количестве людей в помещении.

Чтобы исследовать возможность использования машинного обучения в задаче подсчета людей, были рассмотрены, обучены и протестированы главные представители двух групп моделей распознавания объектов: YOLOv5 (одноэтапный метод) и Faster R-CNN (двухэтапный метод). Была рассмотрена их скорость и точность обнаружения, чтобы определить лучшую модель для решения задачи подсчета посетителей. Обе архитектуры относятся к группе сверточных нейронных сетей.

Сверточные нейронные сети являются наиболее распространенным алгоритмом глубокого обучения, применяющим несколько сверточных слоев и вычислений [2]. Они предоставляют эффективные способы извлечения признаков, а также являются лучшим выбором для решения проблем обнаружения объектов [2].

Текущие подходы с использованием методов глубокого обучения для задач классификации и регрессии объектов можно разделить на две категории. Первая — это двухэтапные методы, которые представлены такими архитектурами как R-CNN, Fast R-CNN и Faster R-CNN. Данные методы выполняются в два этапа. Изначально используется селективный поиск или сеть региональных предположений (англ. RPN) для выделения регионов интереса – областей, с высокой вероятностью содержащих внутри себя объекты. Затем при помощи классификатора определяется класс объекта, а при помощи регрессора определяются ограничивающие рамки. Данный метод обладает высокой точностью, но при этом ограничен в скорости обнаружения. К другой категории относятся одноэтапные алгоритмы, представленные различными версиями YOLO и др. Данные алгоритмы не используют отдельную сеть для генерации регионов и основываются на методах регрессии, просматривая изображения целиком. Так как данные алгоритмы не используют RPN, скорость обнаружения выше, но точность обнаружения, в особенности малых объектов, не такая высокая, как у двухэтапных методов.

Faster R-CNN

Faster R-CNN это алгоритм обнаружения объектов, предложенный Шаоцин Рэном в 2015 году [3], который состоит из четырех частей: сеть извлечения признаков (англ. feature extraction network), сеть региональных предположений (англ. region proposal network), объединение регионов интереса (англ. RoI Pooling) и полносвязный слой. Архитектура модели Faster R-CNN представлена далее (см. рисунок 2).

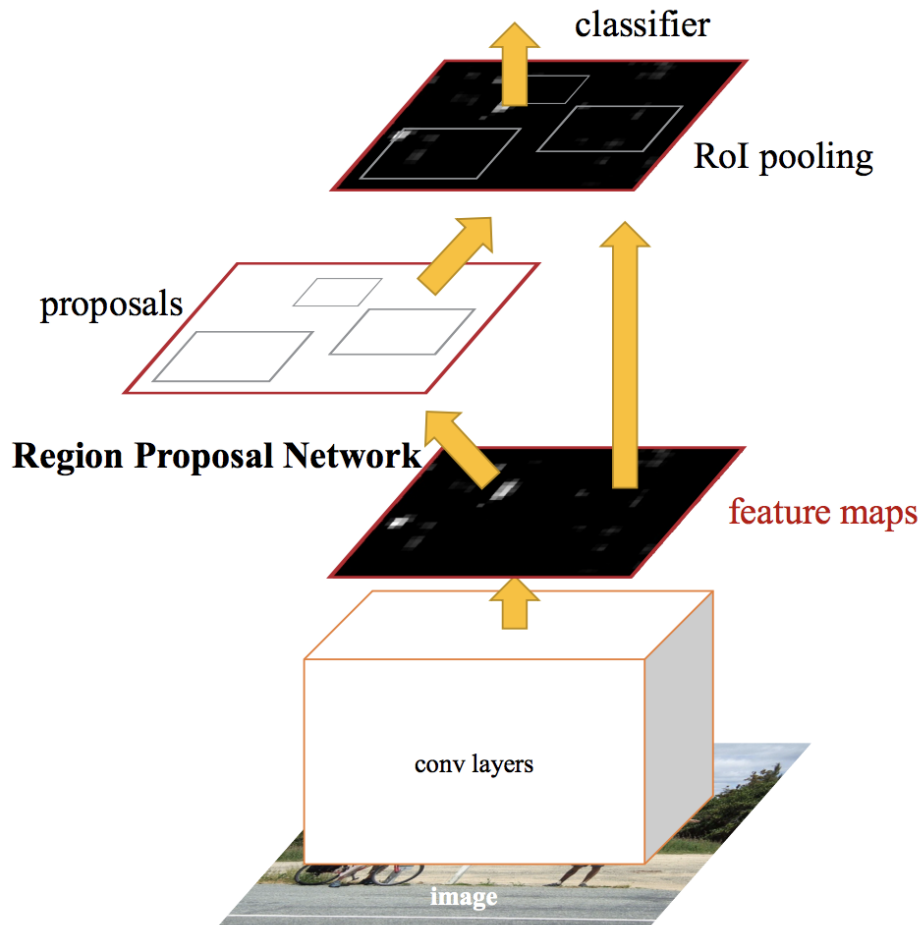


Рис. 2 – Архитектура модели Faster R-CNN

Faster R-CNN это улучшенная версия алгоритмов R-CNN и Fast R-CNN. Различие между ними в том, что алгоритм Faster R-CNN избегает использования вычислительно дорогого алгоритма селективного поиска. Вместо этого использует RPN для создания областей кандидатов. RPN позволяет определять предположения на основе признаков всего изображения за один проход, что позволяет избежать повторных вычислений и увеличивает скорость обнаружения.

YOLO v5

YOLO предлагает новую идею решения задачи обнаружения объектов за счет преобразования задачи в регрессионную [4]. YOLO – одноэтапный алгоритм глубокого обучения, который использует сверточные нейронные сети для обнаружения объектов. Существуют различные версии данного алгоритма. YOLOv1 делит изображение на ячейки размером n на n одинакового размера. Каждая ячейка сетки отвечает за обнаружение центра объекта внутри ячейки. Каждая ячейка может предсказать фиксированное количество ограничивающих рамок со значением достоверности (англ. confidence score). Каждая ограничивающая рамка включает в себя 5 значений: координата центра по оси абсцисс, координата центра по оси ординат, высота рамки, ширина рамки и значение достоверности. После определения ограничивающих рамок YOLO использует пересечение над объединением (англ. IoU), чтобы выбрать наиболее подходящие. Для удаления лишних рамок используется не максимальное подавление (англ. NMS). В YOLOv2 была добавлена пакетная нормализация (англ. batch normalization) вместе со сверточными слоями для увеличения точности и уменьшения возможности переобучения [5]. В YOLOv3 магистральная сеть извлечения признаков (англ. feature extraction backbone) Darknet19, которая плохо обнаруживала маленькие объекты, была заменена на Darknet53 для решения этой проблемы [6]. В YOLOv4 снова была заменена магистральная сеть извлечения признаков на CSPDarknet53, что значительно улучшило скорость и точность алгоритма [7]. YOLOv5 – самая облегченная версия из предыдущих, которая использует фреймворк PyTorch вместо Darknet [8]. Также в нее был добавлен новый слой фокуса (англ. focus layer), который заменил первые три слоя магистральной сети YOLOv3, что позволило увеличить скорость при минимальных потерях в точности [9]. Архитектура модели YOLOv5 представлена далее (см. рисунок 3).

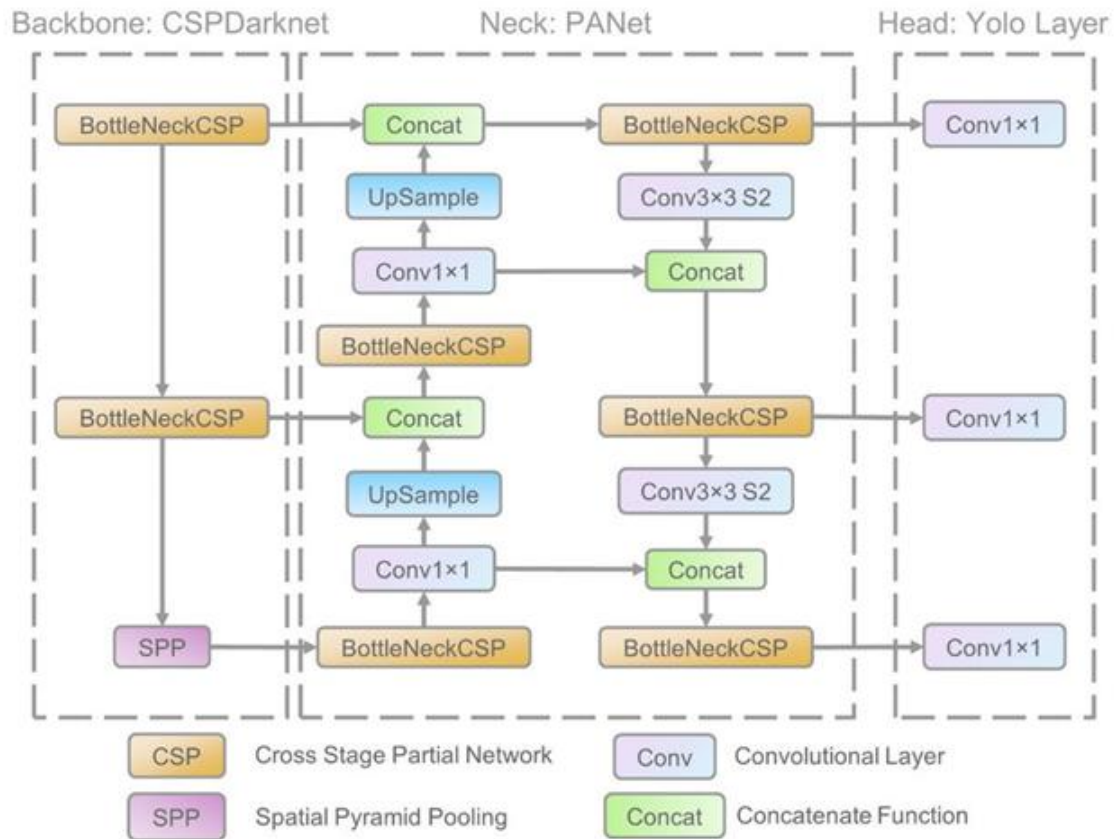


Рис. 3 – Архитектура модели YOLOv5

Подготовка обучающего набора данных

Для обучения моделей глубокого обучения требуется большая выборка изображений для получения достаточно эффективной модели. Существует множество различных наборов данных с людьми, например, COCO, CrowdHuman и др. Однако решение поставленной задачи заключается в обнаружении людей с камер видеонаблюдения, что предполагает нестандартный ракурс, отличающийся от ракурса в перечисленных выше наборах данных. Поэтому был собран собственный набор данных с камер видеонаблюдения для обучения. Были собраны изображения людей под различным углом, на различной высоте, в различных местах и с разным количеством людей для получения лучших результатов обучения. Всего было собрано 550 изображений для обучения и 105 изображений для валидации. Примеры изображений представлены далее (см. рисунок 4).

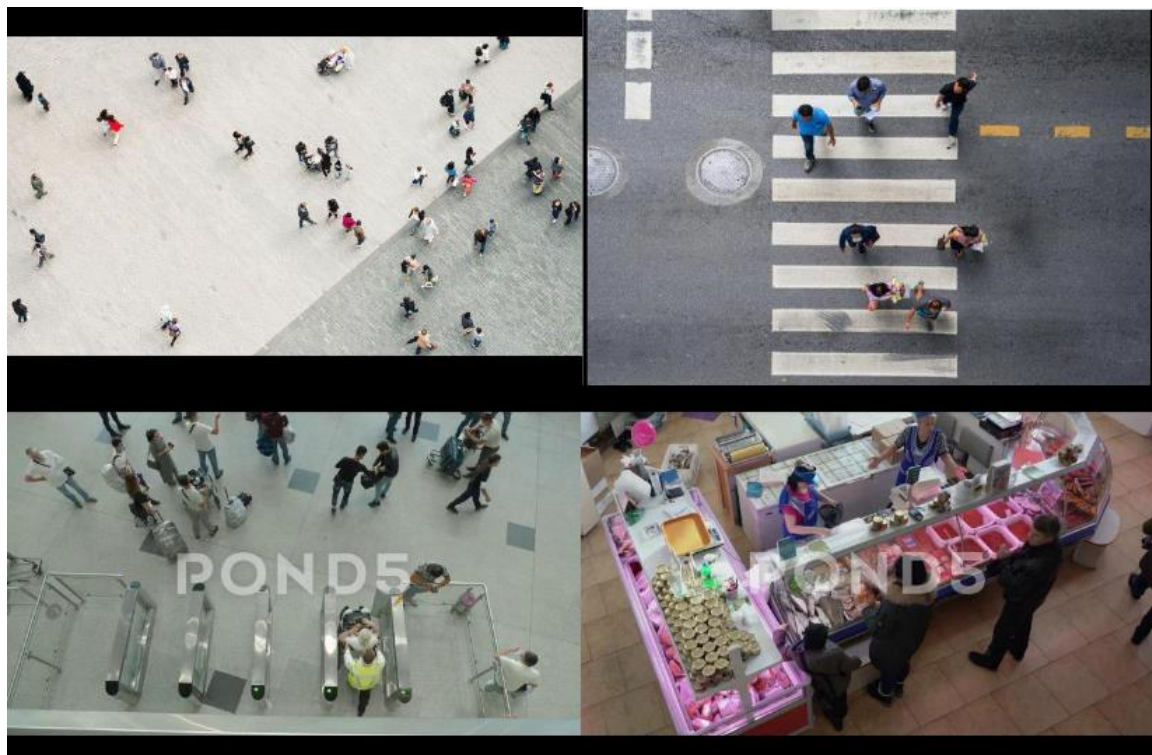


Рис. 4 – Примеры изображений обучающего набора данных

Также было собран набор данных из 573 изображений с нового местоположения для окончательной валидации моделей. Примеры изображений с данного набора данных представлены далее (см. рисунок 5).



Рис. 5 – Примеры изображений второго валидационного набора данных

Аннотирование изображений

Так как используемый метод распознавания объектов является разновидностью метода обучения с учителем, необходимо передавать модели информацию о местоположении ограничивающих рамок людей на изображении. Для этого необходимо произвести аннотирование изображений. Для выполнения этой задачи предполагается использовать Roboflow, который позволяет не только размечать изображения, но также позволяет экспортировать аннотированные наборы данных в различных форматах, что ускоряет процесс, так как YOLOv5 и Faster R-CNN имеют различные форматы аннотаций. Процесс аннотирования представлен далее (см. рисунок 6).

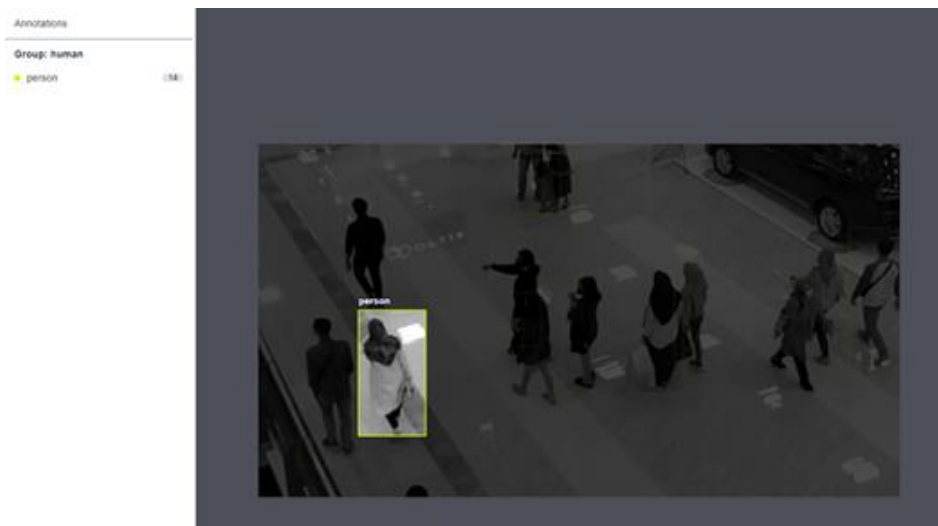


Рис. 6 – Процесс аннотирования изображения при помощи RoboFlow

Начальная конфигурация экспериментального стенда

Обучение и валидация моделей производилась на платформе Google Colab. Данная платформа обладает следующей конфигурацией: ОС Ubuntu 18.04, графический процессор NVIDIA Tesla T4, процессор Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.20ГГц. На платформе используется язык программирования Python и фреймворк PyTorch. Для обучения и валидации моделей используются библиотеки yolov5 [10] и detectron2 [11] для YOLOv5 и Faster R-CNN соответственно. Для улучшения результатов обучения были выбраны уже предобученные модели. Библиотекой yolov5 предоставляются 5 различных предобученных на наборе данных COCO моделей, которые отличаются размером, скоростью выполнения и точностью. Была выбрана YOLOv5m, так как она по сравнению с YOLOv5s имеют намного большую точность и не теряет скорости, а по сравнению с YOLOv5l имеет немного меньше точность, теряя при этом в скорости [12]. COCO – один из наиболее используемых наборов данных, включающий 330 тысячи изображений с различными объектами, включая людей. Библиотекой detectron2 предоставляется большое количество предобученных моделей на различных наборах данных. Среди моделей, предобученных на наборе данных COCO, была выбрана R101-FPN, так как она имеет достаточную точность и сохраняет при этом достаточную скорость среди всех остальных моделей [13].

Гиперпараметры обучения моделей представлены далее (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Значения гиперпараметров моделей при обучении

Параметр	Значение
Количество эпох (англ. number of epochs)	20
Размер пакета (англ. batch size)	16
Скорость обучения (англ. learning rate)	0,001
Моментум (англ. momentum)	0,9
Сокращение веса (англ. weight decay)	0,0005

Критерии оценки

Для сравнения результатов двух разных моделей глубокого обучения для обнаружения людей был применен ряд стандартных метрик, используемых для оценки моделей машинного обучения. Есть всего 4 возможных исхода при выделении ограничивающих рамок и обнаружении объекта: истинно положительные (англ. TP), истинно отрицательные (англ. TN), ложно положительные (англ. FP) и ложно отрицательные (англ. FN). TP результат означает, что модель корректно определила положительный класс. TN результат означает, что модель корректно определила отрицательный класс. FP результат означает, что модель некорректно определила положительный класс. FN результат означает, что модель некорректно определила отрицательный класс. В данной задаче одноклассового обнаружения положительным классом является человек, а отрицательным задний фон. Таким образом, TP – верное обнаружение человека, TN – верное обнаружение фона (данный показатель не используется, так как область заднего фона не выделяется при аннотировании), FP – некорректное обнаружение человека, FN – отсутствие обнаружения. Графическое объяснение представлено далее (см. рисунок 7).

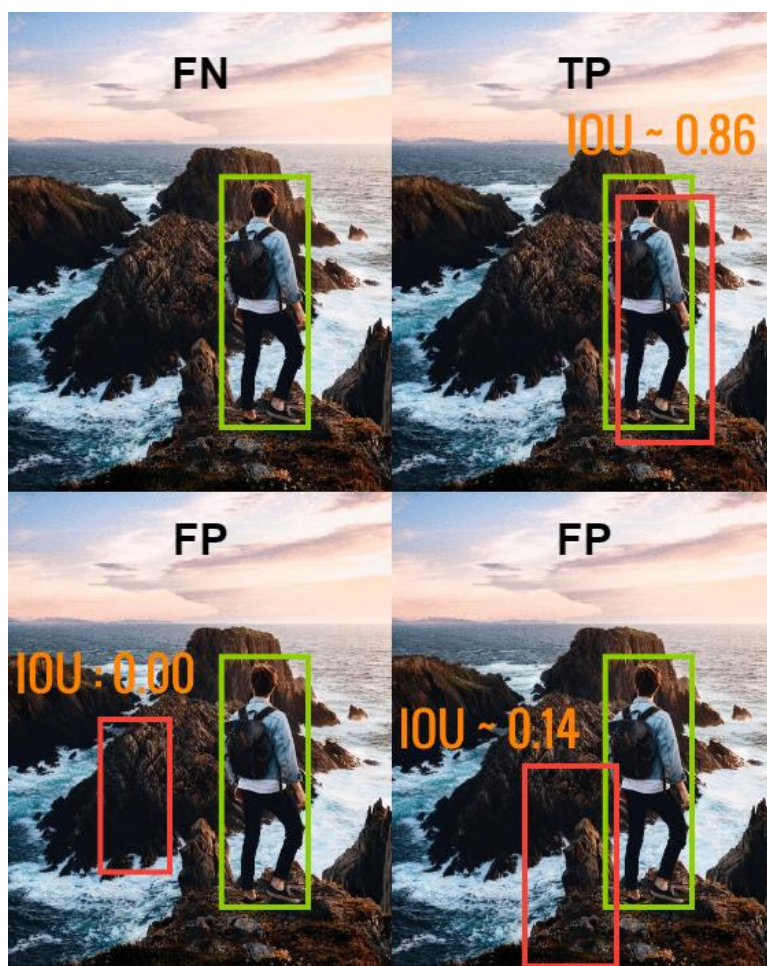


Рис. 7 – Визуальная демонстрация определений TP, FP, FN

Для определения принадлежности результата к одной из четырех групп используется метрика IoU, которая является отношением области пересечения к области объединения корректной и предсказанной ограничивающих рамок.

На основе полученных результатов TP, FP и FN подсчитываются стандартные показатели: точность (англ. precision), полнота (англ. recall) и средняя точность (англ. AP). Также рассчитывается отдельно количество кадров, которое способна обработать модель за одну секунду (англ. FPS).

Точность определяет отношение числа корректно обнаруженных объектов ко всему количеству обнаруженных объектов и вычисляется по формуле 1.

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (1)$$

Полтона определяет отношение числа корректно обнаруженных объектов ко всем объектам класса и вычисляется по формуле 2.

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (2)$$

Средняя точность определяется площадью под кривой точности-полноты и определяется по формуле 3.

$$\text{AP} = \int_0^1 p(r)dr \quad (3)$$

В формуле 3 "р" является точностью, а "r" полнотой.

Кривая точности-полноты показывает зависимость изменения точности при изменении полноты для разных пороговых значений. В данном исследовании графики кривых точности-полноты построены на основе широко используемого порогового значения IoU равного 0.6.

Средняя точность является одной из наиболее используемых метрик для определения качества модели обнаружения объектов. При этом средняя точность может включать в себя различные метрики в зависимости от IoU. Наиболее используемыми является значение AP при IoU не меньше 0.5 и среднее значение AP при пороговых значениях IoU в диапазоне от 0.5 до 0.95 с шагом 0.5, которые обозначаются AP@.5 и AP@.5:.95 соответственно.

Количество кадров в секунду — это основной показатель скорости модели. В основном считается, что показатель FPS выше 30 достаточен для выполнения обнаружения в потоковом режиме.

Сравнение результатов моделей

Размер обученных моделей YOLOv5 и Faster R-CNN составил 40.2 МБ и 230.8 МБ соответственно. После обучения модели были протестированы на первом валидационном наборе. Результаты представлены далее (см. таблицу 2, рисунки 8, 9).

Таблица 2 – Результаты валидации моделей на первом наборе данных

Архитектура	Точность, %	Полнота, %	AP@.5, %	AP@.5:.95, %	FPS, к/с
YOLOv5	93,6	93,7	96	50,2	56,5
Faster R-CNN	94,2	92,8	95,1	51	6,56

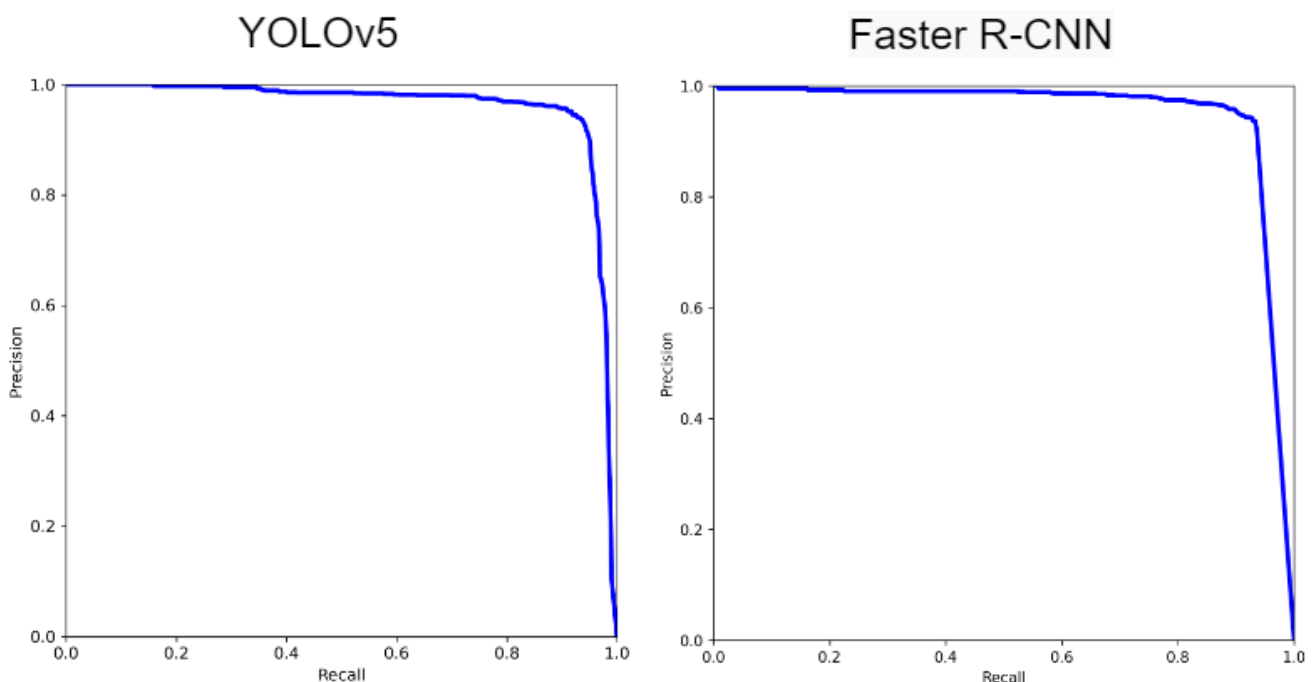


Рис. 8 – Кривые точности-полноты моделей после валидации на первом наборе данных

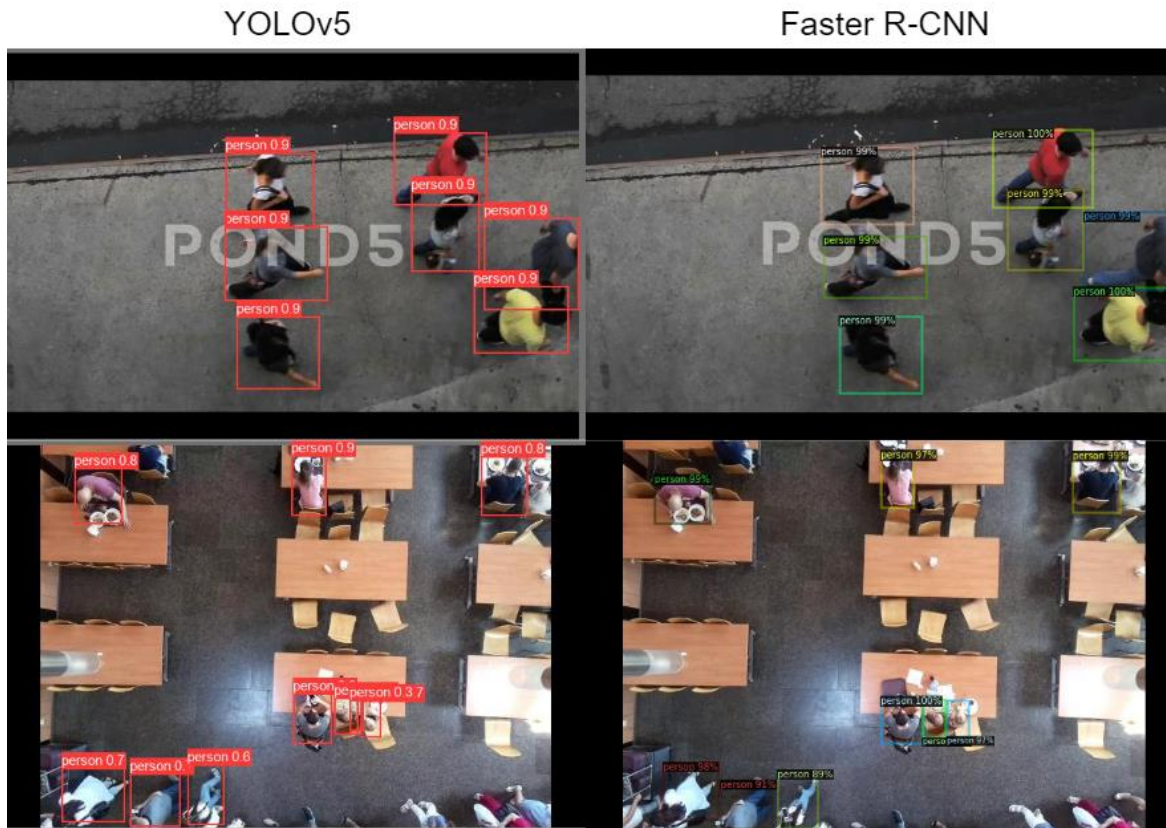


Рис. 9 – Результаты обнаружения двух моделей на первом валидационном наборе

YOLOv5 имеет показатели AP@.5 и FPS выше на 0.9% и 49.94 к/с соответственно, чем у Faster R-CNN. При этом Faster R-CNN имеет показатель AP@.5:.95 выше на 0.8%, чем у YOLOv5. Из этого можно сделать вывод, YOLOv5 быстрее справляется с обнаружением и имеет большую точность при небольшом пороговом значении IoU, а Faster R-CNN сохраняет большую точность при предсказании более совпадающих рамок.

Далее модели были протестированы на втором валидационном наборе. Результаты представлены далее (см. таблицу 3, рисунки 10, 11).

Таблица 3 – Результаты валидации моделей на втором наборе данных

Архитектура	Точность, %	Полнота, %	AP@.5, %	AP@.5:.95, %	FPS, к/с
YOLOv5	89,3	79,9	86,1	34,1	100
Faster R-CNN	89,2	81,4	87,7	40,9	6,1

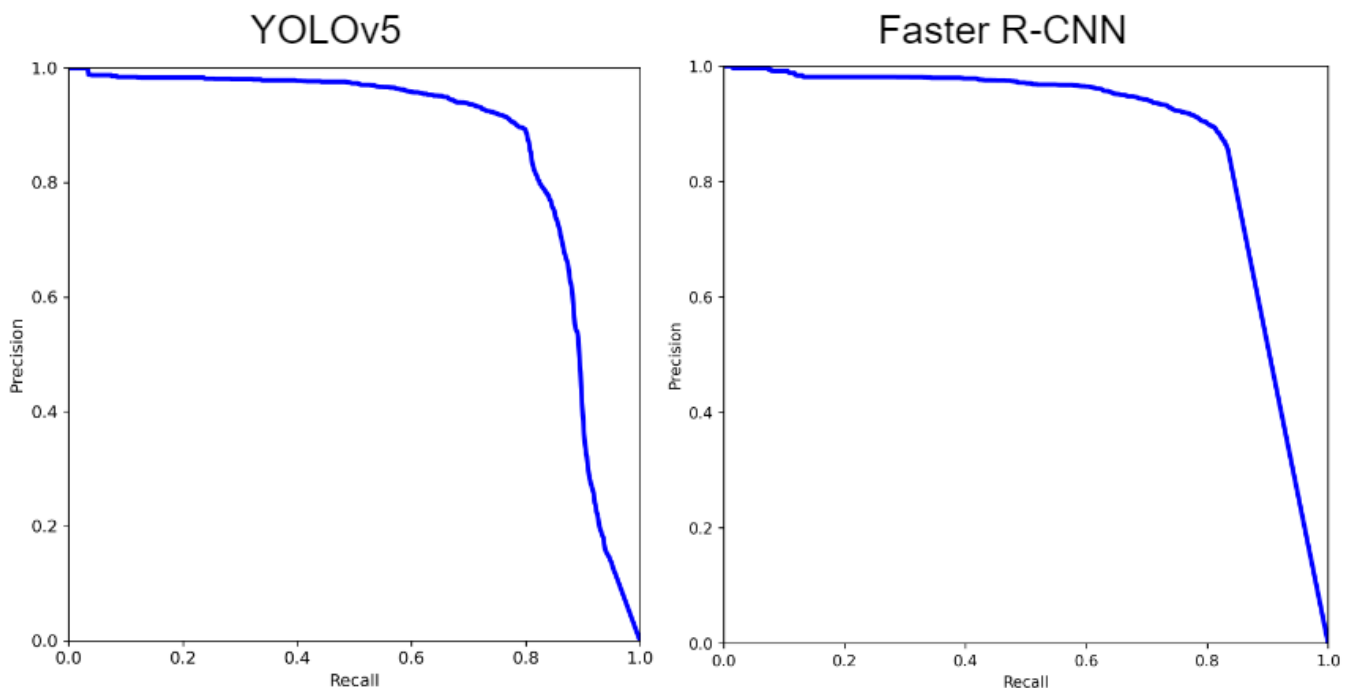


Рис. 10 – Кривые точности-полноты моделей после валидации на втором наборе данных

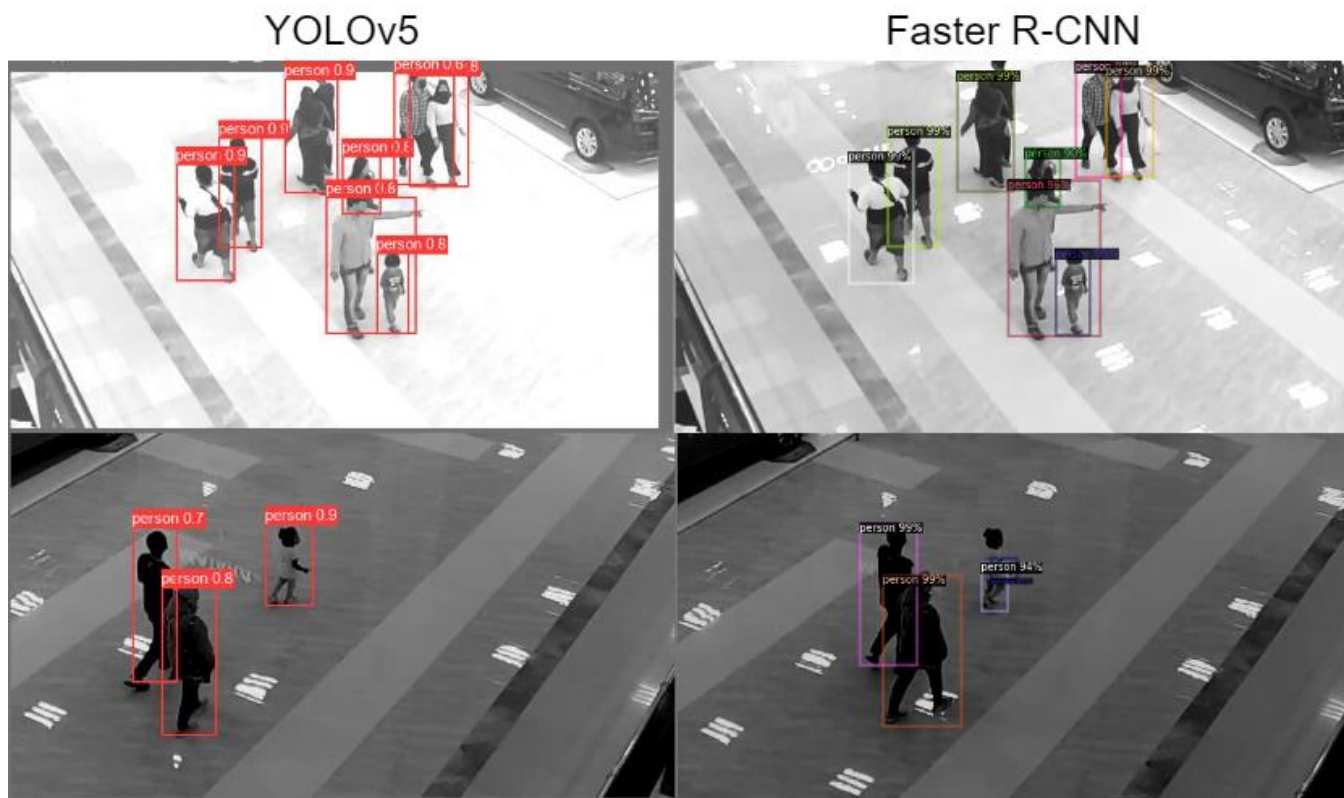


Рис. 11 – Результаты обнаружения двух моделей на втором валидационном наборе

Получив изображения с нового местоположения точность двух моделей уменьшилась, однако Faster R-CNN имеет показатель средней точности выше, чем YOLOv5 на 1.6% и 6.8% для AP@.5 и AP@.5:.95 соответственно. Из этого можно сделать вывод, что Faster R-CNN имеет более глубокое обучение, которое позволяет не так сильно терять точность при получении изображения с новой средой.

Faster R-CNN не удовлетворяет требованиям обнаружения в потоковом режиме, однако позволяет достаточно точно определять объекты в новой среде без дообучения. Данный алгоритм подходит в тех случаях, когда нужно обнаружение точных ограничивающих рамок и обнаружения в разных средах без предварительного дообучения.

YOLOv5 удовлетворяет требованиям обнаружения в потоковом режиме, при этом сохраняет достаточно высокую точность. Однако при получении изображений с другой средой может потерять точность обнаружения как при поговом значении IoU равном 0.5, так и при больших.

Заключение

В результате исследования был собран набор данных с камер видеонаблюдения и проаннотирован при помощи RoboFlow. Главные представители двух групп алгоритмов обнаружения объектов YOLOv5 и Faster R-CNN были обучены с использованием подготовленного набора данных. Экспериментальным образом были получены метрики моделей. Результаты показали, что обе модели имеют свои преимущества и недостатки, обе модели применимы для различных задач. Faster R-CNN сохраняет высокую точность при различных входных данных, но при этом имеет медленную скорость обработки, что не позволяет ее использовать для обнаружения в потоковом режиме. YOLOv5 немного теряет точность на новых наборах данных, имея AP@.5 и AP@.5:.95 на 1.6% и 6.8% соответственно, чем Faster R-CNN, однако обладает скоростью обработки в несколько раз выше, чем Faster R-CNN, что позволяет использовать ее для обработки в потоковом режиме. Несмотря на то, что YOLOv5 теряет точность на новом наборе данных, показателя AP должно быть достаточно для решения задачи подсчета посетителей в общественных заведениях, погрешность подсчета с такой точностью считается допустимой. Если взять в учет, что среда в конкретном заведении с течением времени не меняется, то можно дообучить модель для получения более точных результатов.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Николенко С.И. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. / С.И. Николенко, А.А. Кадури, Е.В. Архангельская – Санкт-Петербург : Питер, 2018. – 480 с.
2. Русопрос. Затрачиваемое в очередях время. [Электронный ресурс]. URL: <https://rusopros.com/about/articles/vremia-v-ocherediah/> (дата обращения: 10.04.2022)
3. Ren Shaoqing . Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks / Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick et al. // arXiv:1506.01497v1. – 2015. – 10 p.
4. Redmon J. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick et al. // arXiv:1506.02640v1. – 2015. – 10 p.
5. Redmon J. YOLO9000: Better, Faster, Stronger / J. Redmon, A. Farhadi // arXiv:1612.08242v1. – 2016. – 9 p.

6. Redmon J. YOLOv3: An Incremental Improvement / J. Redmon, A. Farhadi // arXiv:1804.02767v1. – 2018. – 6 p.
7. Bochkovskiy A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection / A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, H.-Y. Mark Liao // arXiv:2004.10934v1. – 2020. – 17 p.
8. Nelson J. YOLOv5 is Here: State-of-the-Art Object Detection at 140 FPS [Electronic source] / J. Nelson, J. Solawetz // RoboflowBlog. – 2020. – URL: <https://blog.roboflow.com/yolov5-is-here/> (accessed 20.04.22)
9. Jocher G. YOLOv5 Focus Layer [Electronic source] / G. Jocher // GitHub. – 2021. – URL: <https://github.com/ultralytics/yolov5/discussions/3181> (accessed 25.04.2022)
10. Jocher G. YOLOv5 documentation [Electronic source] / G. Jocher // Ultralytics. – 2020. – URL: <https://docs.ultralytics.com/> (accessed 26.04.2022)
11. Wu Y. Detectron2 documentation [Electronic source] / Y. Wu, A. Kirillov, F. Massa et al. // Detectron2. – 2019. – URL: https://detectron2.readthedocs.io/en/latest/tutorials/getting_started.html (accessed 01.05.2022)
12. Ahmed K. Smart Pothole Detection Using Deep Learning Based on Dilated Convolution [Electronic source] / K. Ahmed // Sensors. – 2021. – 22 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/357093620_Smart_Pothole_Detection_Using_Deep_Learning_Based_on_Dilated_Convolution. (Date of application: 02.05.2022)
13. Wu Y. Detectron2 Model Zoo and Baselines [Electronic source] / Y. Wu // GitHub. – 2021. – URL: https://github.com/facebookresearch/detectron2/blob/main/MODEL_ZOO.md (accessed 04.05.2022)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Nikolenko S.I. Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir nejronny'x setej. [Deep learning. Loading into the world of neural networks.] / S.I. Nikolenko, A.A. Kadurin, E.V. Arxangel'skaya – Saint Petersburg : Piter, 2018. – 480 p. [in Russian]
2. Rusopros. Zatrachivaemoe v ocheredjah vremja. [Time spent in queues.] [Electronic resource]. URL: <https://rusopros.com/about/articles/vremia-v-ocherediah/>. (accessed 10.04.2022) [in Russian]
3. Ren Shaoqing . Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks / Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick et al. // arXiv:1506.01497v1. – 2015. – 10 p.
4. Redmon J. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick et al. // arXiv:1506.02640v1. – 2015. – 10 p.
5. Redmon J. YOLO9000: Better, Faster, Stronger / J. Redmon, A. Farhadi // arXiv:1612.08242v1. – 2016. – 9 p.
6. Redmon J. YOLOv3: An Incremental Improvement / J. Redmon, A. Farhadi // arXiv:1804.02767v1. – 2018. – 6 p.
7. Bochkovskiy A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection / A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, H.-Y. Mark Liao // arXiv:2004.10934v1. – 2020. – 17 p.
8. Nelson J. YOLOv5 is Here: State-of-the-Art Object Detection at 140 FPS [Electronic source] / J. Nelson, J. Solawetz // RoboflowBlog. – 2020. – URL: <https://blog.roboflow.com/yolov5-is-here/> (accessed 20.04.22)
9. Jocher G. YOLOv5 Focus Layer [Electronic source] / G. Jocher // GitHub. – 2021. – URL: <https://github.com/ultralytics/yolov5/discussions/3181> (accessed 25.04.2022)
10. Jocher G. YOLOv5 documentation [Electronic source] / G. Jocher // Ultralytics. – 2020. – URL: <https://docs.ultralytics.com/> (accessed 26.04.2022)
11. Wu Y. Detectron2 documentation [Electronic source] / Y. Wu, A. Kirillov, F. Massa et al. // Detectron2. – 2019. – URL: https://detectron2.readthedocs.io/en/latest/tutorials/getting_started.html (accessed 01.05.2022)
12. Ahmed K. Smart Pothole Detection Using Deep Learning Based on Dilated Convolution [Electronic source] / K. Ahmed // Sensors. – 2021. – 22 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/357093620_Smart_Pothole_Detection_Using_Deep_Learning_Based_on_Dilated_Convolution. (Date of application: 02.05.2022)
13. Wu Y. Detectron2 Model Zoo and Baselines [Electronic source] / Y. Wu // GitHub. – 2021. – URL: https://github.com/facebookresearch/detectron2/blob/main/MODEL_ZOO.md (accessed 04.05.2022)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ / SCIENCE ABOUT THE EARTH

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.021>ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ИСКУССТВЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ
(*LARIX SIBIRICA LEDEB*) В РУДНОМ АЛТАЕ

Научная статья

Алипов Б.А.¹, Калачев А.А.², Залесов С.В.^{3,*}¹ ORCID: 0000-0002-3912-8410;² ORCID: 0000-0002-4444-0193;³ ORCID: 0000-0003-3779-410X;¹ КГУ «Малоубинское ЛХ», Быструха, Казахстан;² Алтайский филиал ТОО КазНИИЛХА им. Букейхана, Ридер, Казахстан;³ Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

* Корреспондирующий автор (Zalesov[at]m.usfeu.ru)

Аннотация

По материалам девяти пробных площадей проанализированы таксационные показатели искусственных лиственничных насаждений на Рудном Алтае (Восточная часть Республики Казахстан). Установлено, что в возрасте 33-51 год искусственные лиственничники характеризуются средним запасом древесины от 165 до 314 м³/га. Экспериментально доказана эффективность создания лесных культур лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). В условиях Рудного Алтая данная порода позволяет сформировать насаждения Ia-II классов бонитета в зависимости от типа лесорастительных условий.

При выращивании искусственных лиственничников примесь сопутствующих пород, как правило, не превышает одной единицы в формуле состава. Средняя высота деревьев варьируется в пределах пробных площадей от 13,4 до 22,0 м, а средние диаметры на высоте 1,3 м от 18,0 до 26,0 см.

Научно обоснована целесообразность увеличения доли искусственных лиственничников в покрытой лесной растительностью площади на Рудном Алтае. Последнее позволит помимо получения высококачественной ценной древесины создать противопожарные барьеры и тем самым облегчить борьбу с лесными пожарами.

Ключевые слова: Республика Казахстан, Рудный Алтай, лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), лесные культуры, искусственные насаждения.

YIELD CAPACITY OF ARTIFICIAL SIBERIAN LARCH (*LARIX SIBIRICA LEDEB*)
PLANTING IN RUDNY ALTAI

Research article

Alipov B.A.¹, Kalachev A.A.², Zalesov S.V.^{3,*}¹ ORCID: 0000-0002-3912-8410;² ORCID: 0000-0002-4444-0193;³ ORCID: 0000-0003-3779-410X;¹ «Maloubinskoe forestry», Bystruha, Kazakhstan;² Altai branch of Kazakh Research Institute of Forestry and Silvicultural Reclamation named after A.N.Bukeihan, Ridder, Kazakhstan;³ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

* Corresponding author (Zalesov[at]m.usfeu.ru)

Abstract

Based on the materials of nine test areas, the taxonomic rates of artificial larch planting in Rudny Altai (Eastern part of the Republic of Kazakhstan) have been analyzed. Artificial larch trees were established to have an average wood supply of between 165 and 314 m³/ha between the ages of 33 and 51. The effectiveness of forest cultures creation of the Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) was experimentally proved. In the Rudny Altai, this breed allows forming plantations of Ia-II classes of bonitet depending on the type of forest growth conditions.

In the process of artificial larch growing, the element of the associated breed usually does not exceed one unit in the composition formula. The average height of the trees varies from 13.4 to 22.0 m. in the test area, and the average diameter at 1.3 m. varies at the height from 18.0 to 26.0 cm.

The expediency of increasing the share of artificial larch trees in the forest vegetation area in Rudny Altai has been scientifically substantiated. The latter will, in addition to obtaining high-quality wood, create fire barriers and thus contribute to the fight against forest fires.

Keywords: Republic of Kazakhstan, Rudny Altai, Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), forest cultures, artificial planting.

Введение

Одной из наиболее перспективных древесных пород, произрастающих в Российской Федерации, является лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). Общая площадь лиственничных лесов составляет около 250 млн га [1]. При этом на территории Якутии на долю лиственничников приходится 88 % покрытой лесной растительностью площади. В лесном фонде РФ лиственница является доминирующей древесной породой и по праву может считаться национальным деревом России.

Большой интерес проявляется к лиственнице сибирской и в Республике Казахстан [2], [3]. При этом учеными ведутся попытки выращивания искусственных лиственничных насаждений на бывших сельскохозяйственных угодьях [4], [5], а также проводятся опыты переформирования производных березовых насаждений в коренные лиственничники [6].

Интересный опыт получен по созданию лиственничников на месте березняков, погибших в результате поражения бактериальной водяной. Экспериментально доказана возможность выращивания в данных условиях высокопроизводительных лиственничных насаждений [7], [8].

Причина столь внимательного отношения к лиственнице объясняется тем, что данная древесная порода, обладая быстрым ростом, формирует высокопроизводительные насаждения с запасом до 1500 м³/га [1]. Кроме того, формируя плотный опад из мелкой, ежегодно опадающей хвои и имея ажурную крону, полосы из лиственницы служат надежным противопожарным барьером, обеспечивающим остановку верховых и низовых пожаров [9], [10].

К сожалению, увеличению доли искусственных насаждений с преобладанием лиственницы в составе древостоев препятствует отсутствие объективных данных о производительности указанных насаждений в конкретном регионе. Указанное определило направление наших исследований.

Цель, объекты и методика исследований

Целью работы являлся анализ продуктивности искусственных лиственничных древостоев в условиях Рудного Алтая.

Объектом исследований служили искусственные лиственничники Рудного Алтая в возрасте 33-51 год. Район исследований расположен в восточной части Республики Казахстан.

Климат района исследований резко континентальный. При этом для Рудного Алтая характерно избыточное увлажнение при незначительном количестве тепла. Среднегодовое количество осадков составляет 650 мм. Горный рельеф местности обуславливает четыре его группы: высокогорный, среднегодовой, низкогорный и межгорных долин.

Для Рудного Алтая характерно наличие вертикальной поясности растительности. С поднятием вверх наблюдается снижение температуры воздуха и атмосферного давления, увеличение количества атмосферных осадков, инсоляции и излучение тепла земной поверхностью, а также возрастание интенсивности ультрафиолетовой радиации.

В лесном фонде района исследований доминирует пихта, на долю насаждений с преобладанием которой приходится 90,1 % общей площади хвойных насаждений. Другими словами, в регионе доминирует черневая тайга. Однако с увеличением высоты над уровнем моря на 1000 м и более пихта сибирская, как более теплолюбивая порода, уступает место менее требовательной к лесорастительным условиям лиственнице сибирской, которая формирует на горных склонах коренные лиственничники. К сожалению, из-за лесных пожаров и широко распространенных в прошлом сплошно-лесосечных рубок лиственничники, как и пихтарники, на значительной площади сменились на производные мягколиственных насаждения, уступающие коренным по производительности и биологическому разнообразию.

На долю мягколиственных насаждений в регионе приходится 41,4 % покрытой лесной растительностью площади. При этом 92,8 % насаждений с преобладанием березы и осины являются производными, то есть сформировались на месте коренных хвойных насаждений после лесных пожаров и сплошнолесосечных рубок. Высокая доля производных мягколиственных насаждений вызывает необходимость замены их хвойным насаждением путем создания, в частности, лесных культур.

При обследовании и изучении искусственных лиственничных насаждений был использован метод пробных площадей (ПП). Последние закладывались в соответствии с рекомендациями, прошедшими широкую апробацию [11], [12]. В частности, размер ПП обеспечивал определение среднего диаметра элемента леса с точностью 95 %. Для сравнения таксационных показателей древостоев ПП средний диаметр деревьев на высоте 1,3 м определялся как среднее арифметическое обмера всех деревьев на ПП. Для определения средней высоты у 30-35 модельных деревьев производился замер высот с использованием высотомера финской фирмы «Suunto». При этом отбор модельных деревьев производился после перечета всех деревьев на ПП пропорционально их распределению по ступеням толщины. Средний возраст устанавливался по книге учета лесных культур. Запас древесины по таблицам объемов на основе перечета деревьев по ступеням толщины и кривой высот.

Материалы и обсуждение

Одним из путей расширения биологического разнообразия и повышения продуктивности лесов является создание на вырубках искусственных насаждений. Объектом наших исследований являлись искусственные лиственничные насаждения, созданные 33-51 год назад на высоте 943-1357 м над уровнем моря.

Лесные культуры создавались на склонах различной экспозиции крутизной 5-15°. На момент проведения исследований подрост в обследованных искусственных насаждениях отсутствовал, а подлесок был представлен редкими экземплярами спиреи (*Spiraea* L.), смородины красной (*Ribes pulchellum* Turcz.), шиповника (розы) собачьей (*Rosa canina* L.), черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.), жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.), рябины сибирской (*Sorbus sibirica* Hedl.), бузины сибирской (*Sambucus sibirica* Nakai), караганы древовидной (*Caragana arborescens* Lam.). Анализируя данные о подлеске, можно отметить, что на склонах северной экспозиции и равнинах он, как правило, более густой, на северо-восточных и северо-западных – средней густоты, а на ПП-2, 6 и 7 в чистых лиственничниках на высоте 1000 м и более над уровнем моря встречаются лишь единичные экземпляры подлеска.

Живой почвенный покров на всех ПП густой. Он представлен злаками (*Gramineae* Juss.) и разнотравьем: герань лесная (*Geranium sylvaticum* L.), фиалка трехцветная (*Viola tricolor* L.), земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), подмаренник (*Galium* L.), медуница неясная (*Pulmonaria obscura* Dumort.) чина Гмелина (*Lathyrus gmelinii* Fritsch.), лютик едкий (*Rakunculus acris* L.), борец высокий (*Aconitum tyocotonum* L.), купальница алтайская (*Trollius altaicus* C.A. Mey.) и др.

Все исследованные искусственные лиственничные насаждения созданы посадкой 2-летних сеянцев в дно плужных борозд. Ширина междурядий варьировала от 2 до 6 м, а расстояние между сеянцами в рядах от 0,8 до 1,2 м.

Выполненные исследования показали высокие таксационные показатели лиственничных насаждений на всех пробных площадях (табл. 1).

Таблица 1 – Таксационная характеристика насаждений пробных площадей по изучению искусственных лиственничников Рудного Алтая

№ ПП	Состав	Средние			Полнота	Запас, м ³ /га	Бонитет	Тип леса	Густота, шт./га	ВНУМ, м
		возраст, лет	высота, м	диаметр, см						
1	10Л	33	16,2±0,44	20,3±0,48	0,88	232	Ia	ЛТ	842	943
2	10Л	39	18,4±0,57	19,4±0,35					967	
	+Б	20	10,0	14,7					108	
	Итого		18,4		0,83	260	Ia	ЛТ	1075	1000
3	10Л	51	22,0±0,71	25,8±0,41	0,77	315	Ia	ЛТ	574	1035
4	9Л	42	17,3±0,60	18,0±0,43		208			896	
	1Б	40	17,5	24,0		20			104	
	+С	40	17,0	16,4		5			25	
	Итого				0,72	233	I	ЛТ	1025	1260
5	9Л	49	20,1±0,76	26,0±0,65		284			545	
	0,5Ос	25	18,0	22,0		15			16	
	0,5Б	21	15,0	18,0		17			68	
	едП	28	13,0	12,0		6			45	
	Итого		19,7		0,79	322	I	ЛТ	674	1040
6	10Л	42	18,1±0,67	18,0±0,38	0,99	307	Ia	ЛТ	1306	1164
7	10Л	38	20,8±0,68	22,5±0,44	0,83	314	Ia	ЛТ	759	1140
8	9Л	34	16,9±0,60	18,5±0,52					1128	
	1Б	21	15,0	10,0					300	
	Итого		16,7		0,98	278	Ia	ЛТ	1428	969
9	10Л	36	13,4±0,29	18,1±0,39	0,82	165	II	ЛСА	904	1357

Примечание: Л – лиственница сибирская, Б – береза; Ос – осина; С – сосна; ВНУМ – высота над уровнем моря

Древостой всех ПП характеризуются хорошим состоянием и I-Ia классами бонитета. Исключение составляет лишь ПП-9, заложенная на высоте 1357 м над уровнем моря. Древостой на этой ПП характеризуется II классом бонитета, но и на ПП-9 состояние древостоев хорошее (рис. 1).



Рис. 1 – Внешний вид 36-летнего лиственничного древостоя, произрастающего на высоте 1357 м над уровнем моря (ПП-9)

Как следует из материалов таблицы, запас искусственных лиственничных древостоев на момент обследования варьируется от 165 до 322 м³/га. Однако, учитывая разницу в возрасте древостоев, в качестве более объективного показателя роста искусственных лиственничных древостоев лучше использовать средний годовой прирост по запасу за весь срок выращивания. Расчеты показали, что указанный показатель в насаждениях, создаваемых на высоте 900-1300 м над уровнем моря варьируется от 5,5 до 8,3 м³/га. Другими словами, средний прирост искусственных насаждений лиственницы значительно превышает таковой у других древесных пород в районе исследований.

С поднятием на высоту более 1300 м прирост лиственничников снижается до 4,6 м. Последнее легко можно объяснить более жесткими лесорастительными условиями.

Уменьшение густоты лиственничных древостоев способствует увеличению среднего диаметра на высоте 1,3 м. При этом на всех ПП древостои характеризуются хорошим санитарным состоянием и высокой полндревесностью (рис. 2).



Рис. 2 – Внешний вид лиственничника на высоте 1140 м над уровнем моря (ПП-7)

Учитывая высокое светолюбие лиственницы сибирской, необходимо в искусственных лиственничниках проводить прочистки с целью снижения густоты с таким расчетом, чтобы к 35-40 годам густота древостоя не превышала 750 шт./га. Проведение указанных рубок позволит минимизировать отпад деревьев и накопление напочвенных горючих материалов.

Кроме того, учитывая быстрый рост лиственницы сибирской, можно рекомендовать формирование из нее противопожарных барьеров шириной 150-300 м, что позволит облегчить борьбу с верховыми пожарами без ущерба для общей продуктивности лесов.

Выводы

1. Лиственница сибирская является одной из перспективных древесных пород для лесовосстановления в Рудном Алтае.
2. Искусственные лиственничники можно создавать после вырубki производных мягколиственных насаждений, увеличивая тем самым долю хвойных насаждений в лесном фонде.
3. Посадки лиственницы целесообразно вести в высотном поясе от 900 до 1300 м над уровнем моря, где искусственные лиственничники формируют средний прирост от 5,5 до 8,3 м³/га.
4. В целях создания противопожарных барьеров посадки лиственницы целесообразно создавать замкнутыми полосами шириной 150-300 м, что позволит переводить возможные верховые пожары в низовые и легко ликвидировать последние.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

Non declared.

Список литературы / References

1. Мерзленко М.Д. Лесные культуры лиственницы на европейской территории России / М.Д. Мерзленко, Н.А. Бабич. – Архангельск : САФУ, 2021. – 128 с.
2. Крекова Я.А. Рост интродуцированных видов лиственниц (*Larix Mill*) в Северном Казахстане / Я.А. Крекова, С.В. Залесов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 9(75). – Ч. 2. – С. 21–25. DOI: 10.23670/IRJ.2018.75
3. Крекова Я.А. Интродукция и акклиматизация хвойных в Северном Казахстане / Я.А. Крекова, С.В. Залесов. – Нур-Султан : КазНИИЛХА, 2020. – 212 с.
4. Залесов С.В. Рост лиственничных древостоев на бывших пашнях / С.В. Залесов, Е.В. Юровских, Л.А. Белов и др. // Аграрный вестник Урала. – 2015. – № 5(135). – С. 50–54.

5. Zalesov S.V. Effectiveness of larch stands creation on former agricultural lands / S.V. Zalesov, A.G. Magasumova, A.S. Opletaev // *Ecological Agriculture and sustainable development: Research Development Center*. – 2019. – № 1. – P. 69–76.
6. Оплетаев А.С. Переформирование производных мягколиственных насаждений в лиственничники на Южном Урале. / А.С. Оплетаев, С.В. Залесов. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – 178 с.
7. Платонов Е.П. Замена березняков, пораженных бактериальной водяной / Е.П. Платонов, А.В. Данчева, С.В. Залесов // *Московский экономический журнал*. – 2019. – № 11. – С. 208–221. DOI: 10.24411/2413-046x-2019-10160
8. Суяндиков Ж.О. Высокоэффективное лесоразведение в условиях ковыльной степи Северного Казахстана: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. / Ж.О. Суяндиков – Екатеринбург, 2015. – 20 с.
9. Марченко В.П. Горимость ленточных боров Прииртышья и пути ее минимизации на примере ГУ ГЛПР «Ертыс орманы» / В.П. Марченко, С.В. Залесов // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2013. – № 10(108). – С. 55–59.
10. Залесов С.В. Лесная пирология / С.В. Залесов. – Екатеринбург : Баско, 2006. – 312 с.
11. Данчева А.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения / А.В. Данчева, С.В. Залесов. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, – 2015. – 152 с.
12. Бунькова Н.П. Основы фитомониторинга / Н.П. Бунькова, С.В. Залесов, Е.С. Залесова и др. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, – 2020. – 90 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Merzlenko M.D. Lesnye kul'tury listvennicy na evropejskoj territorii Rossii [Forest plantations of larch in the European territory of Russia] / M.D. Merzlenko, N.A. Babich. – Arhangel'sk : SAFU, 2021. – 128 p. [in Russian]
2. Krekova YA.A. Rost introducirovannyh vidov listvennic (*Larix Mill*) v Severnom Kazahstane [Growth of introduced larch species (*Larix Mill*) in Northern Kazakhstan] / Y.A. Krekova, S.V. Zalesov // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]*. – 2018. – № 9(75). – Vol. 2. – P. 21–25. DOI: 10.23670/IRJ.2018.75 [in Russian]
3. Krekova YA.A. Introdukcija i akklimatizacija hvojnih v Severnom Kazahstane [Introduction and acclimatization of conifers in Northern Kazakhstan] / Y.A. Krekova, S.V. Zalesov. – Nur-Sultan : KazNIILHA, 2020. – 212 p. [in Russian]
4. Zalesov S.V. Rost listvennichnyh drevostoev na byvshih pashnyah [Growth of larch stands on former arable land] / S.V. Zalesov, E.V. Yurovskih, L.A. Belov, et al. // *Agrarnyj vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]* – 2015. – №5 (135). – P. 50–54. [in Russian]
5. Zalesov S.V. Effectiveness of larch stands creation on former agricultural lands / S.V. Zalesov, A.G. Magasumova, A.S. Opletaev // *Ecological Agriculture and sustainable development: Research Development Center* – 2019. – № 1. – P. 69–76.
6. Opletaev A.S. Pereformirovanie proizvodnyh myagkolistvennyh nasazhdenij v listvennichniki na Yuzhnom Urale. [Reformation of derived soft-leaved plantations into larch stands in the Southern Urals.] / A.S. Opletaev, S.V. Zalesov. – Ekaterinburg : Ural. Gos. lesotekhn. un-t, 2014. – 178 p. [in Russian]
7. Platonov E.P. Zamena bereznyakov, porazhennyh bakterial'noj vo-dyankoj [Replacement of birch forests affected by bacterial dropsy] / E.P. Platonov, A.V. Dancheva, S.V. Zalesov // *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal [Moscow Economic Journal]*. – 2019. – № 11. – P. 208–221. DOI: 10.24411/2413-046h-2019-10160 [in Russian]
8. Suyundikov Z.O. Vysokoeffektivnoe lesorazvedenie v usloviyah kovyl'noj stepi Severnogo Kazahstana [Highly efficient afforestation in the conditions of the feather grass steppe of Northern Kazakhstan] : Avtoref. dis. ... of PhD in Agricultural Sciences. / Z.O. Suyundikov – Ekaterinburg, 2015. – 20 p. [in Russian]
9. Marchenko V.P. Gorimost' lentochnyh borov Priirtysh'ya i puti ee minimizacii na primere GU GLPR «Ertys ormany» [Combustibility of tape forests in the Irtysh region and ways to minimize it on the example of the GU GLPR "Ertys ormany"] / V.P. Marchenko, S.V. Zalesov // *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]*. – 2013. – № 10(108). – P. 55–59. [in Russian]
10. Zalesov S.V. Lesnaya pirologiya [Forest Pyrology] / S.V. Zalesov. – Ekaterinburg : Basko, 2006. – 312 p. [in Russian]
11. Dancheva A.V. Ekologicheskij monitoring lesnyh nasazhdenij re-kreacionnogo naznacheniya [Ecological monitoring of recreational forest plantations] / A.V. Dancheva, S.V. Zalesov. – Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2015. – 152 p. [in Russian]
12. Bun'kova N.P. Osnovy fitomonitoringa [Fundamentals of phytomonitoring] / N.P. Bun'kova, S.V. Zalesov, E.S. Zalesova et al. – Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2020. – 90 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.022>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЛЯМИ СВОБОДНЕНСКОГО РАЙОНА АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

Научная статья

Липина Л.Н.^{1,*}, Жукова Н.В.²

¹ ORCID: 0000-0003-0725-5017;

² ORCID: 0000-0001-5692-3806;

^{1,2} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

* Корреспондирующий автор (010889[at]pnu.edu.ru)

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос о создании благоприятного инвестиционного климата для инвесторов в Свободненском районе Амурской области на которой действует особый правовой режим предпринимательской деятельности. В статье представлен анализ состояния земель Свободненского района с целью выявления территорий для развития инвестиционных проектов региона. Рассмотрены предложения по совершенствованию управления землями ТЕР «Свободный». Недостаток земель промышленности требует проведение работ по разработке и реализации проектов перераспределения земель Свободненского района. В статье предложены варианты размещения объектов инвестиционных площадок «Центр» и «Восток» с изъятием земель разных форм собственности и категорий.

Ключевые слова: Свободненский район, муниципальный район, земельный фонд, инвестиционные проекты.

IMPROVEMENT OF LAND MANAGEMENT IN THE SVOBODNENSKY DISTRICT IN THE AMUR OBLAST

Research article

Lipina L.N.^{1,*}, Zhukova N.V.²

¹ ORCID: 0000-0003-0725-5017;

² ORCID: 0000-0001-5692-3806;

^{1,2} Pacific National University, Khabarovsk, Russia

* Corresponding author (010889[at]pnu.edu.ru)

Abstract

The article analyzes the issue of creating a favorable investment climate in the Svobodnensky district in the Amur Oblast, where a special legal regime of entrepreneurial activity is applied. The work presents an analysis of the land state in the Svobodnensky district with the aim to establish territories for the investment projects development. Projects on land management improvement in the «Svobodnyj» territory were researched. The shortage of industrial land requires the development and implementation of projects for land redistribution in the district. The article proposes variants on investment platforms «Centr» and «Vostok» placement with withdrawal of land of different forms of ownership and categories.

Keywords: the Svobodnensky district, municipal district, land reserves, investment projects.

Введение

Современное развитие экономики региона неразрывно связано с инвестиционными процессами. Известно, что важнейшими направлениями по формированию благоприятного инвестиционного климата являются: модернизация условий, созданных для ведения предпринимательской и инвестиционной деятельности; снижение административных барьеров для ведения бизнеса; формирование благонадежного инвестиционного имиджа муниципального образования [1]. Повышение инвестиционной привлекательности, даже совсем незначительное – это привлечение дополнительных средств, позволяющие прямо или косвенно быть источником пополнения доходной части бюджета.

Объект исследования – земли Свободненского района Амурской области. Ключевым аспектом исследования является определение основных факторов выбора земельных участков для реализации инвестиционной политики в регионе. Экономическое развитие района возможно, лишь совместными усилиями Администрации района, органов местного самоуправления поселений, руководителей федеральных структур, предприятий и организаций района путем управления процессом повышения инвестиционной привлекательности, стремясь к наиболее полной реализации объективных возможностей территории и условий деятельности предприятий.

На территории муниципального образования Свободненский район в настоящее время осуществляются крупные инвестиционные проекты:

- строительство магистрального газопровода «Сила Сибири», протяженность трубопровода 640 км, срок реализации 2015-2022 г.;
- территория опережающего развития «Свободный», срок реализации 2016-2086 годы [2].

Земельный фонд

Свободненский район расположен на юго-западе Амурско-Зейской равнины. Район граничит в северо-западной части Амурской области и с запада с КНР, с севера с Шимановским районом, с востока по реке Зeya – с Мазановским и Серышевским районами и с юга – с Благовещенским районом Амурской области [3], [4]. Территория Свободненского района составляет 731, 858 тыс. га, на которой находятся 15 сельских поселений (табл.1).

Таблица 1– Сельские поселения Свободненского района Амурской области на 01.01.2020

Наименование сельсовета	Административный центр
1. Дмитриевский	с. Дмитриевка
2. Желтоярровский	с. Желтоярово
3.Черновский	с. Черновка
4. Курганский	с. Курган
5. Климоуцевский	с. Климоуцы
6. Загорно-Селитьбинский	с. Загорная Селитьба
7. Сычевский	с. Сычевка
8. Семеновский	с. Семеновка
9. Петропавловский	с. Петропавловка
10. Москвитинский	с. Москвитино
11. Новоивановский	с. Новоивановка
12. Новгородский	с. Новгородка
13. Малосазанский	с. Малая Сазанка
14. Костюковский	с. Костюковка
15. Нижнебузулинский	с. Нижние Бузули

Распределение земельного фонда Свободненского района по категориям земель показаны в таблице 2. Правовой режим земель определяется исходя из их принадлежности к той или иной категории и разрешенного использования в соответствии с зонированием территорий, общие принципы и порядок проведения которого устанавливаются федеральными законами [5], [6].

Таблица 2 – Земельный фонд Свободненского района (по категориям земель)

Категории земель	Площадь на 01.01.2020г. (тыс. га)
сельскохозяйственного назначения	338,997
населенных пунктов	4,43
промышленности, транспорта	30,79
особо охраняемых территорий	0,008
лесного фонда	352,34
водного фонда	-
запаса	5,3
Всего	731,865

Анализ данных показал, что количество земель промышленности на территории района недостаточно для реализации планируемых проектов ТОР «Свободный».

Основная часть

Большую часть земель района согласно таблице 2 – это земли сельскохозяйственного назначения, которые занимают 339 тыс. га, согласно данным инвентаризации земель сельскохозяйственного назначения только 134 тыс. га являются сельхозугодиями (в том числе пашни – 58, 7 тыс. га, залежь – 50,2 тыс. га, сенокосы – 10,2 тыс. га, пастбища – 15,0 тыс. га), остальные же относятся к неиспользуемым сельскохозяйственным землям. Поэтому для реализации проектов необходимо перевести частично неиспользуемые по назначению земли из категории земель сельскохозяйственного назначения в категорию – земли промышленности, согласно ФЗ № 172-ФЗ (последняя редакция) [7].

В Постановлении Правительства РФ «О создании территории социально-экономического развития «Свободный» установлен перечень кадастровых кварталов, в границах которых создается ТОР Свободный, это земли трёх сельских поселений – Дмитриевского, Желтоярковского, Нижнебузулинского, расположенных на северо-востоке Свободненского района [8]. Для определения основных направлений по реализации инвестиционной политики на территории района рассмотрим подготовленные схемы размещения объектов двух инвестиционных площадок «Центр» и «Восток».

Местонахождение первой площадки расположено в Желтоярковском сельском поселении, вблизи населенного пункта Черниговка, на данной территории предлагается расположить инвестиционную площадку «Центр». Инвестиционная площадка «Центр» имеет площадь 550 га и предусмотрена для размещения крупных резидентов в связи с необходимостью проведения инженерно-технических работ по выравниванию указанной территории, требующих существенных дополнительных капитальных вложений. Земельный участок, необходимый для размещения данной площадки будет сформирован в границах кадастрового квартала 28:21:011102 (рис. 1).

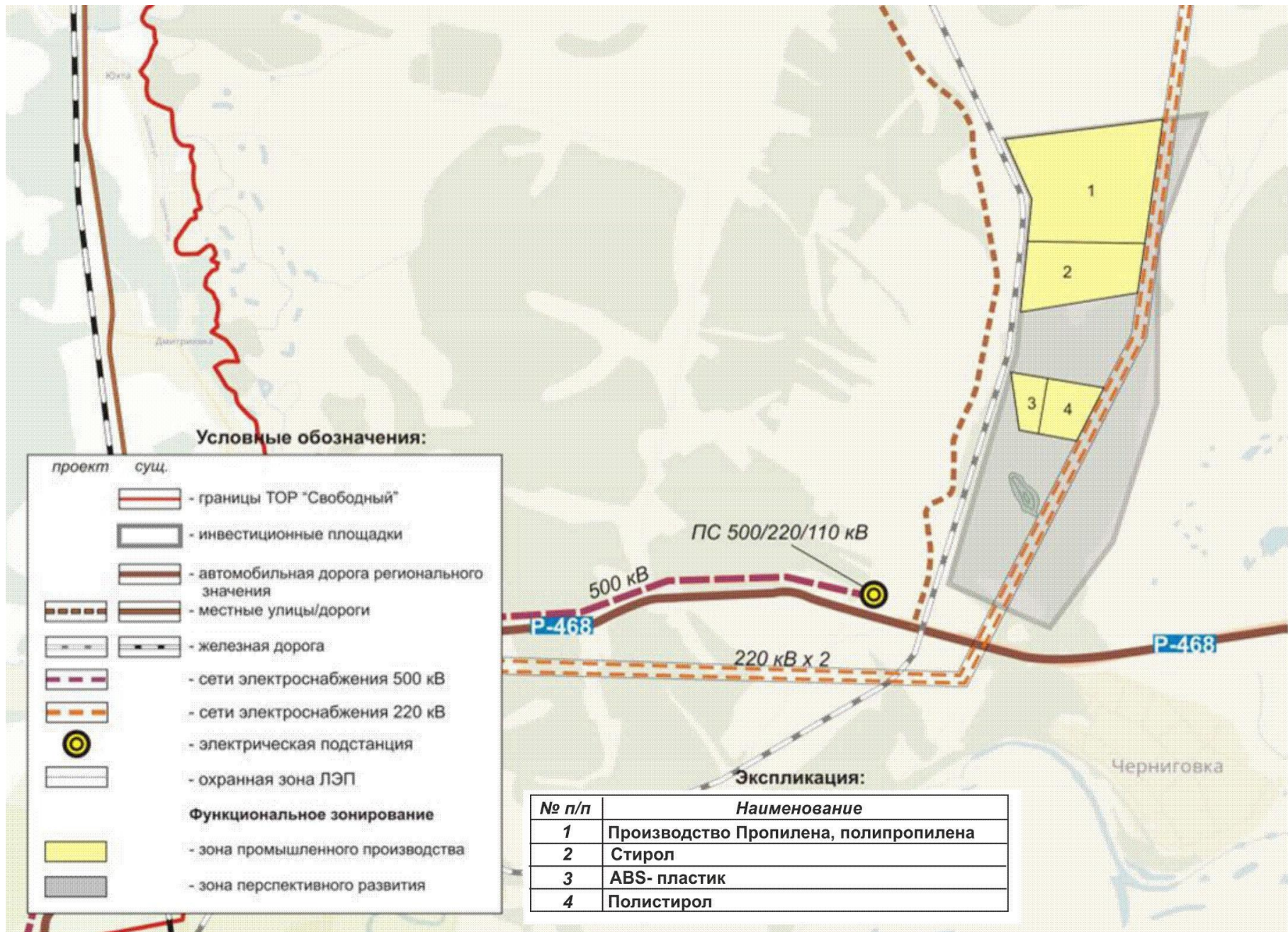


Рис. 1 – Схема размещения инвестиционной площадки «Центр»

На схеме размещения инвестиционной площадки «Центр» дополнительно указаны четыре площадки промышленного производства:

- производство пропилена, полипропилена;
- стирола;
- ABS- пластика;
- производство полистирола.

К основным факторам выбора данной территории относится: непосредственная близость к транспортно-инженерной инфраструктуре (включая проектируемые объекты транспортно-инженерных объектов), отсутствие существенных правовых обременений и ограничений, в границах территории отсутствуют социально-значимые и жилые объекты капитального строительства, а также объекты культурного наследия. В целом, для реализации инвестиционных планов ТОР необходимо в соответствии с земельным законодательством прибегнуть к процедуре перераспределения, объединяющая образование и разделение земельных участков. Земельные участки с кадастровыми номерами 28:21:011102:132, 28:21:000000:1280, 28:21:000000:1085, 28:21:000000:2027, находящиеся в настоящее время в частной собственности, частично попадают в границы, обозначенной на рисунке территории с использованием материалов публичной кадастровой карты [9].

В связи с этим, на последующих стадиях проектирования, при проведении кадастровых работ и формировании земельного участка необходимого для размещения инвестиционной площадки «Центр», указанные земельные участки не должны включаться (изыматься) в территорию данной площадки; приведение категории земель, документов территориального планирования, вида разрешённого использования в соответствие с планируемым использованием необходимо в порядке, предусмотренном Градостроительным кодексом РФ [10].

Второй рассматриваемой инвестиционной площадкой является площадка «Восток». Она предлагается к размещению на территории Желтоярковского сельсовета в границах кадастрового квартала 28:21:011207 и ее площадь равняется 297 га (рис.2).

В целях образования северной части данной площадки необходимо сформировать в границах данного квартала земельный участок, поставить его на государственный кадастровый учет, а также перевести из земель сельскохозяйственного назначения в земли промышленности и иного специального назначения.

Южная часть площадки подлежит размещению на сформированном земельном участке (земли сельскохозяйственного назначения). Данный земельный участок имеет кадастровый номер 28:21:000000:1260, площадь 322 га и является собственностью Желтоярковского сельсовета.

К основным факторам выбора данных территорий относится: наличие объектов транспортной инфраструктуры, отсутствие правовых обременений и ограничений на земельные участки, в границах территории отсутствуют социально-значимые объекты капитального строительства, а также объекты культурного наследия.

На территории инвестиционной площадке «Восток» планируется размещения 14 промышленных площадок, на которых планируется производство: полиэтиленовой пленки; полиэтиленовых лотков, пакетов, хозяйственных товаров; полиэтиленовых труб и фитингов; пенополиэтилена (пенополиуретана); полимерные теплоизолированные трубопроводы для распределительных сетей ГВС; ёмкости из полиэтилена и полипропилена; изделия из поликарбоната; стретч-пленка; ABS-пластик; полистирол; БОПП пленки; изоленга ПВХ, изоленга ХБ; СРР-пленка; завод металлоконструкций.

Кроме того, в перспективе развития ТОР территория данной инвестиционной площадки может быть расширена за счет соседствующих сформированных земельных участков, находящихся в региональной собственности и переданных в настоящее время в аренду до 2032 года. Включение таких участков может быть проведено по истечению срока аренды, либо досрочно в порядке, предусмотренном гражданским и земельным законодательством.

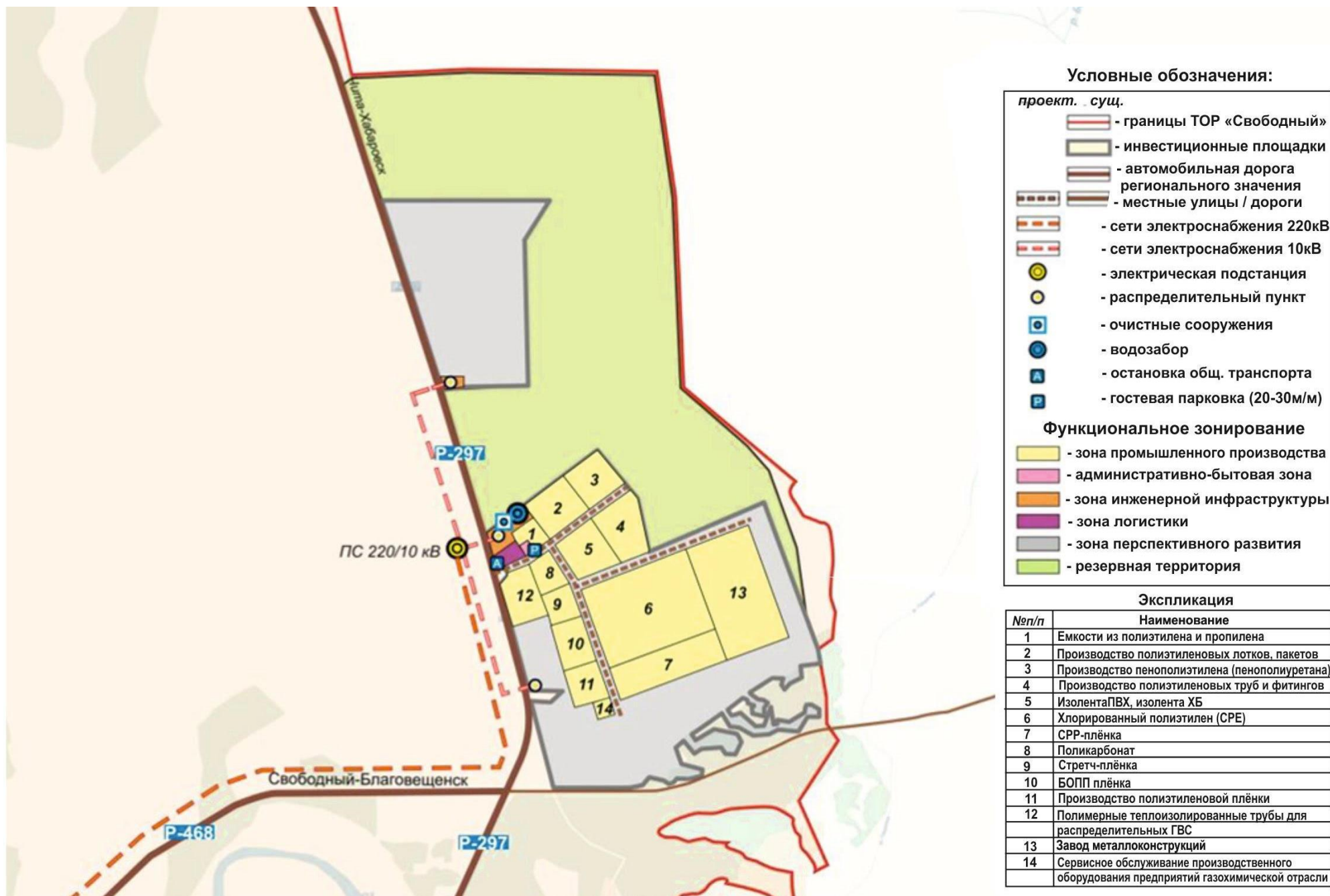


Рис. 2 – Схема размещения инвестиционной площадки «Восток»

Заключение

Для реализации инвестиционных планов ТОР необходим комплексный подход в решении земельных отношений:

- образование земельного участка в соответствии с нормами действующего законодательства;
- изъятие выделенного земельного участка для государственных нужд или обмен земельного участка на земельный участок, находящийся в государственной или муниципальной собственности, или его приобретение в государственную (муниципальную) собственность вследствие перераспределения земель;
- перевод территории земельного участка в категорию земель промышленности и иного специального назначения;
- приведение документов территориального планирования, а также вида разрешённого использования земельного участка в соответствие с планируемым использованием в порядке, предусмотренном Градостроительным кодексом Российской Федерации.

Рациональное решение земельного потенциала района обеспечит его инвестиционную привлекательность и создаст благоприятные условия ведения экономической деятельности в регионе.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Гагаринова, Н. В. Управление земельными ресурсами : учеб. пособие / Н. В. Гагаринова, М. В. Сидоренко. – 2-е изд. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – 160 с.
2. О создании территории социально-экономического развития Свободный : постановление Правительства Российской Федерации от 03 июня 2017 г. № 673 – Кодекс, 2022. – 6 с.
3. Свободненский район Амурской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://svobregion.ru/> (дата обращения: 15.02.2022)
4. Липина Л. Н. Установление публичных сервитутов для земель сельскохозяйственного назначения Свободненского района Амурской области / Л. Н. Липина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 2(116) – Ч. 1. – С. 84–88.
5. Земельный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 30.12.2021) // КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/Cons_doc_LAW_33773/ (дата обращения: 15.02.2022).
6. О введении в действие Земельного кодекса Российской Федерации: федер. закон от 25.10.2001 № 137-ФЗ (ред. от 31.07.2020) // КонсультантПлюс. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 16.02.2022)
7. О переводе земель или земельных участков из одной категории в другую : Федеральный закон от 21.12.2004 № 172-ФЗ (ред. от 30.12.2021). // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50874/ (дата обращения: 16.02.2022)
8. Официальный портал Администрации Свободненского района. [Электронный ресурс]. URL: <https://svobregion.amurobl.ru/> (дата обращения: 15.02.2022)
9. Публичная кадастровая карта. [Электронный ресурс]. URL : <https://pkk5.rosreestr.ru.> (дата обращения: 15.02.2022)
10. Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 10.01.2021) // КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]. URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 16.02.2022)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gagarinova, N. V. Upravlenie zemelnymi resursami : ucheb. posobie [Land reserves management: study guide] / N. V. Gagarinova, M.V. Sidorenko. – 2nd ed. – Krasnodar : KSAU publishing house, 2017. – 160 p. [in Russian]
2. O sozdanii territorii social'no-ekonomicheskogo razvitiya Svobodnyj [On the creation of the territory of socio-economic development Svobodnyj] : postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii [resolution of the Government of the Russian Federation] of 06.03.2017 № 673 – Kodeks, 2022/ – 6 p. [in Russian]
3. The Svobodnensky District In The Amur Oblast. [Electronic resource]. URL: <http://svobregion.ru/> (accessed: 02.15.2022) [in Russian]
4. Lipina L. N. Ustanovlenie publicnyh servitutov dlya zemel' sel'skhozajstvennogo naznacheniya Svobodnenskogo rajona Amurskoj oblasti [Establishment of public easements for agricultural lands of the Svobodnensky District of Amur Oblast] / L. N. Lipina // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International scientific research journal]. – 2022. – № 2 (116) – Vol 1. – P. 84–88. [in Russian]
5. Zemel'nyj kodeks Rossijskoj Federacii [State Committee of the Russian Federation for Land Policy] of 10.25 2001 № 136-FL (ed. of 12.30.2021) (revised and enlarged, came into force 01.10.2022) // Consultant Plus. – URL: http://www.consultant.ru/document/Cons_doc_LAW_33773/ (accessed: 02.16.2022). [in Russian]
6. O vvedenii v dejstvie Zemelnogo kodeksa Rossijskoj Federacii [On the enactment of the State Committee of the Russian Federation for Land Policy]: federal law of 10.25.2001 № 137-FL (revised. on 07.31.2020). // Consultant Plus. – URL: <http://www.consultant.ru> (accessed: 02.16.2022). [in Russian]
7. Federal law of 12.21.2004 № 172-FL (revised. on 12.30.2021) "O perevode zemel' ili zemel'nyh uchastkov iz odnoj kategorii v druguyu" [On land transfer from one category to another]. // Consultant Plus. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50874/ (accessed: 02.16.2022). [in Russian]
8. Oficial'nyj portal Administracii Svobodnenskogo rajona [Official portal of Administration of the Svobodnensky District]. [Electronic resource]. URL: <https://svobregion.amurobl.ru/> (accessed: 02.15.2022) [in Russian]
9. Publichnaja kadastravaja karta [Public cadastral map]: official site. – URL : <https://pkk5.rosreestr.ru.> (accessed: 02.15.2022) [in Russian]
10. Gradostroitel'nyj kodeks Rossijskoj Federacii [Town Planning Code of the Russian Federation]: federal law of 12.29.2004 № 190-FL (revised. on 01.10.2021) // Consultant Plus. – URL : <http://www.consultant.ru> (accessed: 02.16.2022) [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.023>

ОЦЕНКА ПРОГНОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Научная статья

Мищенко К.П.^{1,*}, Тихомирова Е.А.²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (kirill210399[at]mail.ru)

Аннотация

В статье анализируется проблема извлечения остаточных запасов нефти. С этой целью используются характеристики вытеснения, которые являются простым и оперативным методом анализа, обладающим высокой точностью получаемых данных за счет отражения истории залежи на протяжении всего срока разработки. Объектом проведения анализа является залежь месторождения X, приуроченная к Яковлевской свите. В работе проведен прогноз технологических показателей добычи на основании характеристик вытеснения. Результаты прогноза продемонстрировали высокую степень сходимости с фактическими данными. На основании этого рекомендуется использование характеристик вытеснения при анализе разработки месторождения. Отличие прогнозных и фактических данных для рассматриваемого объекта вызвано в первую очередь изменением темпа разработки ввиду увеличения закачки.

Ключевые слова: характеристики вытеснения, остаточные запасы нефти, прогнозирование добычи.

ASSESSMENT OF THE PROGNOSTICATIVE ABILITY OF OIL DISPLACEMENT CHARACTERISTICS FOR AN OPERATIONAL ANALYSIS OF FIELD DEVELOPMENT PARAMETERS

Research article

Mishchenko K.P.^{1,*}, Tihomirova E.A.²

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia;

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

* Corresponding author (kirill210399[at]mail.ru)

Abstract

The article analyses the problem of remaining in place oil extraction. For this purpose, displacement characteristics are used, which is a simple and timely analysis method with high accuracy of data obtained through the history of the deposit throughout the exploration period. The object of the analysis is the deposit X, timed to the Yakovlevskaya formation. The article has conducted a forecast of technological performance of extraction on the basis of displacement characteristics. Its results showed a high degree of correlation with the actual data. On this basis, it is recommended for displacement characteristics to be used in mining analysis. The difference between the forecasting and the actual data for the object in question is primarily due to a change in the rate of development as a result of an increase in pumping.

Keywords: displacement characteristics, remaining oil in place, production forecasting.

Введение

Потребность в углеводородных ресурсах увеличивается с каждым годом, для её удовлетворения требуется наращивать ресурсную базу путем открытия новых залежей и месторождений, вовлечения ранее неразрабатываемых запасов. При этом в долгосрочной перспективе для поддержания и увеличения уровня добычи нефти необходимо рационально подходить к процессу разработки месторождений, стремиться к достижению оптимального коэффициента извлечения нефти (КИН) при достижении максимальных показателей экономической эффективности.

Около 60 % запасов месторождений в России приурочено к трудноизвлекаемым: с плохими коллекторскими свойствами, аномальными свойствами нефти, удаленными от инфраструктуры [1]. Существенная доля разрабатываемых месторождений находится на третьей и четвертой стадиях разработки, характеризующихся высокой обводненностью и недостижением проектного КИН [3].

Актуальной проблемой является оптимизация сроков разработки и извлечение остаточных запасов нефти, находящейся в слабопроницаемых пропластках и участках, не охваченных заводнением; в линзах и у непроницаемых экранов, не вскрытых скважинами; в застойных зонах однородных пластов; капиллярно-удержанной и пленочной нефтью [8].

Сформированы различные пути решения данной проблемы: проведение геолого-технических мероприятий по выравниванию профиля приемистости, ограничению водопритока, закачке химических реагентов, улучшающих свойства нагнетаемой жидкости, резка боковых стволов и бурение новых скважин. Вышеперечисленные решения требуют точного адресного воздействия на разрабатываемый объект, при этом основной проблемой является высокая неопределенность местоположения недренируемых и слабодренируемых зон [8].

В этом случае наиболее рациональным способом является анализ выработки запасов на основе характеристик вытеснения или гидродинамической модели. Ухудшение структуры запасов и необходимость проведения комплексной оценки добычи накладывают особые условия и требования при выполнении расчетов [7]. Второй способ более трудоемкий, требует большого объема данных и качественных вычислительных мощностей, время расчетов может достигать нескольких суток, цена ошибки существенно возрастает. Первый же способ обладает меньшей точностью, но в условиях недостатка исходных данных (не требует информации о фильтрационных и геологических свойствах) и ограниченных вычислительных мощностях демонстрирует лучшие показатели сходимости. [7].

Целью работы является получение аналитической характеристики вытеснения, максимально коррелирующей с данными эксплуатации месторождения, которая позволит сделать прогноз добычи и осуществить расчет потенциальных начальных извлекаемых запасов.

Объектом проведения анализа является залежь месторождения X, приуроченная к Яковлевской свите. Разработка объекта ведется с применением системы заводнения. Начальные геологические запасы нефти объекта разработки составляют около 610 млн. т., извлекаемые около 270 млн. т. нефти. Отбор от начальных извлекаемых запасов более 50%.

Основная часть

Анализ характеристик вытеснения является экстраполяционным промыслово-статистическим методом, отображающим зависимости изменения технологических параметров добычи флюидов в ходе разработки (суммарная и текущая добыча нефти, жидкости и воды, текущий и накопленный водонефтяной фактор, число скважин, обводненность и другие параметры). Изменения параметров тесно связано с увеличением/уменьшением фонда скважин, изменением режима работы скважин и проведением геолого-технических мероприятий. Полученные на основе анализа фактических данных за историю разработки объекта и экстраполированные в будущее зависимости позволяют спрогнозировать параметры добычи флюидов и конечный КИН на объекте при режиме вытеснения нефти водой [4], [7], [10].

Выделяются интегральные и дифференциальные характеристики, кривые обводнения и падения, двухпараметрические и многопараметрические зависимости [13].

При этом характеристики вытеснения имеют недостатки: высокая погрешность при маленькой обводненности; потребность в фактических исторических данных; отсутствие объективных критериев подбора характеристик вытеснения и интервала анализа. Не рекомендуется применять кривые обводнения при обводненности менее 50% [13].

Большое количество различных зависимостей, используемых при построении характеристик вытеснения, и отсутствие четкого алгоритма приводят к расхождению прогнозов у разных специалистов даже при одинаковых входных данных. Принципиальные отличия закладываются при выборе временного промежутка для анализа, при формулировании критериев отбора кривых, при выборе предельных значений обводненности. Иногда специалисты проводят расчет по разным характеристикам вытеснения, не задаваясь едиными условиями, в результате чего получают существенное расхождение в результатах. А при выборе конечного прогнозного значения принимают среднее значение по «удобной» выборке или используют одну наиболее удовлетворяющую характеристику вытеснения.

Однако отличие прогнозных результатов вызвано не только субъективностью выбора, но и ошибками при внесении входных данных, так при построении эмпирических зависимостей годовые и накопленные показатели по добыче нефти и воды должны выражаться в пластовых условиях, так как характеристики вытеснения отображают процесс фильтрации водонефтяной смеси в пласте. Интегральные кривые менее чувствительны к изменению режима работы залежи, что делает их применение более предпочтительным [4], [5], [8], [11]. Алгоритм для оценки технологической эффективности мероприятий с применением характеристик вытеснения состоит из следующих шагов [4]:

1. Выбирается оптимальный период анализа предыстории, основным условием выступает максимизация корреляции при наиболее длительной предыстории. Минимальный период принимается 18 месяцев.
2. Следующим шагом подбираются наиболее подходящие характеристики вытеснения. Методом наименьших квадратов рассчитываются входящие в уравнения коэффициенты.
3. Далее полученная функция экстраполируется для получения прогнозных показателей разработки месторождений. Прогноз запасов производится до достижения предельной обводненности продукции (как правило, 98%), после достижения которой последующая эксплуатация считается нерентабельной [13].

Для анализа точности прогнозирования технологических показателей использовались одни из самых распространенных характеристик вытеснения (см. таблицу 1) [2], [11], [12]. Указанные характеристики вытеснения показывают наиболее близкий к фактическому результат, при разработке месторождения с системой заводнения.

Таблица 1 – Используемые характеристики вытеснения

Название характеристики вытеснения	Уравнение
Метод Камбарова	$Q_n = A + B / Q_{жс}$
Метод Сазонова	$Q_n = A + B * \ln Q_{жс}$
Метод Пирвердяна	$Q_n = A + B / \sqrt{Q_{жс}}$
Метод Максимова	$Q_n = A + B * \ln Q_в$
Метод Давыдова	$Q_n = A + B * Q_в / Q_{жс}$

Примечание: Q_n – накопленная добыча нефти, т; $Q_в$ – накопленная добыча воды, т; $Q_{жс}$ – накопленная добыча жидкости, т; A, B – коэффициенты

На основании анализа применения характеристик вытеснения на объектах аналогах, а также ограниченной истории разработки месторождения, в качестве базового периода приняты фактические данные по разработке месторождения за 2013–2016 год (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Фактические данные по накопленной добыче объекта

Год	Накопленная добыча жидкости, тыс.т	Накопленная добыча воды, тыс.т	Накопленная добыча жидкости, тыс.т
2013	47500,96	18302,716	65803,676
2014	61920,507	33746,076	95666,583
2015	76245,181	60668,77	136913,951
2016	89979,95	100133,562	190113,512

Проведена аппроксимация фактических данных с целью получения коэффициентов AuB уравнений, получен прогнозный тренд по различным характеристикам вытеснения (см. рисунок 1, рисунок 2, рисунок 3, рисунок 4, рисунок 5).

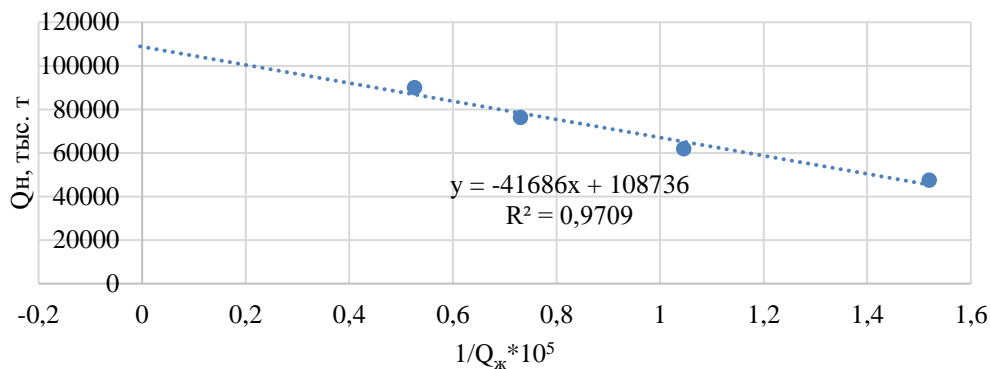


Рис. 1 – Метод Камбарова

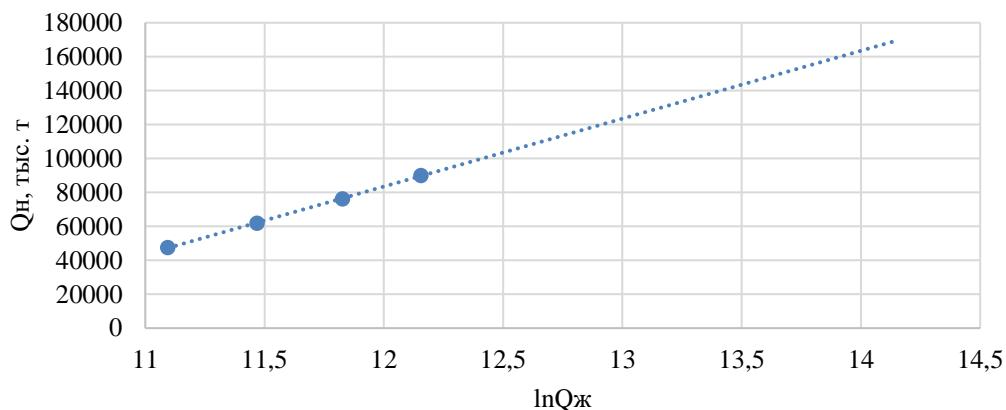


Рис. 2 – Метод Сазонова

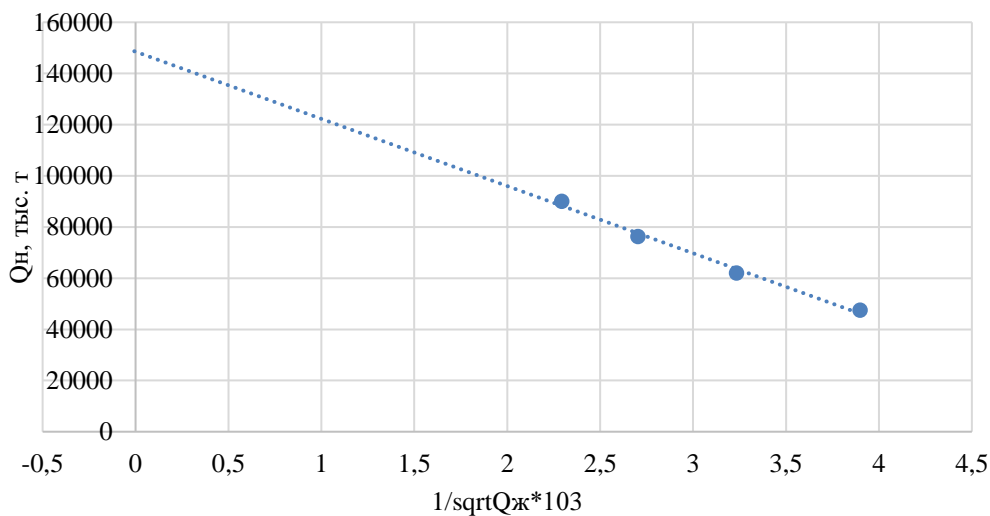


Рис. 3 – Метод Пирвердяна

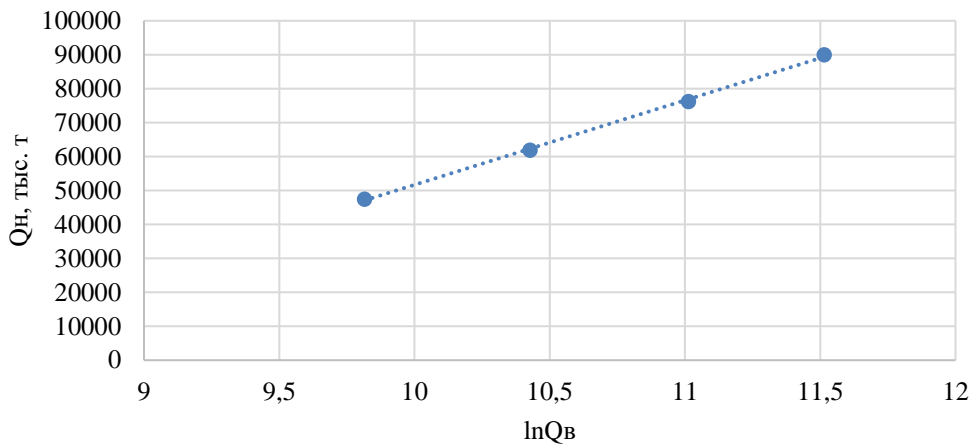


Рис. 4 – Метод Максимова

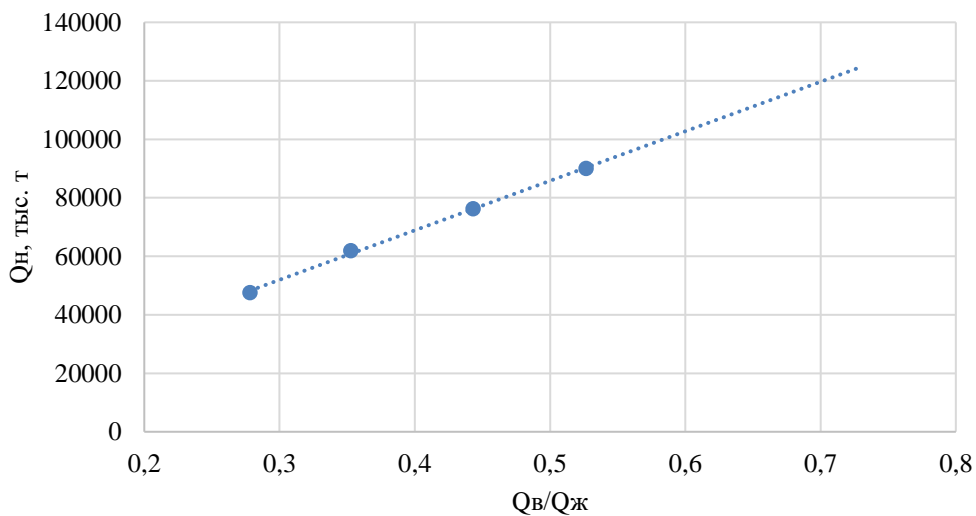


Рис. 5 – Метод Давыдова

На основании полученных зависимостей по разным характеристикам вытеснения представлен прогноз технологических показателей в горизонте имеющихся фактических данных, чтобы проанализировать сходимость прогнозных и фактических значений (см. рисунок 6).

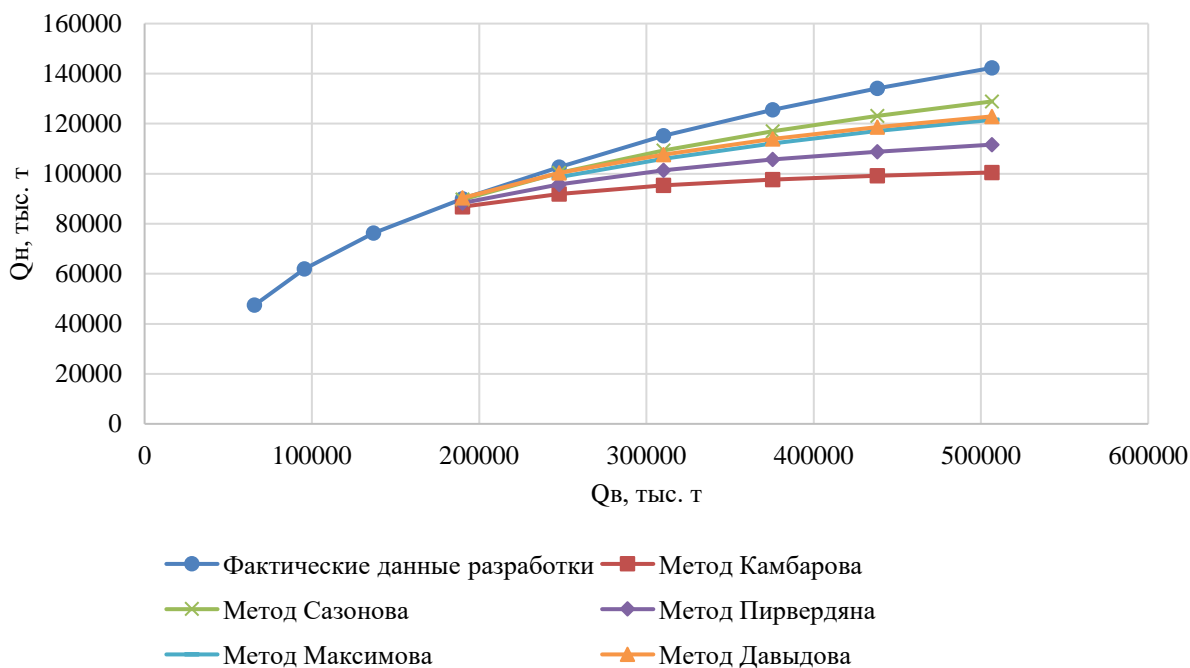


Рис. 6 – Прогнозные показатели по различным характеристикам вытеснения

Наилучшую сходимость демонстрирует методы Сазонова, Давыдова и Максимова, что связано с использованием функции добычи воды и функции линейного логарифма, которые несколько завышает прогнозируемые показатели. На основании расчета прогноза по методу Сазонова извлекаемые запасы объекта составляют около 260 млн. т нефти., что приближено к принятым в проекте значениям.

Следует отметить, что такое существенное отличие фактических и прогнозных данных связано с отсутствием привязки к числу скважин, в результате чего дополнительная добыча может быть обеспечена бурением новых скважин и резкой боковых стволов. Дополнительным фактором выступает смена режимов добычи за счет существенного увеличения закачки с 2017 года.

Заключение

Характеристики вытеснения являются простым и оперативным методом анализа, который обладает высокой точностью получаемых данных за счет отражения истории залежи на протяжении всего срока разработки. С целью проведения анализа с большей степенью сходимости необходимо связать количество эксплуатационных скважин к накопленной добыче по годам, а также учесть геолого-технические мероприятия, проводимые на месторождении за рассматриваемый период времени.

В работе проведен прогноз технологических показателей добычи на основании характеристик вытеснения. Результаты прогноза продемонстрировали высокую степень сходимости с фактическими данными. На основании этого рекомендуется использование характеристик вытеснения при анализе разработки месторождения. Отличие прогнозных и фактических данных для рассматриваемого объекта вызвано в первую очередь изменением темпа разработки ввиду увеличения закачки.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Анурьев М.К. К прогнозированию темпов снижения добычи нефти по данным истории разработки нефтяных залежей / М.К. Анурьев, Т.М. Гуляева, А.В. Лекомцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 6. – С. 93–100
2. Гагарина Е.М. Использование характеристик вытеснения нефти для оценки эффективности форсированного отбора жидкости на объекте Б2+ Б3 Покровского месторождения / Е.М. Гагарина // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2017. – №. 5–4. – С. 46–52
3. Гусева Д.Н. Способ оценки выработки запасов зрелых нефтяных месторождений / Д.Н. Гусева, П.В. Зимин, А.В. Аржиловский // Нефтепромысловое дело. – 2016. – № 12. – С. 5–9
4. Исмагилов И.Р. Анализ технологической эффективности ГТМ с использованием характеристик вытеснения в условиях объектов НГДУ «Альметьевнефть» / И.Р. Исмагилов // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 235–238
5. Казаков А.А. Методическое обеспечение единых подходов оценки эффективности методов ПНП / А.А. Казаков // Технологии топливноэнергетического комплекса. – 2003. – № 2. – С. 47–53
6. Казаков, А.А. Методы характеристик вытеснения нефти водой / А.А. Казаков. – Москва : Недра, 2020. – 176 с.
7. Камалеева Л. Л. Применение характеристик вытеснения для экспресс-оценки прогнозных показателей добычи / Л.Л. Камалеева, М.Р. Рахимов, А.Р. Хафизов // Научно-технический журнал «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов». – 2020. – № 1. – С. 72–80
8. Карсаков А.В. Проблемы и технологии освоения остаточных запасов нефти / А.В. Карсаков // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горногеологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5–9 апреля 2021 г. Т. 2. – Томск, 2021. – Т. 2. – С. 82–83
9. Назаренко, М.Ю. Применение машинного обучения для вероятностного прогнозирования добычи и расчета потенциальных извлекаемых запасов нефти / М.Ю. Назаренко, А.Б. Золотухин // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 9. – С. 109–113
10. Саранча А.В. Анализ разработки месторождений ХМАО-Югры с позиции их стадийности / А.В. Саранча, И.С. Саранча // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 126–127
11. Харисов М.Н. Анализ характеристик вытеснения по скважинам и эксплуатационным объектам месторождений углеводородного сырья / М.Н. Харисов, Э.А. Харисова, Э.А. Майский // Научно-технический журнал «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов». – 2017. – №. 4. – С. 73–83
12. Хребтова Е.А. Прогнозная способность характеристик вытеснения на примере Повховского месторождения / Е.А. Хребтова, М.И. Серебренников // Modern Science. – 2020. – №. 9–2. – С. 359–363
13. Шумко В.С. Оценка извлекаемых запасов нефти с применением интегральных характеристик вытеснения на основе вероятностной методики / В.С. Шумко, Е.И. Мамчистова, С.С. Кузовлев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2021. – № 2. – С. 78–8
14. Шумко, В.С. Использование характеристик вытеснения для оценки технологических показателей при базовом варианте разработки / В.С. Шумко, Е.И. Мамчистова // Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (Тюмень, 20–21 мая 2020 г.). – Тюмень : ТИУ, 2020. – С. 221–224

Список литературы на английском языке / References in English

1. Anur'ev M.K. K prognozirovaniyu tempov snizheniya dobychi nefiti po dannym istorii razrabotki neftyanyh zalezhej [Forecasting the rate of oil growth based on the history of the development of oil deposits] / M.K. Anur'ev, T.M. Guljaeva,

A.V. Lekomcev // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologija, neftegazovoe i gornoe delo [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology, oil and gas and mining]. – 2013. – № 6. – P. 93–100 [in Russian]

2. Gagarina E.M. Ispol'zovanie harakteristik vytesnenija nefti dlja ocenki jeffektivnosti forsirovannogo otbora zhidkosti na ob'ekte B2+ B3 Pokrovskogo mestorozhdenija [Using oil loss characteristics to assess the efficiency of detecting forced fluid at the B2+ B3 facility of the Pokrovskoye field] / E.M. Gagarina // Aktual'nye nauchnye issledovanija v sovremennom mire [Actual scientific research in the elite world]. – 2017. – №. 5-4. – P. 46–52 [in Russian]

3. Guseva D.N. Sposob ocenki vyrabotki zapasov zrelyh neftjanyh mestorozhdenij [A method for assessing the development of reserves of mature oil fields] / D.N. Guseva, P.V. Zimin, A.V. Arzhilovskij // Neftepromyslovoe delo [Oil engineering]. – 2016. – № 12. – P. 5–9 [in Russian]

4. Ismagilov I.R. Analiz tehnologicheskoy jeffektivnosti GTM s ispol'zovaniem harakteristik vytesnenija v uslovijah ob#ektov NGDU «Al'met'evneft'» [Analysis of the technological efficiency of geological and technical operations using the characteristics of the assessment in the conditions of the facilities of the OGPD Almetneft] / I.R. Ismagilov // Problemy razrabotki mestorozhdenij uglevodorodnyh i rudnyh poleznyh iskopaemyh [Problems of development of deposits of hydrocarbon and ore minerals]. – 2014. – № 1. – P. 235–238 [in Russian]

5. Kazakov A.A. Metodicheskoe obespechenie edinyh podhodov ocenki jeffektivnosti metodov PNP [Methodological support of unified approaches to assessing the effectiveness of PNP methods] / A.A. Kazakov // Tehnologii toplivnojenergeticheskogo kompleksa [Technologies of the fuel and energy complex]. – 2003. – № 2. – P. 47–53. [in Russian]

6. Kazakov A.A. Metody harakteristik vytesnenija nefti vodoj [Methods of characteristics of oil recovery] / A.A. Kazakov. – Moskva : Nedra, 2020. – 176 p [in Russian]

7. Kamaleeva L.L. Primenenie harakteristik vytesnenija dlja jekspress-ocenki prognoznyh pokazatelej dobychi [Application of the characteristics of the expected express assessment of forecast income] / L.L. Kamaleeva, M.R. Rahimov, A.R. Hafizov // Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov» [Scientific and technical journal "Problems of gathering, preparation and transportation of oil and oil products"]. – 2020. – № 1. – P. 72–80 [in Russian]

8. Karsakov A.V. Problemy i tehnologii osvoenija ostatochnykh zapasov nefti [Problems and technologies of residual oil reserves development] / A.V. Karsakov // Problemy geologii i osvoenija nedr: trudy XXV Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodyh uchjonyh, posvjashhennogo 120-letiju gornogeologicheskogo obrazovanija v Sibiri, 125-letiju so dnja osnovanija Tomskogo politehnicheskogo universiteta, Tomsk, 5-9 aprelja 2021 g. [Problems of geology and subsoil development: Proceedings of the XXV scientific symposium named after Academician M.A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 120th anniversary of mining and geological education in Siberia, the 125th anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, April 5–9, 2021. V. 2.] – Tomsk, 2021. – V. 2. – P. 82–83 [in Russian]

9. Nazarenko M.J. Primenenie mashinnogo obuchenija dlja verojatnostnogo prognozirovanija dobychi i rascheta potencial'nyh izvlekaemykh zapasov nefti [Application of machine calculation for probabilistic forecasting of income and calculation of recoverable oil reserves] / M.J. Nazarenko, A.B. Zolotuhin // Neftjanoe hozjajstvo [Oil industry]. – 2020. – № 9. – P. 109–113 [in Russian]

10. Sarancha A.V. Analiz razrabotki mestorozhdenij HMAO-Jugry s pozicii ih stadijnosti [Analysis of the development of deposits of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra from the standpoint of their stages] / A.V. Sarancha, I.S. Sarancha // Akademicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri [Academic journal for the study of Siberia]. – 2014. – Vol. 10. – № 1. – P. 126–127 [in Russian]

11. Harisov M.N. Analiz harakteristik vytesnenija po skvazhinam i jekspluacionnym ob'ektam mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ja / M.N. Harisov, E.A. Harisova, E.A. Maisky // Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov» [Scientific and technical journal "Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products"]. – 2017. – №. 4. – P. 73–83 [in Russian]

12. Hrebtova E.A. Prognoznaja sposobnost' harakteristik vytesnenija na primere Povhovskogo mestorozhdenija [Predictive characteristic of exposure to the use of the Povkhovskoye deposit] / E.A. Hrebtova, M.I. Serebrennikov // Modern Science. – 2020. – №. 9–2. – P. 359–363 [in Russian]

13. Shumko V.S. Ocenka izvlekaemykh zapasov nefti s primeneniem integral'nykh harakteristik vytesnenija na osnove verojatnostnoj metodiki [Estimation of recoverable oil reserves using complex loss characteristics based on probabilistic methods] / V.S. Shumko, E.I. Mamchistova, S.S. Kuzovlev // Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Neft' i gaz [Oil and gas]. – 2021. – № 2. – P. 78–88 [in Russian]

14. Shumko V.S. Ispol'zovanie harakteristik vytesnenija dlja ocenki tehnologicheskikh pokazatelej pri bazovom variante razrabotki [The use of a characteristic deviation to assess technological indicators in the basic development option] / V.S. Shumko, E.I. Mamchistova // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh «Novye tehnologii – neftegazovomu regionu» (Tjumen', 20–21 maja 2020 g.) [Proceedings of the international scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists "New technologies for the oil and gas region" (Tyumen, May 20–21, 2020)]. – Tjumen' : TIU, 2020. – P. 221–224 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.024>

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОГО ОЛОВОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Научная статья

Растанина Н.К.^{1,*}, Хромцова Е.В.², Растанин П.Л.³

¹ ORCID:0000-0002-0252-6220;

² ORCID: 0000-0002-3535-092X;

^{1, 2, 3} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия;

* Корреспондирующий автор (n.rastanina[at]yandex.ru)

Аннотация

Увеличение отрицательного воздействия на окружающую среду требует особого изучения миграции тяжелых металлов и токсичных элементов в биосфере и влияния на здоровье населения прилегающих горняцких поселков в условиях закрытого оловодобывающего предприятия. В статье обсуждаются результаты исследований состояния окружающей среды и воздействия техногенной горнопромышленной системы на здоровье населения горняцких поселков Фабричный, Рудный, Кавалерово Приморского края ДФО. Рассчитанные коэффициенты корреляции превышают пороговые значения, что свидетельствует о тесной связи уровня заболеваемости болезнями органов дыхания разных возрастных групп от загрязнения окружающей среды соединениями тяжелых металлов и мышьяка.

Ключевые слова: закрытое горное предприятие, техногенное загрязнение, тяжелые металлы, здоровье населения.

IMPACT OF TECHNOGENIC POLLUTION ON PUBLIC HEALTH IN A CLOSED TIN PRODUCTION PLANT

Research article

Rastanina N. K.^{1*}, Hromcova E. V.², Rastanin P. L.³

¹ ORCID:0000-0002-0252-6220;

² ORCID: 0000-0002-3535-092X;

^{1, 2, 3} Pacific National University, Khabarovsk, Russia;

* Corresponding author (n.rastanina[at]yandex.ru)

Abstract

The increased negative impact on the environment requires a special study of the heavy metals and toxic elements' movement in the biosphere and the impact on the public health in adjacent mining villages in a closed tin mine. The article discusses the results of studies of the environment state and the impact of anthropogenic mining system on the public health in the mining towns of Fabrichnyj, Rudny, Kavalerovo of the Primorsky Krai of the Far Eastern Federal District. The correlation coefficients calculated are above the thresholds values, indicating that the incidence of respiratory disease in different age groups is closely related to the environment pollution by heavy metal and arsenium.

Keywords: closed mining enterprise, technogenic pollution, heavy metals, public health.

Введение

Дальневосточный федеральный округ (ДФО) является одним из крупнейших регионов по запасам олова России. В Приморье найдено около 30 месторождений, самые значимые из них расположены в Кавалеровском и Дальнегорском районах. Хрустальненский горно-обогатительный комбинат (ГОК) находится в Кавалеровском районе. При освоении оловорудного месторождения было накоплено огромное количество отходов обогащения минерального сырья, суммарный объем которых составил около 48,9 млн т. При прекращении производственной деятельности горнодобывающего предприятия остаются накопившиеся в огромных количествах отходы переработки минерального сырья, нарушенные и загрязненные земли, которые являются источником загрязнения подземных вод, выбросов пыли и газа в атмосферу [1]. Три хвостохранилища бывшего Хрустальненского горно-обогатительного комбината находятся рядом с горняцкими поселками Фабричный, Рудный, Кавалерово, на расстоянии 1-3 км [2]. Отходы обогащения (так называемые «хвосты») особо опасны тем, что при определенной скорости ветра осушенная поверхность хвостохранилища начинает пылить, тем самым способствуя переносу частиц, содержащих тяжелые металлы, деградации природных систем и формированию предрасположенности к развитию заболеваний органов дыхания.

Известно, что по влиянию на организм человека наиболее опасными являются соединения свинца (Pb), кадмия (Cd), мышьяка (As), сурьмы (Sb), марганца (Mn), а также взвешенные частицы [3]. Соединения мышьяка (As) и никеля (Ni) в мелкодисперсной пыли могут являться одной из наиболее частых причин смерти и др. [4]. При этом известны данные о способности тяжелых металлов воздействовать на клетки органов и тканей, способствовать развитию хронических и онкологических заболеваний [5], [6], [7], [8].

В современных условиях проблемы воздействия горного техногенеза на человека изучены недостаточно. Поэтому сегодня остается актуальной оценка влияния техногенного загрязнения на население, проживающего рядом с как действующими, так и закрытыми горнодобывающими предприятиями. Поэтому целью исследования является оценка воздействия техногенной горнопромышленной системы на здоровье населения в условиях закрытого оловодобывающего предприятия. В соответствии с поставленной целью поставлены следующие задачи:

- 1) проанализировать в исследуемом районе уровень заболеваемости населения болезнями органов дыхания;
- 2) предложить меры по снижению отрицательного воздействия на окружающую среду и здоровье человека в условиях закрытого горнодобывающего предприятия.

Методы и принципы исследований

Объектом исследования является горнопромышленная система, сформировавшаяся в результате деятельности Хрустальненского ГОКа. Для качественного количественного анализа состава проб образцов был использован метод атомно-абсорбционной спектроскопии [6]. На атомно-абсорбционном спектрофотометре в пробе образцов (отходов переработки минерального сырья, пыли, растительности, биологического материала) был определен качественный и количественный состав элементов Al, Cr, Pb, Fe, Co, Mn, Cu, Ni, Cd, Zn, Sn, Hg, Sb, As. Далее методами вариационной статистики проведен анализ с поиском корреляционных связей.

Основные результаты

Природно-климатические условия исследуемого района способствуют рассеиванию загрязняющих веществ с поверхности хвостохранилищ. Отходы переработки представляют собой мелко раздробленные высокодисперсные грунты и являются потенциальным источником техногенного загрязнения биосферы. Отобранные образцы переработки оловорудного сырья («хвосты») характеризуются высоким содержанием соединений Zn, Sn, Pb, Cu, Sb, Co, Hg, As и др. Данные элементы мигрируют и также содержатся в техногенных почвах, растительности, пыли.

По данным микроскопии пыль состоит из различных минеральных форм, таких как силикат свинца и железа, оксид цинка, халькоперит, галенит, сфалерит, и др. [2]. В процессе освоения оловорудных месторождений формируются миграционные потоки загрязняющих веществ по природным механизмам, происходит техногенное загрязнение компонентов биосферы, ухудшается состояние окружающей среды.

Население поселков горняков Фабричный, Рудный, Кавалерово, расположенных на расстоянии от 1 до 3 км от закрытого Хрустальненского горно-обогатительного комбината, проживает в условиях постоянного превышения нормативных показателей загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [5].

Были исследованы биологический материал (образцы волос) у детей разного возраста поселка Фабричный на предмет содержания химических элементов As, Hg, Pb, Cr, Al, Mn, Ni, Sn, Fe, Co, Cu, Zn. Исследования подтверждают особенности элементного статуса детей. Так, у девочек наблюдается значительные превышения по содержанию следующих элементов, которые расположены в порядке возрастания содержания следующим образом: $Cr < As < Ni < Pb < Mn < Fe < Al$. У мальчиков наблюдается превышение содержания Mn, Al и Fe. В порядке возрастания кратности они располагаются в ряд: $Fe < Al < Mn$.

Действие атмосферных загрязнителей способствует изменениям в иммунной системе организма, формированию предрасположенности к развитию заболеваний дыхательной системы. Так как уровень заболеваемости органов дыхания имеет самые высокие показатели, а также тот факт, что дыхательная система одной из первых взаимодействует с окружающей средой, особое внимание уделено именно этой нозологии. Изучена динамика заболеваний органов дыхания у детей до 14 лет. Результаты анализа данных демонстрируют долю заболеваемости данной категории болезней в разных возрастных группах в горняцких поселках Фабричный, Рудный, Кавалерово (см. рисунок 1).

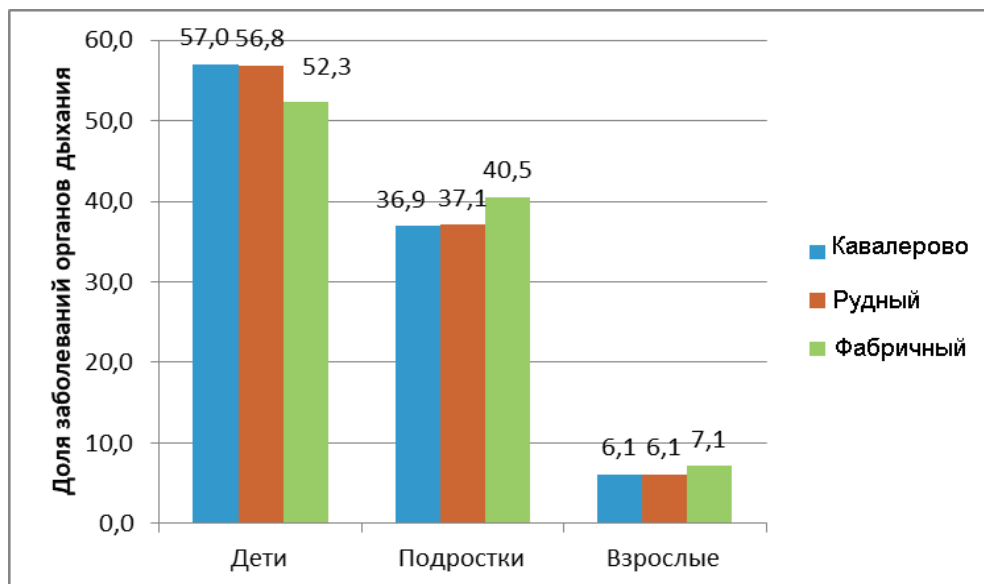


Рис. 1 – Доля заболеваний органов дыхания населения по различным возрастным группам (взрослые, подростки 14-18 лет, дети до 14 лет)

Установлена корреляционная зависимость изменений относительной частоты заболеваний дыхательных путей у детей от содержания в пыли соединений элементов сурьмы (Sb) и хрома (Cr) в указанных населенных пунктах (см. таблицу 1, рисунок 2). Результаты проведенного анализа данных заболеваемости населения горняцких поселков расположенных в границах влияния закрытого горного предприятия «Хрустальненский ГОК» обусловленных неблагоприятным воздействием свидетельствуют о достоверных различиях в уровнях заболеваемости населения.

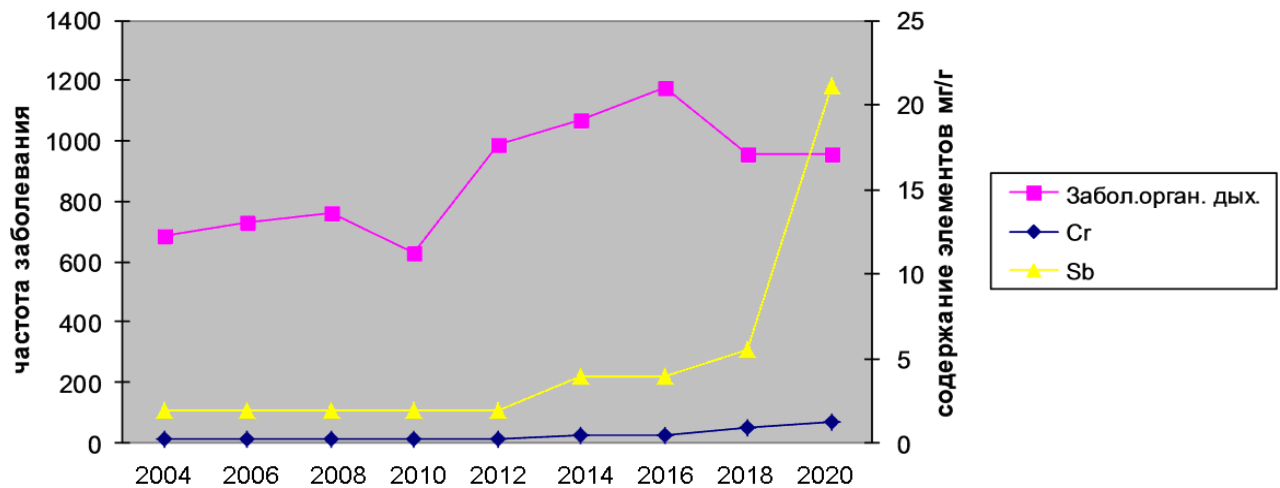


Рис. 2 – Зависимость заболевания органов дыхания у детей до 14 лет от содержания соединений сурьмы и хрома в пыли п. Фабричного

Рассчитаны коэффициент корреляции, индекс детерминации, представлены линейные уравнения трендов изменения относительной частоты заболеваний органов дыхания (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Уравнения зависимости относительной частоты заболеваний болезнями органов дыхания от содержания сурьмы (Sb) и хрома (Cr) в пыли

Горняцкий поселок	Математическая модель зависимости	Индекс детерминации R ²	Коэффициент корреляции r
Фабричный	$W = 10^{-3} (0,01195u^2 + 10,53u + 984,3)$	0,875	0,766
Рудный	$W = 10^{-3} (-0,0118u^2 + 6,262u + 610,3)$	0,915	0,710
Кавалерово	$W = 10^{-3} (-29,05y^2 + 473,2y + 511,6)$	0,929	0,666

Примечание: у – влияние соединений сурьмы; и – совместное влияние соединений двух элементов – сурьмы (Sb) и хрома (Cr)

Коэффициенты корреляции, близкие к единице, характеризуют близкую скорость увеличения заболеваемости в горняцких поселках Рудный и Фабричный $r = 0,710$ и $r = 0,766$ соответственно. Для Кавалерово коэффициент корреляции не превышает порогового значения $r = 0,666$. Полученные коэффициенты подтверждают корреляционную связь между качеством атмосферного воздуха и уровнем заболеваемости населения болезнями органов дыхания.

Заключение

Население горняцких поселков Фабричного, Рудного и Кавалерово находится в условиях постоянного превышения нормативных показателей загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Отходы переработки оловорудного сырья, складированные в хвостохранилища, являются главным источником загрязнения окружающей среды. По содержанию химических элементов в биоматериале (волосы) детей можно сказать, что растущий организм активно адсорбирует токсичные элементы в значительных количествах. Атмосферные загрязнители способствуют формированию предрасположенности к развитию заболеваний органов дыхания. Рассчитанные коэффициенты корреляции для поселков Рудный и Фабричный $r = 0,710$ и $r = 0,766$ соответственно подтверждают негативное воздействие на здоровье населения загрязняющих веществ.

Для снижения отрицательного воздействия отходов переработки оловорудного сырья на окружающую среду и здоровье населения горняцких поселков предложены следующие мероприятия:

- 1) проведение рекультивации поверхности хвостохранилищ;
- 2) организация экологического мониторинга в границах влияния исследуемого района;
- 3) рекомендовать населению горняцких поселков принимать с целью профилактики экологически обусловленных заболеваний сорбенты природного происхождения, обладающих высокой сорбционной активностью по отношению катионам тяжелых металлов.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Крупская Л.Т. К вопросу оценки хвостохранилища как источника загрязнения объектов природной среды / Л.Т. Крупская, А.М. Дербенцева, К.В. Ионкин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 5. – Ч. 2. – С. 234–242
2. Крупская Л.Т. Проблемы снижения экологического ущерба экосистемам, нанесенного в прошлом веке добычей минерального сырья, и пути их решения в ДФО / Л.Т. Крупская, М.Б. Бубнова, Д.А. Голубев и др. // Экологическая химия. – 2016. – Т. 25 – Вып. № 2. – С. 91–99

3. Глинянова И.Ю. Мониторинг аэрозолей в атмосферном воздухе населенных пунктов / И.Ю. Глинянова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 2. [Электронный ресурс]. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2022/74842 (дата обращения: 12.02.2022)
4. Россинская М.В. Элементы экологического мониторинга, их краткая характеристика и влияние на качество окружающей природной среды и здоровье населения региона / М.В. Россинская, Н.П. Россинский // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 1. [Электронный ресурс]. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/668 (дата обращения: 12.02.2022)
5. Растанина Н.К. Оценка риска для здоровья населения, связанного с техногенным загрязнением отходов бывшего горного предприятия «Хрустальный ГОК» / Н.К. Растанина, Л.Т. Крупская, Д.А. Голубев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 12. – С.88 – 95
6. ПНД Ф 16.1.2.3.3.11-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. – Москва – 1998
7. Krupskaya L.T. Geocological estimation of the environment state and population health in zone of the tailing dump influence (On The Example Of Fabrichnyi Settement) / L.T. Krupskaya, N.K. Rastanina, V.P. Zvereva et al. // International Conference On Frontiers Of Manufacturing, Design Science and Information Engineering (ICEMD, 2015). – P. 1133–1137
8. Качор О.Л. Геоэкологическая оценка территорий зон влияния накопленных мышьяковистых отходов горно-перерабатывающей промышленности и методология ликвидации этого влияния: монография / О.Л. Качор. – Иркутск : ИРНТУ, 2019. – 160 с.
9. Md. Simul Buyan. Heavy Metals in Some Commercially Important Fishes in the Meghna River Adjacent to the Narsingdi District in Bangladesh: Health risk Assessment. / Md. Simul Buyan, Muhammad Abu Bakar, Md. Shafikul Islam et al. // American Journal of Life Sciences. – Vol. 4 – No. 2. – 2016. – P. 60–70. DOI: 10.11648/J.Superleague.20160402.17
10. Muhammad Idrees. Analysis and human health risk of selected heavy metals in water, sediments, and freshwater fish (labeo rohita, cyprinus carpio, glyptothorax punjabensis) collected by the Three Rivers district Charsadda, Khyber-Pakhtunkhwa, Paki / Muhammad Idrees, Fazal Akbar Jan, Asmat Ara et al. / July 2017. – No. 2. – P.641–648.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Krupskaya L.T. K voprosu otsenki khvostokhranilishcha kak istochnika zagryazneniya obyektov prirodnoy sredy [On the issue of evaluating a tailing dump as a source of pollution of environmental objects] / L.T. Krupskaya, A.M. Derbentseva, K.V. Ionkin et al. // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin] – 2009. – № 5. – Vol. 2. – P. 234–242 [in Russian]
2. Krupskaya L.T. Problemy snizheniya ekologicheskogo ushcherba ekosistemam, nanesennogo v proshlom veke dobychey mineral'nogo syr'ya, i puti ikh resheniya v DFO [Problems of reducing environmental damage to ecosystems caused in the last century by the extraction of mineral raw materials, and ways to solve them in the Far Eastern Federal District] / L.T. Krupskaya, V.A. Zvereva, D.A. Golubev et al. // Ekologicheskaya khimiya [Environmental chemistry]. – 2016. – № 5. – Vol. 2. – P. 91–99 [in Russian]
3. Glinjanova I.J. Monitoring ajerozolej v atmosfernom vozduhe naselennykh punktov [Monitoring of aerosols in the atmospheric air of settlements] / I.J. Glinjanova // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. – 2022. – № 2. [Electronic resource] URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2022/74842 (accessed: 12.02.2022) [in Russian]
4. Rossinskaja M.V. Jelementy jekologicheskogo monitoringa, ih kratkaja harakteristika i vlijanie na kachestvo okruzhajushhej prirodnoj sredy i zdorov'e naselenija regiona [Elements of environmental monitoring, their brief characteristics and impact on the quality of the environment and the health of the population of the region] / M.V. Rossinskaja, N.P. Rossinskij // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. – 2012. – № 1. [Electronic resource]. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/668 (accessed: 12.02.2022) [in Russian]
5. Rastanina N.K. Otsenka riska zdorov'yu naseleniya, svyazannogo s promyshlennym zagryazneniyem otkhodami byvshego gornorudnogo predpriyatiya Khrustal'nenskiy GOK. [Assessment of public health risk associated with industrial pollution from waste from the former mining enterprise Khrustal'nskiy GOK.] / N.K. Rastanina, L.T. Krupskaya, D.A. Golubev et al. // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. – 2017. – No 12. – P. 88 – 95 [in Russian]
6. ПНД Ф 16.1.2.3.3.11-98. Kolichestvennyy khimicheskij analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy sodержaniya metallov v tverdykh ob'yektakh metodom spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy [Quantitative chemical analysis of soils. Method of measurement of metal content in solid objects by inductively coupled plasma spectrometry]. – Moscow, 1998 [in Russian]
7. Golubev D.A. Otsenka toksichnykh otkhodov khvostokhranilishch Primorskogo kraja i vozmozhnost' ikh ispol'zovaniya v nekotorykh otraslyakh narodnogo khozyaystva [Assessment of toxic waste from tailings of the Primorsky Territory and the possibility of their use in some sectors of the economy] / D.A. Golubev, R.G. Melkonyan, N.K. Rastanina et al. // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. – 2017. – № 10. – P. 36–42 [in Russian]
8. Kachor O.L. Geoekologicheskaya otsenka territoriy zon vliyaniya nakoplenykh mysh'yakovistykh otkhodov gomopererabatyvayushchey promyshlennosti i metodologiya likvidatsii etogo vliyaniya: monografiya [Geocological assessment of territories of zones of influence of accumulated arsenic wastes of the mining and processing industry and the methodology for eliminating this influence] / Kachor O.L. // Irkutsk : IRNITU, 2019. – 160 p. [in Russian]
9. Md. Simul Buyan. Heavy Metals in Some Commercially Important Fishes in the Meghna River Adjacent to the Narsingdi District in Bangladesh: Health risk Assessment. / Md. Simul Buyan, Muhammad Abu Bakar, Md. Shafikul Islam et al. // American Journal of Life Sciences. – Vol. 4 – No. 2. – 2016. – P. 60–70. DOI: 10.11648/J.Superleague.20160402.17
10. Muhammad Idrees. Analysis and human health risk of selected heavy metals in water, sediments, and freshwater fish (labeo rohita, cyprinus carpio, glyptothorax punjabensis) collected by the Three Rivers district Charsadda, Khyber-Pakhtunkhwa, Paki / Muhammad Idrees, Fazal Akbar Jan, Asmat Ara et al. / July 2017. – No. 2. – P.641–648.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.025>

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА (СОЦИАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ НА ТЕРРЕНКУРАХ КУРОРТНОГО ПАРКА КИСЛОВОДСКА)

Обзорная статья

Ушакова Д.А.¹, Скрипчинская Е.А.²*, Хенкина Л.В.³, Глушко М.В.⁴

¹ Ставропольский государственный медицинский университет, Ставрополь, Россия;

² Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия;

³ Дагестанский государственный педагогический университет, Пятигорск, Россия;

⁴ Ставропольский государственный педагогический институт, Ставрополь, Россия

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

Аннотация

Статья посвящена вопросам медицинской географии, в ней рассматривается оздоровительная рекреация курорта группы Кавказских Минеральных Вод – Кисловодска. Город-курорт является уникальным по своим ландшафтным условиям. Дозированная лечебная ходьба – терренкур оказывает благоприятное воздействие на организм человека, в целом, и на заболевания опорно-двигательного аппарата, в частности. Добровольческая деятельность способствует решению социальных проблем, может содействовать оздоровлению населения, путем широкого медицинского просвещения и популяризации здорового образа жизни. Собранный теоретико-методологический материал имеет существенную практическую значимость, т.к. данный проект реализуется в настоящее время.

Ключевые слова: медицинская география, оздоровительная рекреация, терренкур, Кисловодский национальный парк, добровольчество.

IMPACT OF GEOGRAPHICAL ENVIRONMENT ON PUBLIC HEALTH (SOCIAL PROJECT ON TERRAINKUR IN THE RESORT PARK OF KISLOVODSK)

Review article

Ushakova D.A.¹, Skripchinskaya E.A.²*, Henkina L.V.³, Glushko M.V.⁴

¹ Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia;

² North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia;

³ Dagestan State Pedagogical University, Pyatigorsk, Russia;

⁴ Stavropol State Pedagogical University, Stavropol, Russia

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

Abstract

The article is dedicated to the issues of medical geography, it examines recreation in the resort of the Caucasian Mineral Waters in Kislovodsk. The resort city is unique in its landscape features. Moderate therapeutic walking – Terrainkur has a benevolent effect on human body in general and on particular diseases of the musculoskeletal system. Volunteer work helps to solve social problems, contributes to health promotion through extensive medical education and popularization of healthy lifestyles. The collected theoretical and methodological material has a significant practical significance, because the project is currently being implemented.

Keywords: medical geography, recreation, Kislovodsk National Park, volunteer work.

Введение

Написание обзорной статьи является актуальным и обусловлено сохраняющейся популярностью маршрутов по терренкурам в программах реабилитации пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата.

Обзор предопределяется необходимостью разработки методико-методологического подхода по всесторонней и комплексной оценке физиологических показателей населения в рамках более точного и эффективного подбора адекватных состоянию здоровья рекреантов нагрузок на маршрутах.

Медицинская география изучает «влияние особенностей географической среды на здоровье человека...» [1]. Из данного определения формируется одна из основополагающих задач данного научного познания – изучение влияния условий среды на здоровье населения. К основным направлениям исследования науки относится медико-географическая оценка компонентов природных факторов, таких как тип рельефа, тип климата, растительный и животный мир и т.д. В связи с чем, на современном этапе научного познания, учеными выделяется отдельная категория – медицинское ландшафтоведение, наука изучающая влияние специфики ландшафтов на здоровье человека, а также экологических последствий техногенных воздействий на природные комплексы. Добровольческая деятельность способствует решению социальных проблем, может содействовать оздоровлению населения, путем широкого медицинского просвещения и популяризации здорового образа жизни. Авторами разработан проект, находящийся в стадии реализации с привлечением волонтеров-медиков.

Основная часть

В пределах Российской Федерации регион отличается своей уникальностью – по своим природно-климатическим и лечебным ресурсам не имеет аналога. Согласно исследованиям по районированию территории России по природным условиям для жизни населения, территория КМВ относится к наиболее благоприятным. Медико-географические районы отражают объективно существующие территориальные динамические системы, достаточно однородные по условиям формирования общественного здоровья [2].

Медико-географического районирования исследуемых территорий всегда сопряжено с показателями медико-географических условий:

- климатические показатели (температура воздуха, циркуляция воздушных масс, радиационный баланс и т.п.),
- экстремальность климатических условий,
- уровень загрязнения воздушных и водных масс.

Кавминводам присвоен высокий статус: «Особо охраняемый эколого-курортный регион Российской Федерации Кавказские Минеральные Воды». Кавказские Минеральные Воды (КМВ) – самый значимый курортно-туристский комплекс Ставропольского края, имеют выгодное географическое расположение, обладают уникальными рекреационными ресурсами, прежде всего для лечебно-оздоровительного отдыха. Регион КМВ обладает значительной привлекательностью и конкурентными преимуществами в силу уникальности, контраста, компактного размещения и комплексных лечебно-оздоровительных факторов, к которым следует отнести уникальные характеристики ландшафта в целом, и его отдельных компонентов, в частности – рельеф, климатические показатели и т.д. Подобное сочетание компонентов ландшафта и природных факторов благоприятно влияет на рекреантов и имеет высокий лечебный эффект, делает регион уникальным по эффективности и качеству лечения.

Кисловодск находится в предгорьях Большого Кавказа на высотах 800-1069 м, располагается в долине, имеющей протяженность с юго-востока на северо-запад около четырех километров. С севера город закрыт Дарьинскими, а с востока и юга – Джинальским хребтами, благодаря чему курорт оказался в котловине, защищенной от холодных ветров и туманов. Город Кисловодск и прилегающие к нему территории входят в провинцию горных ландшафтов лесостепей и остепненных лугов Большого Кавказа, и представлены Кубано-Малкинским окултуренным ландшафтом лесостепей среднегорий, структурно-денуационных моноклитных куэст, межкуэстовых эрозионно-тектонических депрессий и речных долин. На территории ландшафта сохранились значительные площади природных комплексов, формирующих природные свойства среды жизни. Кисловодск представляет собой самостоятельный городской рекреационный ландшафт [3]. Кисловодский ландшафт, вследствие выгодного географического положения, отличается благоприятными микроклиматическими условиями, который широко используются в курортной практике. Воздух – сухой, не загрязнен, ионизирован, относительная влажность не более 65%. Число солнечных дней порядка 300 в год.

В городе Кисловодске находится единственный в крае национальный парк (рисунок 1). Парк разбит в 1823 году, а в 2020 году преобразован в заповедник.

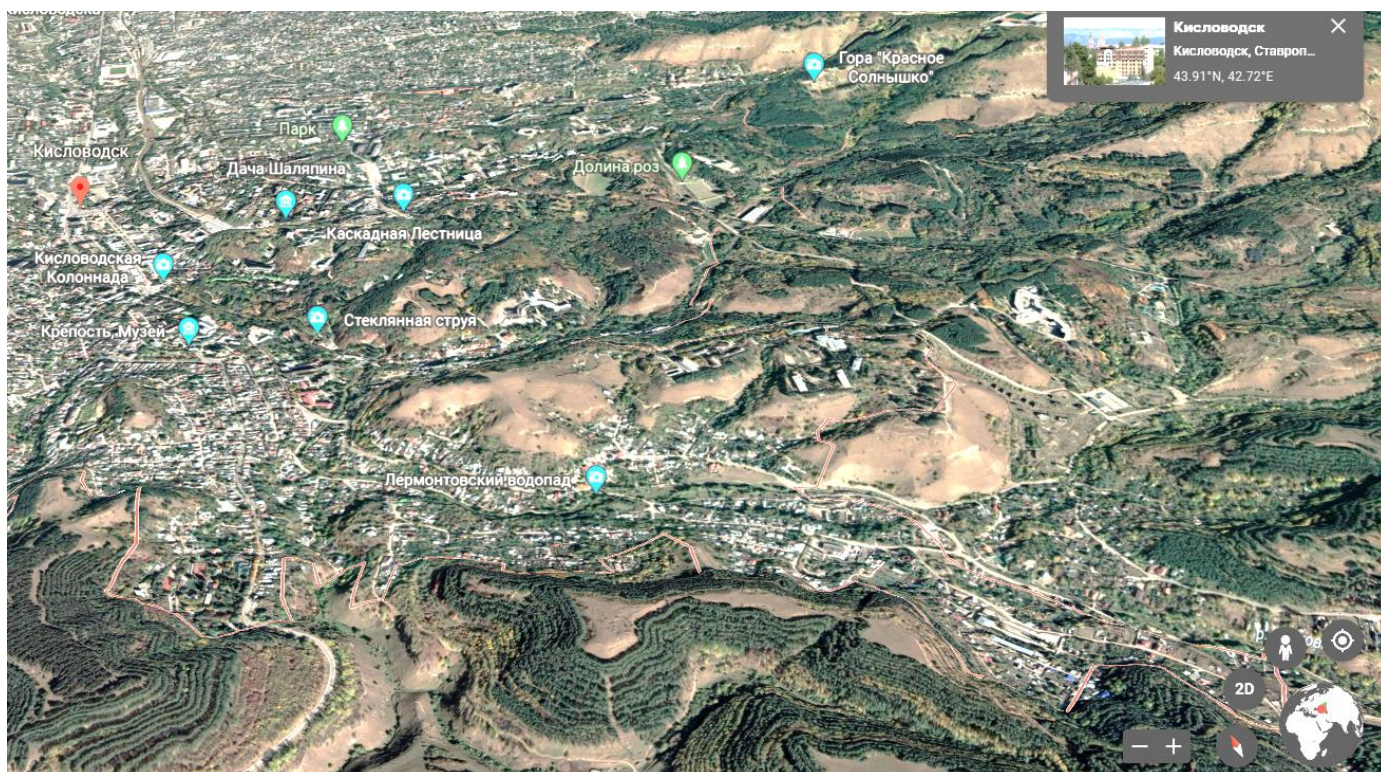


Рис. 1 – Кисловодский национальный парк [4]

Часть курса лечения и оздоровления рекреантов в Кисловодске проявляется в прогулках по парковой зоне, которая простирается на площади в 1340 га. Нижняя часть парка расположена на высоте 830 м, верхняя – 1409 м. Парковый комплекс обустроен, в его пределах разбиты аллеи, дорожки и проложены специальные оздоровительные маршруты – терренкуры. Данный метод лечения интенсивно практикуют в городе Кисловодске. По общественной функции и технологии выделяется вид рекреационной деятельности – оздоровительная и спортивная рекреация, куда и включен прогулочный и маршрутный туризм. В сочетании с еще одним видом рекреационной деятельности – лечебно-курортной рекреацией, учитывающей основные лечебные естественные факторы (климат, рельеф), сформировалась территория с огромным потенциалом. Рельеф и те возможности, которые он представляет для развития различных видов спортивно-оздоровительной деятельности в пределах данной территории, а также климат и его медико-биологические характеристики с комфортными для отдыха сезонами, и рассматривается как потенциал данного ландшафта.

Терренкур или дозированная ходьба – чередующаяся ходьба по ровному и пересеченной местности с наращиванием темпа и двигательной активности с целью регуляции кровообращения, метод тренировки, а также лечения некоторых заболеваний. В многочисленных научных исследованиях изучена взаимосвязь между физической активностью и состоянием опорно-двигательного аппарата.

В современном социуме возрастает интерес людей к здоровью, продлению и повышению качества жизни. Тренировки на терренкурах позиционируется как эффективный метод укрепления здоровья. В настоящее время появилась тенденция организации «маршрутов здоровья» в городских условиях. Данной работа направлена на разработку рекомендации и предложений по оптимизации применения терренкура в лечебно-профилактических целях.

В связи с этим создания проекта «Терренкур – восхождение к здоровью. Профилактика заболеваний опорно-двигательного аппарата у населения Ставропольского края и организация оздоровительных пешеходных маршрутов» силами добровольческого движения является своевременным и актуальным.

Маршруты терренкуров подразделяются на 4 категории [6]:

- ровные дороги, удобные для пешей ходьбы (угол подъема от 0° до 4°);
- дорожки с незначительным уклоном (угол подъема от 5° до 10°);
- более длинные дорожки с более значительным уклоном (угол подъема от 10° до 15°);
- крутые горные тропинки с трудным подъемом, большим уклоном (угол подъема от 15° до 20°) (рисунок 2).

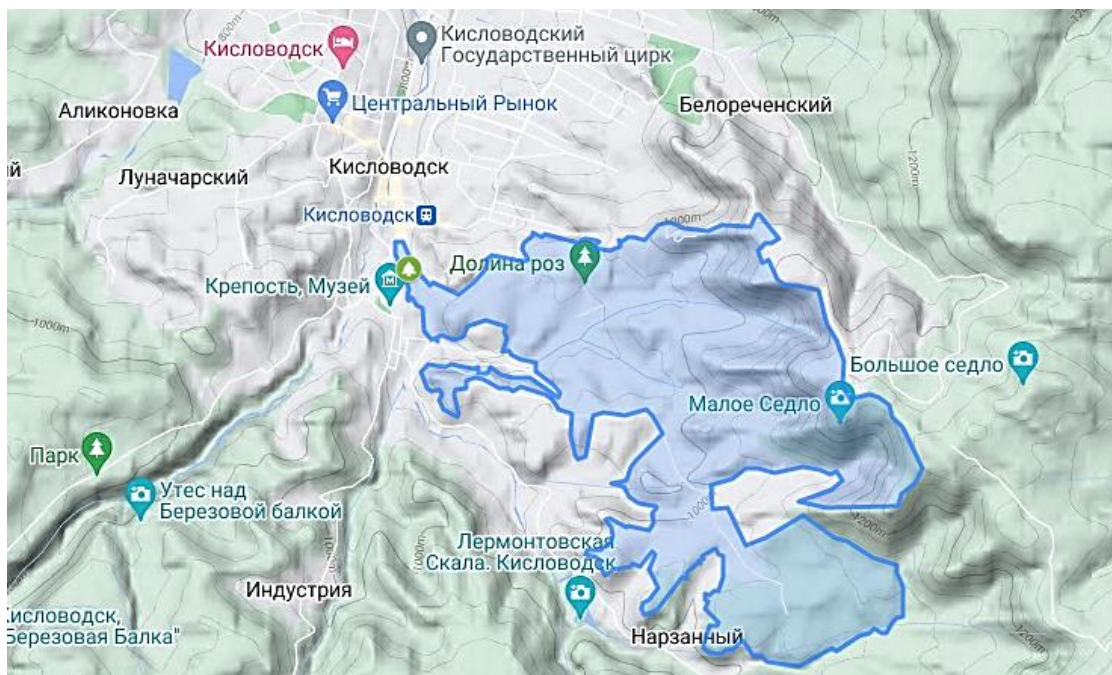


Рис. 2. – Рельеф Кисловодского парка [5]

Степень нагрузки при прохождении маршрута определяется дистанцией, величиной угла подъема (от 3° до 20°), темпом ходьбы (60-80 шаг/мин – медленный; 80-100 шаг/мин – средний; более 100 шаг/мин – быстрый), количеством и продолжительностью остановок, и другими факторами. Используются общекурортные и санаторные терренкуры. По степени нагрузки в санаторном терренкуре различают маршруты: легкий – до 500 м; средний – до 1500 м; трудный – до 3000 м. Курорты, имеющие такие планированные дорожки, стали называться курортами с территориями для восхождения – Terrain-Kurorte [6].

В Кисловодском парке для лечения ходьбой проложены 5 маршрутов терренкура и Туристическая тропа. Маршруты 1, 2 и 2А, относятся к легкой сложности; 2Б – маршрут дополнительный, сложен своей протяженностью; 3-й – маршрут повышенной сложности – здесь большой угол подъема (рисунки 4–8) [7].

Протяженность маршрутов терренкуров различная: от 1,6 до 10,4 км. Их общая протяженность составляет более 24,3 километра. Вместе с туристической тропой – 30,2 км. Каждый маршрут обозначен на столбиках терренкурных станций своим цветом. На маршрутах установлены каждые 100 метров указатели станций. На них отмечена высота над уровнем моря, угол подъема или спуска, расстояние от Нарзанной галереи (рисунок 3) [7].

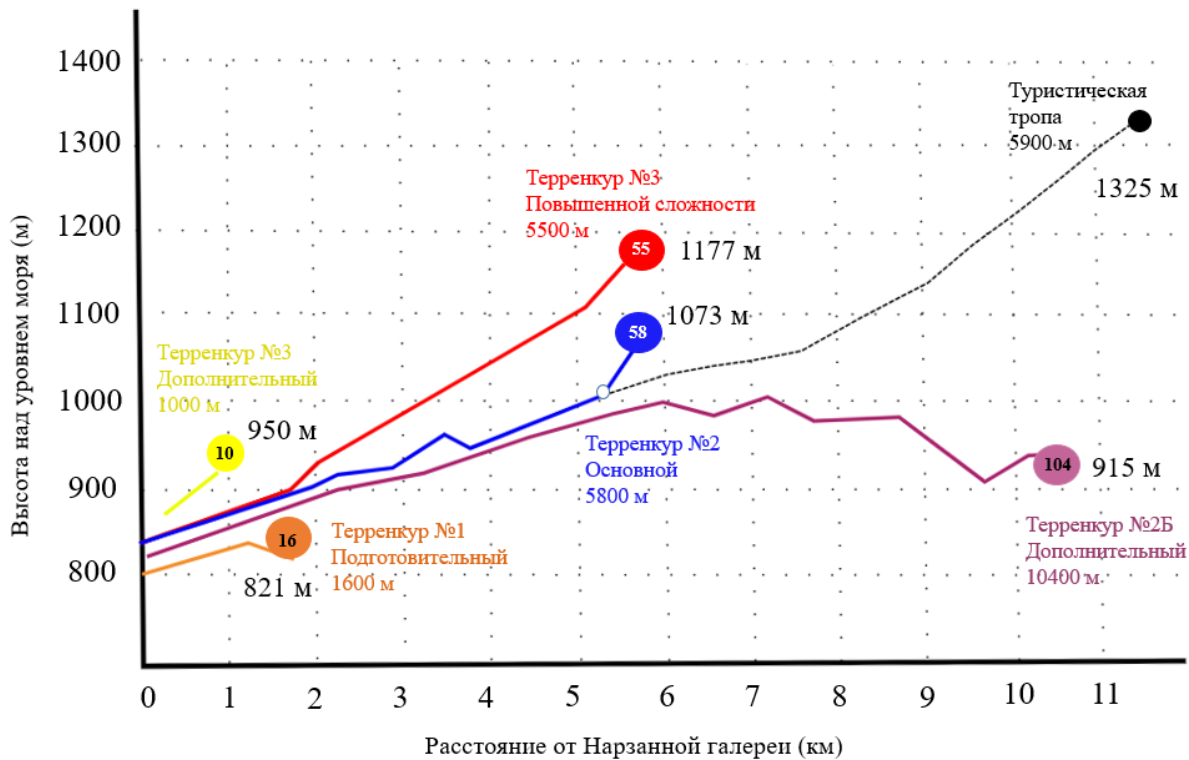


Рис. 3 – Основные характеристики терренкуров Кисловодского парка

Терренкур № 1

Самый легкий и самый короткий (рисунок 4). Протяженность всего 1600 метров. Высота над уровнем моря в конечной точке – 821 м. Пройти его можно за 30-40 мин. Угол подъема по пути не превышает 4°, местами дорожка ровная, а в некоторых местах идет под уклон. Весь маршрут проходит по Нижнему парку, дорожка ведет под раскидистыми деревьями, которые защищают от прямых солнечных лучей.

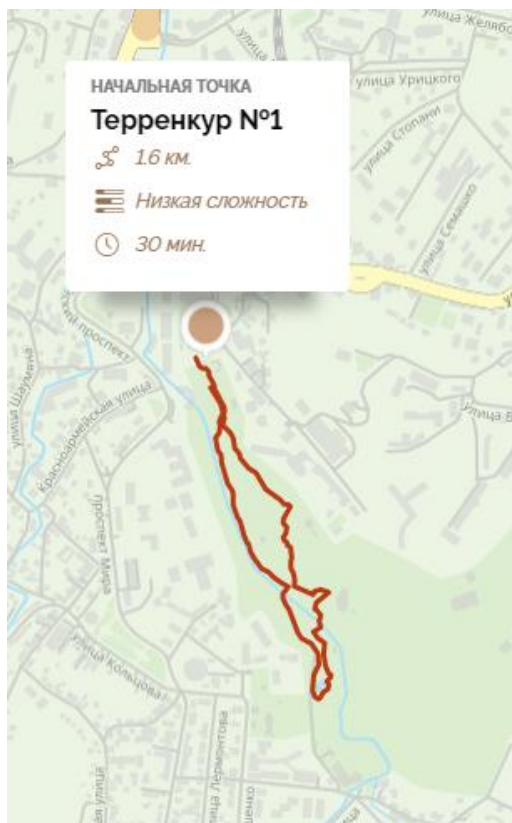


Рис. 4 – Карта-схема терренкура № 1 Кисловодского парка [7]

Терренкур № 2

Основной (рисунок 5). Протяженность маршрута 5800 метров. Высота над уровнем моря в конечной точке – 1073 м. На его прохождение потребуется 1,5 -2 часа. Маршрут и длиннее, и круче маршрута № 1. Угол подъема на дорожках составит максимум 5-7°, большая часть маршрута идет под углом 3-4°, меньшая – по ровному месту или же под небольшой уклон. Подъемы и спуски чередуются с ровными отрезками.

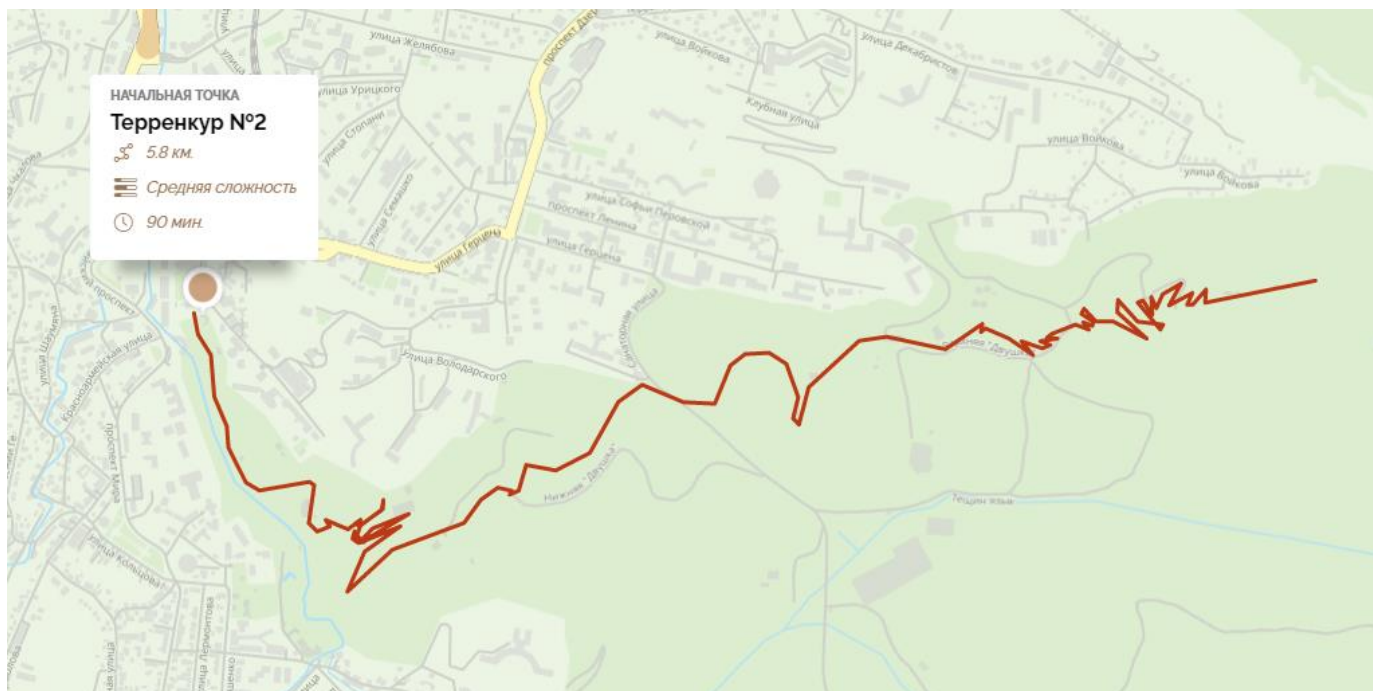


Рис. 5 – Карта-схема терренкура № 2 Кисловодского парка [7]

Терренкур № 2А

Дополнительный (рисунок 6). Это самый короткий маршрут терренкура и самый легкий. Протяженность его составляет всего 1000 метров. Высота над уровнем моря в конечной точке – 950 м. Ориентировочное время прохождения маршрута 30-40 минут. Угол подъема небольшой, составляет всего 4-5°. Маршрут удобен для отдыхающих близлежащих санаториев, для выхода в парк и переход на третий маршрут.

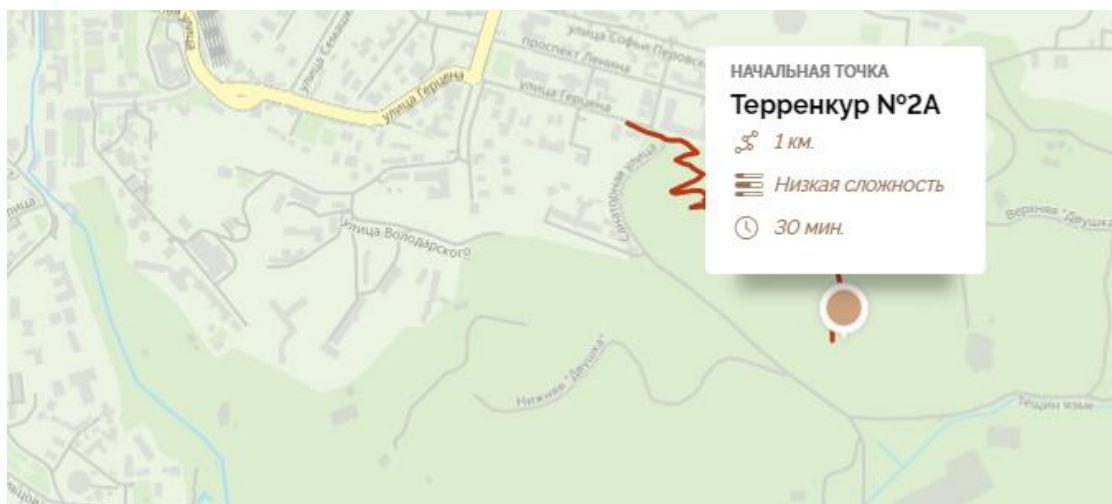


Рис. 6 – Карта-схема терренкура № 2А Кисловодского парка [7]

Терренкур № 2Б

Дополнительный (рисунок 7). Протяженность маршрута 10400 метров. Высота над уровнем моря в конечной точке – 915 м. Это самый длинный по протяженности маршрут. Ориентировочное время его прохождения 2-3 часа. Угол подъема на дорожках составляет 3-4°. На маршруте нет больших подъемов или спусков, сложность заключается в расстоянии.

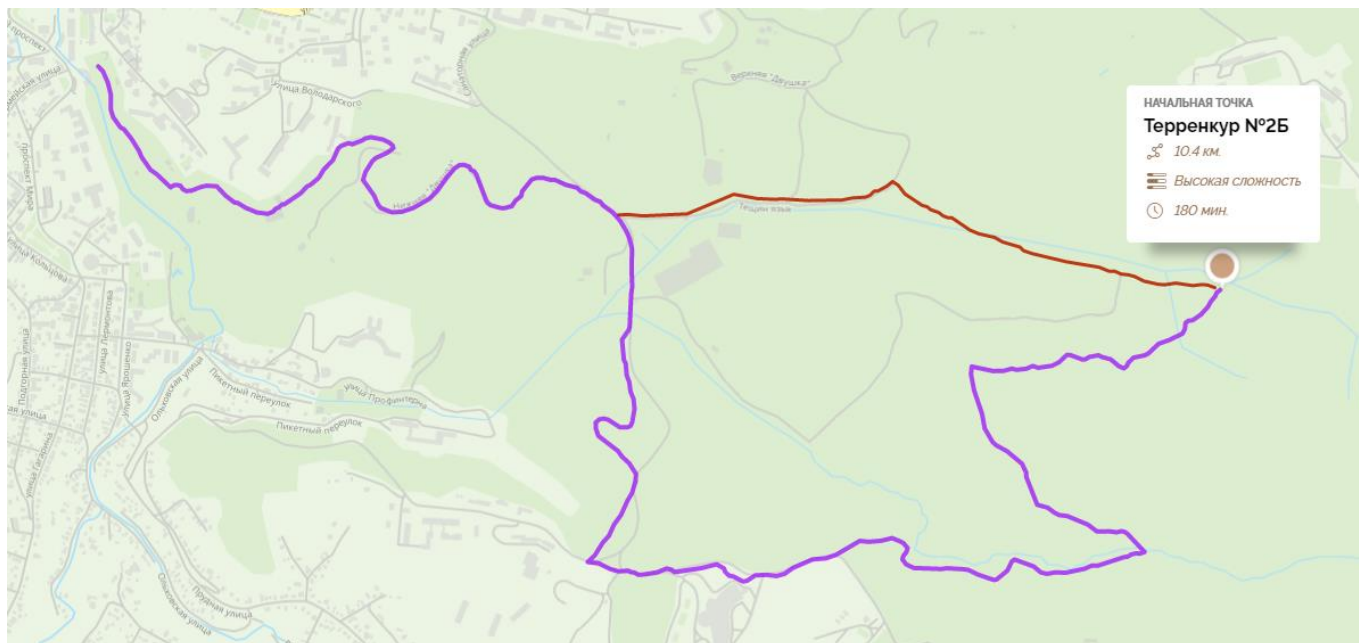


Рис. 7 – Карта-схема терренкура № 2Б Кисловодского парка [7]

Терренкур № 3

Повышенной сложности (рисунок 8). Не самый протяженный маршрут, его длина составляет 5500 метров. Высота над уровнем моря в конечной точке – 1177 м. Считается самым сложным, так как большая часть дорожек имеет подъем 7° , хотя местами достигает 13° . Общий подъем всего маршрута по вертикали от Нарзанной галереи до Синих камней составит 345 метров. Ориентировочное время прохождения 2-3 часа [7].

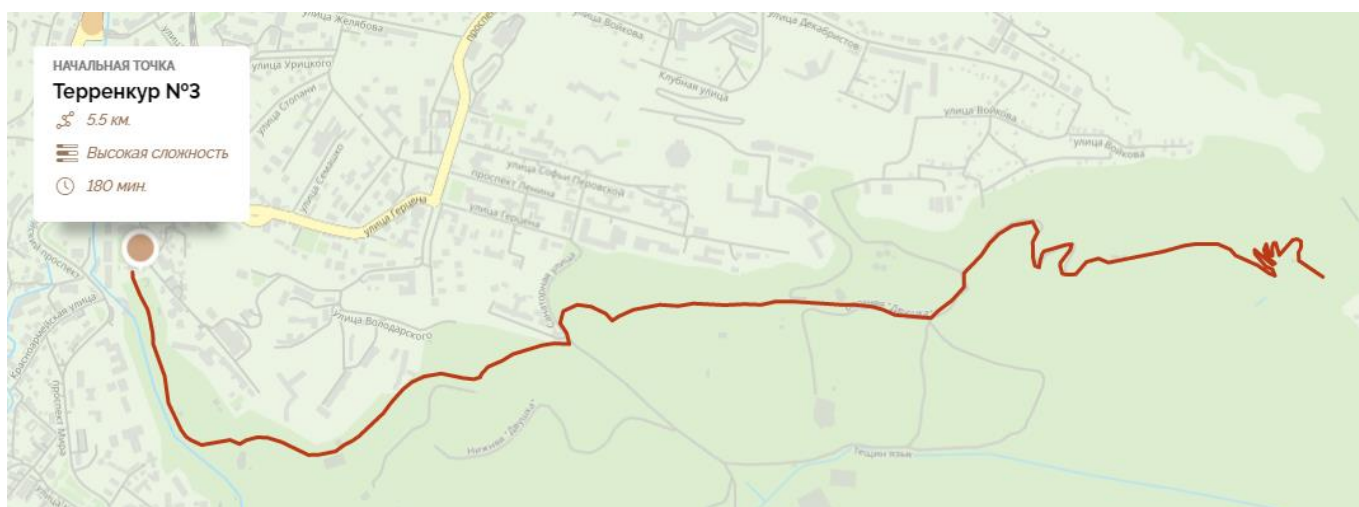


Рис. 8 – Карта-схема терренкура № 3 Кисловодского парка [7]

Авторами разработан проект, касающийся вопросов применения терренкуров в оздоровительных целях, с использованием работы волонтеров-медиков. Составлена программа реализации проекта и перспективный план, осуществлено методико-методологическое обоснование, касающееся вопросов работы волонтеров-медиков на маршрутах, сбору статистической информации для последующей аналитической обработки. Также проектом предусмотрено оказание помощи в обучении волонтеров проекта; проведение необходимого обучения; контроль и оценивание проведение занятий и мероприятий проекта.

Краткая информация о проекте

Проект «Терренкур – восхождение к здоровью» направлен на организацию масштабной информационно-просветительской кампании со взрослым населением Ставропольского края, направленной на создание комплексного представления о факторах риска развития заболеваний суставов, а также на обучение основным навыкам сохранения здоровья опорно-двигательного аппарата. Мероприятия в рамках проекта проводятся в нескольких форматах – это открытые диалоги о здоровье, обучение принципам здорового образа жизни, мастер-классы по скандинавской ходьбе, занятия лечебной физкультурой. Мероприятия в рамках проекта проходят как в офлайн, так и в онлайн-формате через платформу «Zoom» – это профилактические онлайн-беседы, зарядки и викторины. Уникальная особенность проекта – это организация постоянной работы в формате «мобильный кабинет здоровья» на оздоровительных маршрутах Кавказских Минеральных Вод (г. Кисловодск), в которых желающие безвозмездно смогут проверить основные показатели здоровья (артериальное давление, пульс, вес, рост, жизненную емкость легких, зрение, содержание глюкозы), получить консультации по профилактике заболеваний, а также об особенностях применения лекарственных

препаратов. Работу таких кабинетов будут осуществлять волонтеры – медики, которые прошли соответствующее обучение. Для осуществления консультаций планируется привлечь в работу практикующих врачей из числа волонтеров-медиков (не менее 5 человек). За 11 месяцев его реализации планируется вовлечь в мероприятия проекта не менее 3000 человек, привлечь для проведения мероприятий в рамках проекта не менее 50 волонтеров-медиков, создать не менее 50 публикаций о ходе его реализации, с общим количеством просмотров – не менее 1000. Проект прошел апробацию в качестве проведения «пробных» социальных акций, и получил высокие оценки жителей и гостей Кавказских Минеральных Вод, а также запрос на организацию постоянной и системной работы.

Актуальность проекта

Нарушения и болезни костно-мышечной системы – это более 150 нарушений здоровья, поражающих опорно-двигательный аппарат. Данные недавнего исследования «Глобальное бремя болезней» (ГБВ) свидетельствуют о том, что примерно 1,71 миллиарда человек в мире страдают от нарушений и болезней костно-мышечной системы. Хотя распространенность болезней костно-мышечной системы различается в зависимости от возраста и диагноза, от них страдают люди любого возраста повсюду в мире. Нарушения и болезни костно-мышечной системы также занимают ведущее место среди факторов инвалидности в мире: на них приходится примерно 149 миллионов лет жизни, прожитых с инвалидностью, что в глобальном масштабе составляет 17% всех лет, прожитых с инвалидностью, обусловленной разными причинами [8].

Анализ общей заболеваемости в Ставропольском крае позволил установить, что хроническая патология костно-мышечной системы и соединительной ткани занимает довольно значительное место среди других видов заболеваний и стоит в крае на третьем месте, уступая болезням кровообращения и органов дыхания. С 2019 по 2020 годы количество таких заболеваний выросло на 5,8%. Заболевания опорно-двигательного аппарата, приводящие к потере подвижности суставов оказывают существенное влияние на демографические показатели, потерю трудового потенциала и инвалидизацию населения [9]. В то же время исследования показывают, что регулярное проведение профилактических мероприятий (коррекция питания, коррекция веса, лечебная физическая культура) позволяет снизить риск возникновения заболеваний на 25% [10]. Скандинавская ходьба является универсальным видом двигательной активности, лучшим средством избавиться от боли в суставах и сколиозе, так как палки способствуют снижению нагрузки избыточного веса на опорно-двигательный аппарат [11]. Сочетание скандинавской ходьбы и терапевтических кардио-нагрузок во время специально разработанных пеших маршрутов дает оптимальный эффект для коррекции существующих и профилактики вновь возникающих заболеваний суставов. Таким образом, сочетание регулярной профилактической работы и оздоровительных мероприятий – важнейший фактор сохранения здоровья населения, что способствует формированию системы мотивации к здоровому образу жизни, включая здоровое питание и отказ от вредных привычек, что является одной из целей национального проекта «Демография» и, таким образом, способствует стратегии долгосрочного развития России до 2024 года. [12].

Основная цель проекта

Организовать в течение 11 месяцев реализации проекта масштабную информационно-просветительскую кампанию в Ставропольском крае, направленную на создание комплексного представления о факторах риска развития заболеваний суставов, а также на обучение основным навыкам сохранения здоровья опорно-двигательного аппарата, путем проведения цикла профилактических мероприятий, организаций занятий лечебной физкультурой и оздоровительной ходьбой, а также работу в мобильных кабинетах здоровья, таким образом вовлечь в работу не менее 100 волонтеров-медиков, вовлечь в мероприятия проекта не менее 3000 человек.

Задачи проекта

- Способствовать формированию у населения мотивации и навыков ведения здорового образа жизни путем проведения массовых профилактических мероприятий, и акций.
- Актуализировать важность профилактической работы путем организации информационно-просветительской программы.

Основные целевые группы

- Молодежь и студенты, проживающие в Ставропольском крае.
- Возраст 16–25 лет – 40% аудитории проекта работающая молодежь, проживающая в Ставропольском крае.
- Возраст 25–30 лет – 30% аудитории проекта жители и гости курортов Ставропольского края (Кавказские Минеральные Воды (г. Кисловодск)).
- Возраст 30–55 лет – 30% аудитории проекта.

Таким образом, 70% аудитории проекта составляет молодежь Ставропольского края.

Реализация проекта

Проведены две презентации проекта в городах Ставрополь, Кисловодск, с участием более 100 человек основной аудитории и не менее 500 человек - аудитории социальных сетей проекта.

Для участия в проекте набрано 93 волонтера – жителей 5 городов Ставропольского края (Ставрополь, Пятигорск, Ессентуки, Кисловодск, Минеральные Воды и Железноводск). Проведено анкетирование и тестирование волонтеров, определены начальные знания, на основании чего разработана программа их обучения.

Проведено пять вебинаров для волонтеров проекта. Проведено три Школы волонтеров медиков для муниципальных образований Ставропольского края.

Проведено анкетирование и тестирование волонтеров, определены их знания после прохождения обучения, проведен анализ эффективности обучения волонтеров. Сформировано 10 команд волонтеров для последующей профилактической работы.

Волонтерами проведено четыре профилактических мероприятий для 76 жителей Ставропольского края.

Организована работа по сбору данных обратной связи (анкетирование, мониторинг, анализ промежуточных итогов профилактических мероприятий) для определения эффективности профилактической работы среды населения.

Организованы регулярные мастер-классы и занятия по скандинавской ходьбе по оздоровительным пешим маршрутам (терренкурам), что дает оптимальный эффект для коррекции существующих и профилактики вновь возникающих заболеваний суставов.

Организована постоянная работа волонтеров-медиков и практикующих врачей в мобильных кабинетах здоровья на терренкурах.

Организация постоянной работы в формате «мобильный кабинет здоровья» на оздоровительных маршрутах Кавказских Минеральных Вод (г. Кисловодск), в которых желающие безвозмездно смогут проверить основные показатели здоровья (артериальное давление, пульс, вес, рост, жизненную емкость легких, зрение, содержание глюкозы), получить консультации по профилактике заболеваний, а также об особенностях применения лекарственных препаратов. Работу таких кабинетов будут осуществлять волонтеры – медики, которые прошли соответствующее обучение. Для осуществления консультаций привлечены в работу практикующих врачей из числа волонтеров-медиков. Основной поток рекреантов ожидается в летний период отпусков и каникул.

Заключение

Таким образом, в современных условиях терренкуры становятся востребованным в программах медицинской реабилитации различных хронических заболеваний, ликвидации последствий критических ситуаций, оздоровления и поддержания физической формы. Если учесть большой опыт отечественной курортологии и санаторно-курортного лечения, возрождение интереса врачей и специалистов в нашей стране к этому эффективному методу курортного лечения является актуальной задачей.

Итогом реализованного проекта предполагается осуществление сбор информации (количественные и качественные показатели), анализ данных обратной связи по окончании реализации проекта, систематизация полученного опыта в виде успешной социальной практики, которая является важным ресурсом для продолжения проекта и его дальнейшего тиражирования и формирование перспективного плана продолжения проекта, а также оценка результативности и эффективности реализации проекта в динамике его реализации.

Перспектива развития и потенциал проекта

По окончании реализации проекта, опираясь на предыдущий опыт работы, нами разработана стратегия фандрайзинга на основании положительного общественного резонанса, который дает проведение инклюзивного бала. Планируем участие нашего проекта в конкурсах на получения субсидий из бюджета Ставропольского края, грантовые конкурсы Федерального агентства по делам молодежи. Также планируем активно вовлекать бизнес-сообщество региона для оказания материальной поддержки. Проект планируется проводить ежегодно, вовлекая новых партнеров. Уже получен запрос от Министерства труда и социальной защиты населения Ставропольского края на совместное проведение мероприятий в период с 2022-2024 гг. Получено принципиальное согласие от партнеров проекта на совместную работу по его продолжению в рамках реализации национального проекта «Демография» в Ставропольском крае.

Проект способствует профессиональному росту волонтеров-медиков путем вовлечения их в системную профилактическую работу; повышению информированности и ответственного отношения к своему здоровью жителей и гостей Ставропольского края; увеличению качества и продолжительности здоровой жизни населения, снижению инвалидизации населения от заболеваний опорно-двигательного аппарата и их осложнений; полноценной и качественной реализации в Ставропольском крае мероприятий национального проекта «Демография».

Благодарности

Авторы статьи выражают глубокую признательность Министерству труда и социальной защиты населения Ставропольского края и Администрации города Кисловодск.

Acknowledgement

The authors of the article express their deep gratitude to the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Stavropol Territory and the Administration of the city of Kislovodsk.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Воронов А.Г. Медицинская география : учебное пособие / А.Г. Воронов – Москва : Изд-во Московского государственного университета, 1981. – 169 с.
2. Деряпа Н.Р. Медико-географическое районирование и прогнозирование здоровья популяций / Н.Р. Деряпа. – Москва, 1981. – 175 с.
3. Шальнев В.А. Современные ландшафты Ставропольского края : учебное пособие / В.А. Шальнев. – Ставрополь : Изд-во СКФУ, 2014. – 186 с.
4. Google Планета Земля. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (дата обращения 13.04.22).
5. Google Карты. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.google.com/maps/> (дата обращения 13.04.22).

6. Барашков Г.Н. Терренкуры и физическая тренировка ходьбой: реабилитационно-профилактические аспекты / Г.Н. Барашков, В.Н. Сергеев, Н.С. Карамнова // Профилактическая медицина –2021. – № 5. – Т. 24. – С. 87–93
7. Кисловодский национальный парк. Маршруты. [Электронный ресурс]. URL: <http://kispark.ru/routes/terrenkur-1/> (дата обращения 5.02.22).
8. Всемирная организация здравоохранения. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions> (дата обращения 7.02.22).
9. Роспотребнадзор. [Электронный ресурс]. URL: <http://26.rospotrebnadzor.ru/ond/sgm/5781/> (дата обращения 23.02.22).
10. Компания ФармВИЛАР. Препарат Артракам. [Электронный ресурс]. URL: <https://artracam.com/news/profilaktika-zabolevaniy-sustavov/> (дата обращения 17.04.22).
11. Студенческий научный форум. [Электронный ресурс]. URL: <https://scienceforum.ru/2017/article/2017031417> (дата обращения 9.10.21).
12. Национальный проект «Демография». [Электронный ресурс]. URL: <https://strategy24.ru/rf/demography/projects/natsional-nyu-proyekt-demografiya> (дата обращения 9.10.21).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Voronov A.G. Medicinskaja geografija [Medical geography] / A.G. Voronov – Moscow : Publishing House of Moscow State University, 1981. – 169 p. [in Russian]
2. Deryapa N.R. Mediko-geograficheskoe rajonirovanie i prognozirovanie zdorov'ja populjacij [Medico-geographical zoning and prediction of population health] / N.R. Deryapa, M. – 1981. – 175 p. [in Russian]
3. Shalnev V.A. Modern landscapes of the Stavropol Territory / V.A. Shalnev – Stavropol : Publishing House of the North Caucasus Federal University, 2014. – 186 p. [in Russian]
4. Google Earth. [Electronic resource]. URL: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (accessed 04/13/22) [in Russian]
5. Google Maps. [Electronic resource]. URL: <https://www.google.com/maps/> (accessed 04/13/22) [in Russian]
6. Barashkov G.N. Terrenkury i fizicheskaja trenirovka hod'boj: reabilitacionno-profilakticheskie aspekty [Terrencures and physical training by walking: rehabilitation-preventive aspects] / G.N. Barashkov, V.N. Sergeev, N.S. Karamnova // Profilakticheskaya Meditsina [Preventive medicine]. – 2021. – № 5. – Vol. 24. – P. 87–93 [in Russian]
7. Kislovodsk National Park. Routes. [Electronic resource]. URL: <http://kispark.ru/routes/terrenkur-1/> (accessed: 5.02.22) [in Russian]
8. World Health Organization. [Electronic resource]. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions> (accessed: 02/07/22) [in Russian]
9. Rosspotrebnadzor [Electronic resource]. URL: <http://26.rospotrebnadzor.ru/ond/sgm/5781/> (accessed: 02.23.22) [in Russian]
10. Company PharmVILAR. The drug Artrakam. [Electronic resource]. URL: <https://artracam.com/news/profilaktika-zabolevaniy-sustavov/> (accessed 04/17/22) [in Russian]
11. Student scientific forum. [Electronic resource]. URL: <https://scienceforum.ru/2017/article/2017031417> (accessed: 9.10.21) [in Russian]
12. National project «Demography». [Electronic resource]. URL: <https://strategy24.ru/rf/demography/projects/natsional-nyu-proyekt-demografiya> (accessed: 9.10.21) [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.026>

**ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И РАДИОНУКЛИДОВ
В ПОЧВАХ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
КАЗАНСКОГО СП ЛЮБИНСКОГО РАЙОНА ОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

Научная статья

Наседкин П.О.^{1,*}, Нежевляк О.В.², Шмидт А.Г.³

^{1,2} Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, Омск, Россия;

³ Центр агрохимической службы «Омский», Омск, Россия

* Корреспондирующий автор (po.nasedkin2022[at]omgau.org)

Аннотация

Почвы обладают буферностью и поэтому относительно устойчивы к антропогенному воздействию, однако, именно загрязнение почв и их многоплановая деградация существенно скажется в дальнейшем, поскольку восстановление почвенного плодородия – процесс длительный и сложный, поэтому одной из актуальных проблем является проблема динамики токсичных соединений, изучение законов их сорбции, миграции и аккумуляции в почве.

В статье представлены результаты проведения агрохимического обследования почв земель сельскохозяйственного назначения Казанского сельского поселения Любинского района Омской области.

Целью исследования являлась оценка содержания в почвах тяжелых металлов Pb, Cd, Cu, Zn и радионуклидов Sr-90, Cs -137, K – 40, Ra – 226, Th – 232.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, радионуклиды, почва, загрязнение, Омская область.

**EVALUATION OF HEAVY METALS AND RADIONUCLIDES CONTENT IN AGRICULTURAL SOILS OF THE
KAZAN RURAL SETTLEMENT OF THE LYUBINSKY DISTRICT OF THE OMSK REGION**

Research article

Nasedkin P.O.^{1,*}, Nezhevlyak O.V.², Schmidt A.G.³

^{1,2} Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Omsk, Russia;

³ Center of agrochemical service "Omsk", Omsk, Russia

* Corresponding author (po.nasedkin2022[at]omgau.org)

Abstract

Soils have buffering capacity and therefore are relatively resistant to anthropogenic impact, however, the contamination of soils and their multifaceted degradation will have a significant impact on the future, as the recovery of soil fertility is a long and complex process, which makes one of the relevant problems the dynamics of toxic compounds, the study of their sorption, migration and soil accumulation.

The article presents the results of the agrochemical study of agricultural soils of the Kazan rural settlement in the Lyubinsky district of Omsk region.

The aim of the study was to estimate the heavy metals content in soils Pb, Cd, Cu, Zn and Sr-90 radionuclides, Cs-137, K-40, Ra-226, Th-232.

Keywords: heavy metals, radionuclides, soil, pollution, the Omsk region.

Введение

Стремительное техническое развитие и увеличение химизации сельского хозяйства привели к увеличению загрязнения почв вредными веществами, в особенности тяжелыми металлами (ТМ) и радионуклидами. Большая концентрация данных веществ в почвах с/х назначения может привести к гибели урожая, а в редких случаях к выводу полей из севооборота.

По данным О.И. Нрига, источником природной эмиссии тяжелых металлов в окружающую среду является извержение вулканов, лесные пожары, морская вода и др. Основной причиной загрязнения почв тяжелыми металлами (ТМ) является деятельность человека. Источники техногенных эмиссий поллютантов: горно-металлургические, химические, машиностроительные, топливно-энергетические предприятия и т.д. [9].

Некоторые тяжёлые металлы, такие как As, Cd, Hg, Pb не оказывают существенного влияния на рост и развитие растений, поскольку им не свойственна какая-либо известная физиологическая функция в жизненном цикле растений, но такие тяжелые металлы как Cu, Fe, Mn, Mo, Ni и Zn являются одними из основных элементов, необходимыми для нормального роста и метаболизма растений. Однако избыток этих веществ может привести к загрязнению почвы и существенному отравлению растений.

Экологические последствия радиоактивного загрязнения почв заключаются в том, что, включаясь в биологический круговорот, радионуклиды через растительную и животную пищу попадают в организм человека и накапливаются в нем. Основными причинами, вызывающими радиоактивное загрязнение почвенного покрова, являются: тяжелая промышленность; разработка месторождений природных ископаемых; захоронение радиоактивных отходов; выбросы радиации АЭС; испытание ядерного оружия.

В почве в основном накапливаются радионуклиды с длительным периодом полураспада. Самым опасным для живых организмов является [8].

Целью исследования являлась оценка содержания в почвах тяжелых металлов Pb, Cd, Cu, Zn и радионуклидов.

Задачи исследования:

- Изучить проблему негативного влияния тяжелых металлов и радионуклидов на почву и растения;
- Провести отбор проб почвенных образцов;

- Оценить содержание радионуклидов и ТМ в почвах исследуемой территории;
- Сравнить полученные данные и сделать выводы о пригодности почв к сельскохозяйственному производству.

Методы и принципы исследования

Методы использованные при исследовании: полевой, лабораторный, статистический.

Методики проведения лабораторных анализов изложены в специальной нормативно-методической документации (ГОСТ 29269-91, Р 54038-2010 и др., ОСТ 10070-95).

Основные результаты

Общая площадь земель Казанского сельского поселения (СП) Любинского района Омской области составляет 10945 га. Последнее агрохимическое обследование Казанского СП по содержанию валовых форм ТМ было проведено в 2001 году.

Основными почвами хозяйства являются: чернозем обыкновенный среднемощный – 5567 га, чернозем обыкновенный солонцеватый – 1296 га, лугово – черноземная – 668 га, лугово – черноземная солончаковая – 346 га, луговые с мелкими солонцами – 399 га, солонцы – 251 га, солодь луговая мелкодерновая – 1681 га, болотные – 173 га, солончаки – 52 га.

В 2021 году в результате агрохимического обследования было изучено 9049 га – 82% от общей площади поселения. Из них 8071 га пашни – 73% от общей площади и 89% от исследованной. Пастбищ 923 га – 8% от общей площади и 10% от исследованной площади. Сенокосов 55 га – 0,5% от общей площади и 0,6% от исследованной площади СП. Для отбора образцов применялся метод маршрутного хода с использованием метрового бура БП-25-15 на глубине пахотного горизонта.

За период 2001-2021 годов, наблюдается снижение в концентрации валовых форм ТМ в почве. Это может быть связано с тем, что на данной территории практически не используются удобрения.

Анализ накопления почвами ТМ за период 2001-2021г. представлены на рисунке 1. (Данные за 2001 год предоставлены ФГБУ ЦАС «Омский», данные за 2021 получены магистрантом в ходе прохождения практики).

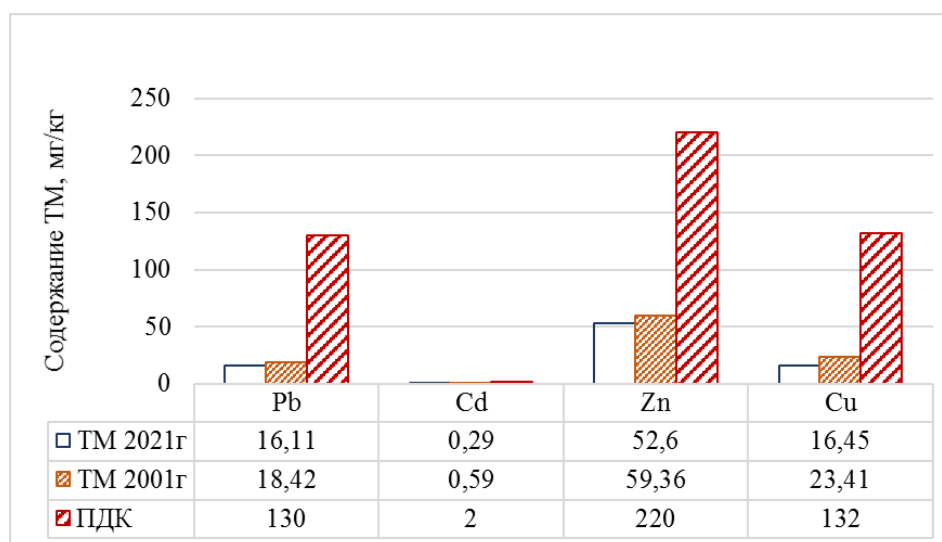


Рис. 1 – Среднее содержание валовых форм ТМ в почвах рабочих участков

Около 80% земель исследуемой территории используется сельскохозяйственными товаропроизводителями, часть из которых использует такие удобрения, как сульфат магния, карбамид.

Фосфорные удобрения, которые являются основным источником поступления ТМ в почву [7], а также органические удобрения здесь не применялись.

В почвах Казанского сельского поселения Любинского района Омской области за исследуемые периоды нет превышения ПДК по всем ТМ. Все исследуемые поля пригодны для ведения с/х производства.

Так же одновременно с агрохимическим обследованием почв на ТМ проводилось радиологическое обследование почв изучаемых сельскохозяйственных земель.

Среднее содержание радионуклидов в почве Бк/кг (по данным ФГБУ ЦАС «Омский») представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Среднее содержание радионуклидов в почвах Омской области и в среднем по России

Радионуклиды	Sr ⁹⁰ , Бк/кг	Cs ¹³⁷ , Бк/кг	K ⁴⁰ , Бк/кг	Ra ²²⁶ , Бк/кг	Th ²³² , Бк/кг	γ – фонн мкР/час
Казанское СП	2,8±0,3	16,2±3,4	568,0±109,0	72,0±18,0	55,0±14,4	10,0
Омская область	1,2	15,2	388,0	20,6	24,9	11,0
В среднем по России	6,5	22,0	520,0	27,0	30,0	11,0

Так как отсутствует ПДК радионуклидов в почвах, сравнение проводят со средним значением по Омской области и по России [5], [10].

Sr-90 и Cs-137 являются искусственными радионуклидами и в природе, вне загрязнений, не встречаются, в основном поступают в почву с продуктами радиоактивного распада топлива АЭС или ядерного взрыва. Большое количество Sr-90 и Cs-137 поступило окружающую среду в результате аварий на АЭС.

Среднее содержание Sr-90 и Cs-137 в почвах Казанского сельского поселения Любинского района Омской области меньше, чем в среднем по России на 43%, в основном это связано с отсутствием по близости предприятий ядерного топливного цикла.

Содержание Sr-90 и Cs-137 имеет незначительные превышения в сравнении со средним их содержанием по Омской области. На территории области радиоактивных выбросов не наблюдалось, следовательно, они были перенесены из других мест.

Территориально Казанское СП расположено в лесостепной зоне. В лесных почвах подстилка является одним из важнейших эколого-биосферных факторов, определяющих пространственно-временное поведение химических элементов, в том числе радионуклидов. Большая мощность подстилки приводит к нарушению капиллярных связей и передвижения влаги и веществ в толще почв и, следовательно, способствуют аккумуляции радионуклидов в подстилке откуда они мигрируют в минеральную толщу [11].

В лиственных лесах, где подстилка неполнопрофильная и маломощная, ее удерживающая способность невелика. Здесь наблюдается наибольшая интенсивность миграции основных дозообразующих радионуклидов, в частности Sr-90 и Cs-137, в минеральную толщу, где они прочно связываются гумусом.

Калий (K-40), радий (Ra-226) и торий (Th-232) являются естественными радионуклидами (ЕРН), которые образовались одновременно со всем стабильным веществом Земли и обуславливают ее естественную радиоактивность.

Превышение среднего содержания данных радионуклидов в почвах Казанского сельского поселения в сравнении с данными показателями по России может быть связано с наличием почвообразующих пород с повышенным содержанием естественных радионуклидов. Радиоактивность в почвенном покрове определяется, главным образом, минералогией материнской породы [4].

Повышенную активность Калия-40 над средними показателями в Омской области и по России обуславливает большое содержание в почвах лесостепи стабильного калия, а следовательно, и его радиоактивного изотопа.

Средние содержания Радий-226 и Торий-232 в почвах превышают средние показатели по Омской области и России, их превышение связано со спецификой почвообразующих пород [6]. Фундамент южной лесостепи имеет сложное строение и состоит из магматических образований (гранитов, диабазов) к которым тяготеет Торий-232, а мощный покров морских осадочных толщ, сложенный океанической корой, способствовал накоплению Радий-226.

Гамма-фон составляет 10 мкР/час, что соответствует естественному радиационному фону.

Заключение

Площадь обследованных земель сельскохозяйственного назначения составили 9049 га.

1. Содержание ТМ Pb, Cd, Cu, Zn в почвах Казанского СП не превышает ПДК.

В период 2001-2021 гг. концентрация свинца (Pb) уменьшилась на 17,7%; количество кадмия (Cd) в почвах уменьшилось на 50%; содержание меди (Cu) за исследуемый период снизилось на 30,7 %; количество цинка (Zn) снизилось на 15,8%.

Снижение концентрации ТМ в почвах связано с нехваткой или отсутствием вносимых органических и минеральных удобрений.

2. В почвах Казанского сельского поселения Любинского района Омской области содержание искусственных и естественных радионуклидов не превышают средние значения по России, превышений гамма-фона не выявлено.

3. Активность искусственных радионуклидов ниже, чем в среднем по России, но превышают средние областные значения.

4. Активность естественных радионуклидов превышает среднероссийские и средние значения по Омской области, что связано со спецификой почвообразующих пород.

Все исследуемые поля пригодны для ведения с/х производства.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

- ГОСТ 29269-91. Почвы. Общие требования к проведению анализов. – введ. 1993-07-01. – Москва : Издательство стандартов, 1992. – 4 с.
- ОСТ 10070-95. Почвы. Методика определения Sr-90 в почвах сельхозугодий. – введ. 1995-01-01. – Москва : Минсельхозпрод РФ, 1995. – 24 с.
- ГОСТ Р 54038-2010. Почвы. Методика определения Cs – 137 в почвах сельхозугодий. – введ. 2012-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 12 с.
- Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / А.П. Виноградов. – 2-е изд., доп. – Москва : Изд-во Акад. наук СССР, 1957. – 238с.
- Красницкий В.М. Оценка и прогнозирование техногенного загрязнения почв / В.М. Красницкий // Вестник ОмГАУ. – 1999. – № 2 – С. 31–35.
- Красницкий В.М. ФГБУ «ЦАС «Омский». Агроэкологическая характеристика пахотных почв омской области / В.М. Красницкий, А.Г. Шмидт, О.А. Матвейчик // Плодородие. – 2018. – № 5 – С. 42–46.
- Минеев В.Т. Агрохимия / В.Т. Минеев. – Москва : Колос, 2004 – 720 с.

8. Пивоваров Ю.П. Радиационная экология: учеб. пособие / Ю.П. Пивоваров, В.П. Михалев. – Москва : Академия, 2004. – 240 с.
9. Сердюкова А.Ф. Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами / А.Ф. Сердюкова, Д.А. Барабанщиков // Молодой ученый. – 2017. – № 51(185). – С. 131–135.
10. Шмидт А.Г. Экологические проблемы АПК Омской области / А.Г. Шмидт, О.А. Матвейчик, В.М. Красницкий // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной III Манякинским чтениям: «Зеленая экономика»: риски, выгоды и перспективы с точки зрения устойчивого развития". – Омск, 2014. – С. 419–426.
11. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: По материалам 10 – летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС / А.И. Щеглов. – Москва : Наука, 2000. – 268 с.
12. Колесников С.И. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами / С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, В.Ф. Вальков. – Ростов на Дону : изд-во СКНЦ ВШ, 2000. – 231 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST 29269-91. Pochvy. Obshhie trebovaniya k provedeniju analizov. [Soils. General requirements for the fulfilment of analyses]. – introduced 1993-07-01. – Moscow : Publishing house of standarts, 1992. – 4 p. [in Russian]
2. OST 10070-95. Pochvy. Metodika opredelenija sr-90 v pochvah sel'hozogodij. [Soil. Methods of determination Sr-90 in farmland soils]. – introduced. 1995-01-01. – Moscow : Minsel'hozprod RF, 1995. – 24 p. [in Russian]
3. GOST R 54038-2010. Pochvy. Metodika opredelenija Cs – 137 v pochvah sel'hozogodij. [Soils. Methods of determination Cs – 137 in farmland soils]. – introduced. 2012-01-01. – Moscow : Standartinform, 2019. – 12 p. [in Russian]
4. Vinogradov A.P. Geohimija redkih i rassejannyh himicheskikh jelementov v pochvah [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils] / A.P. Vinogradov. – 2-nd ed. – Moscow : Publishing house Akad. nauk SSSR, 1957. – 238 p. [in Russian]
5. Krasnickij V.M. Ocenka i prognozirovanie tehnogenogo zagrjaznenija pochv [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils] / V.M. Krasnickij // Vestnik OmGAU [Bulletin of the OmSAU]. – 1999. – №2 – Pp. 31–35. [in Russian]
6. Krasnickij V.M. FGBU «CAS «Omskij». Agrojekologicheskaja harakteristika pahotnyh pochv omskoj oblasti [Agroecological characteristics of arable soils of the Omsk region] / V.M. Krasnickij, A.G. Shmidt, O.A. Matvejchik // Plodorodie. – 2018. – № 5. – Pp. 42-46. [in Russian]
7. Mineev V.T. Agrohimiya [Agrochemistry] / V.T. Mineev. – Moscow : Kolos, 2004. – 720 p. [in Russian]
8. Pivovarov J.P. Radiacionnaja jekologija: Ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. Zavedenij [Radiation ecology: Textbook for students. higher. studies. Institutions] / J.P. Pivovarov, V.P. Mihalev. – Moscow : Akademija, 2004. – 240 p. [in Russian]
9. Serdjukova, A.F. Posledstvija zagrjaznenija pochvy tjazhelymi metallami [Consequences of soil contamination with heavy metals] / A.F. Serdjukova, D.A. Barabanshnikov // Molodoj uchenyj. – 2017. – № 51(185). – Pp. 131-135. [in Russian]
10. Shmidt A.G. Jekologicheskie problemy APK Omskoj oblasti [Environmental problems of the agro-industrial complex of the Omsk region] / A.G. Shmidt, O.A. Matvejchik, V.M. Krasnickij, // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj III Manjakinskim chtenijam: «Zelenaja jekonomika»: riski, vygody i perspektivy s točki zrenija ustojchivogo razvitija" [Materials of the international scientific and practical conference dedicated to the III Manyakin readings: "Green Economy": risks, benefits and prospects from the point of view of sustainable development"]. – Omsk, 2014. – Pp. 419-426. [in Russian]
11. Shheglov A.I. Biogeohimiya tehnogenykh radionuklidov v lesnyh jekosistemah: Po materialam 10 – letnih issledovanij v zone vlijanija avarii na ChAJeS [Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems: Based on the materials of 10-year studies in the zone of influence of the Chernobyl accident] / A.I. Shheglov. – Moscow : Nauka, 2000. – 268 p. [in Russian]
12. Kolesnikov S.I. Jekologicheskie posledstvija zagrjaznenija pochv tjazhelymi metallami [Environmental consequences of soil pollution by heavy metals] / S.I. Kolesnikov, K.S. Kazeev, V.F. Val'kov. – Ростов на Дону : Publishing house SKNC VSh, 2000. – 231 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.027>

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАИФСКОГО УЧАСТКА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Научная статья

Шигапов И.С.^{1,*}, Набеева Э.Г.², Мингазова Н.М.³, Акмалова З.Б.⁴

¹ ORCID: 0000-0003-0429-4440;

² ORCID: 0000-0002-3246-9431;

³ ORCID: 0000-0002-8360-7005;

^{1, 2, 3, 4} Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

* Корреспондирующий автор (shigapov.irshat[at]yandex.ru)

Аннотация

Проведен геоэкологический анализ территории Раифской части Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. Поверхностные воды Раифского участка представляют собой единую гидрологическую систему, в которую входят реки Сумка, Сопы и Сер-Булак, а также расположенные в долинах этих рек карстово-суффозионные озера. В ходе исследований определялись характеристики водных объектов, проводился анализ структуры водосборного бассейна, с целью определения влияния рек на экологическое состояние всей системы в целом. В результате исследований выявлено, что наибольшее антропогенное влияние на систему оказывается через реку Сопы, которая подвержена наиболее сильному антропогенному воздействию.

Ключевые слова: геоэкология, водосборный бассейн, река, озеро.

GEOENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE STATE OF HYDROLOGICAL SYSTEM OF THE RIFSKY SECTION OF THE VOLGA-KAMA NATURE RESERVE

Research article

Shigapov I.S.^{1,*}, Nabeeva E.G.², Mingazova N.M.³, Akmalova Z.B.⁴

¹ ORCID: 0000-0003-0429-4440;

² ORCID: 0000-0002-3246-9431;

³ ORCID: 0000-0002-8360-7005;

^{1, 2, 3, 4} Kazan Federal University, Kazan, Russia

* Corresponding author (shigapov.irshat[at]yandex.ru)

Abstract

Geo-environmental analysis of the territory of the Raifsky section of the Volga-Kama state biosphere reserve was conducted. The surface waters of the Raifsky section are a united hydrological system consisting of the Sumka, Sopa and Ser-Bulak rivers, as well as the karst-suffosion lakes in the valleys of these rivers. The study established the characteristics of water bodies, analyzed the reservoir basin structure in order to determine the impact of rivers on the ecological state of the whole system. The results have shown that the greatest anthropogenic impact on the system happens through the Sopa River, which is heavily affected by anthropogenic impact.

Keywords: environmental geology, reservoir basin, river, lake.

Введение

Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник (ВКГПБЗ), включённый во Всемирную сеть биосферных резерватов, по праву можно назвать жемчужиной природных богатств Республики Татарстан. Заповедник образован 13 апреля 1960 года и в 2005 году данная особо охраняемая природная территория решением ЮНЕСКО приобрела статус биосферного резервата [1]. В организационном плане заповедник состоит из двух участков: Раифского – в Зеленодольском и Саралинского – в Лаишевском районах.

Уникальность Раифского участка заключается не только в уникальности природных зон естественных биотопов, но и в особенностях гидрологической сети. Поверхностные воды Раифского участка представляют собой единую гидрологическую систему, в которую входят реки: Сумка, Сопы и Сер-Булак, а также расположенные в долинах этих рек карстово-суффозионные озера. Данная территория многие годы является объектом для разнообразных исследований, связанных с изучением геологических [2, С. 215], геоморфологических [3, С.116], биохимических [4, С. 9], биологических [5, С.104], [6, С. 214], лимнологических [7, С. 195] особенностей. Однако сложность данной водной системы оставляет еще много нераскрытых вопросов, что обуславливает необходимость проведения новых исследований с применением современных средств визуализации данных [8, С. 45], [9, С.176] [10, С. 83].

Методы и принципы исследования

Для создания гидрологической модели проводилось картографирование водных объектов Раифского участка ВКГПБЗ с помощью программ SAS.Planet; QGIS. В ГИС-системе QGIS была построена схема гидрологической системы территории (рис.1) и определены морфометрические характеристики рек (длина реки, площадь водосбора).

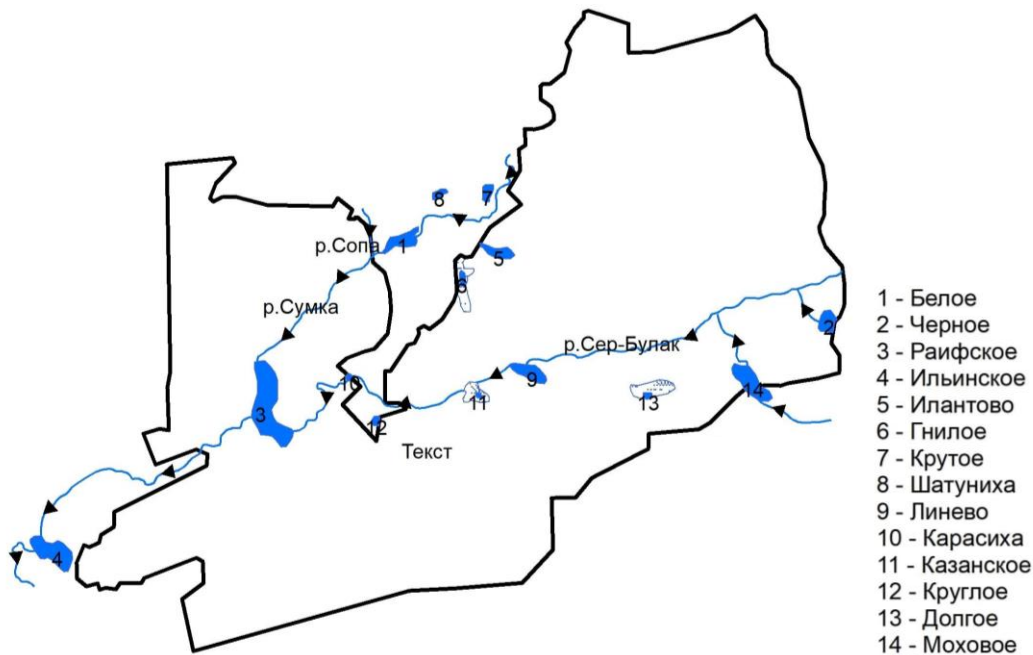


Рис. 1 – Схема гидрологической системы Раифского участка ВКГПБЗ

Также были оцифрованы территории лесных и сельскохозяйственных угодий, болот, озер, расположенных на водосборном бассейне, далее были рассчитаны соответствующие коэффициенты залесенности, распаханности, заболоченности и озерности территории. Для озер были уточнены морфометрические параметры, такие как площадь водного зеркала, длина береговой линии, длина озера, средняя ширина озера, определяемая как отношение площади озера к ее длине.

Основной целью исследования является оценка геоэкологического состояния гидрологической системы Раифского участка ВКГПБЗ через степень антропогенного воздействия на водосборные бассейны рек входящих в данную систему. Так как на территории заповедника действует охранный статус водных объектов, то основное антропогенное воздействие на них будет оказываться через те участки водосборной площади рек, которые не находятся на территории заповедника. Следовательно, сравнив степень антропогенной нагрузки на данные участки можно выявить звено гидрологической системы подверженное наибольшему антропогенному воздействию. Кроме того, морфометрические параметры озер сильно влияют на их способность к самоочищению и самовосстановлению, поэтому их также можно использовать в качестве косвенного критерия устойчивости озерной экосистемы.

Основные результаты исследования и их Обсуждение

Результаты анализа структуры бассейнов рек входящих в гидрологическую систему Раифского участка ВКГПБЗ показаны на рисунке 2.

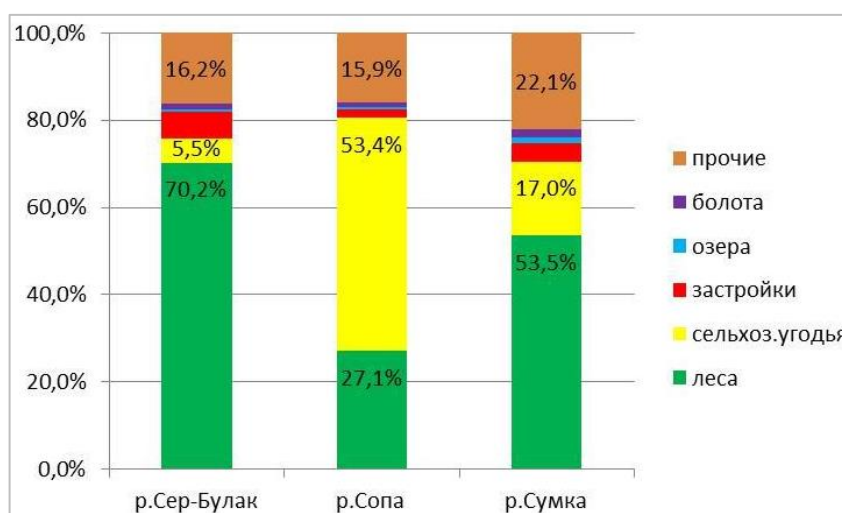


Рис. 2 – Структура водосборного бассейна рек Раифского участка ВКГПБЗ

Река Сопка является пересыхающей рекой в Зеленодольском районе Татарстана, это правый приток р. Сумки. Исток р. Сопка находится в 1 км к северу от дер. Соловьёвка. В нижней части река течёт по краю лесного массива и по территории ВКГПБЗ (Раифский участок), впадает в р. Сумка около села Бело-Безводное. Русло извилистое, равнинное, имеются пруды у населённых пунктов в верховьях реки. Постоянное течение сохраняется в верхней трети реки, где имеется устойчивое подземное питание.

Длина р. Сопка по нашим данным составила 10,4 км. Начало реки находится на высоте 136 м над уровнем моря, уклон реки составил 5,7%, коэффициент извилистости – 1,5; имеется один приток длиной 1,3 км.

Как видно из приведенного на рисунке 2 графика водосборный бассейн р. Сопа, общей площадью 26,4 км², подвержен прежде всего сельскохозяйственному воздействию, т.к. более половины территории составляют распаханная территория (53,4%), на долю леса остается, 7,1 км², что составляет 27,1%. Оставшуюся долю составляют: застройка – 1,9%; болота – 1,1% озера – 0,5%. К прочим территориям, занимающим 15,9% бассейна, нами были отнесены площади занятые залуженными участками, дорогами, оврагами и др.

Река Сумка. Берёт начало в лесном массиве в 1,5 км к западу от дер. Гремячий Ключ. Направление течения – юго-западное. В верховьях и среднем течении протекает по лесному массиву среди леса. Впадает в устьевой залив Куйбышевского водохранилища у западной окраины пос. Васильево. Протекает в среднем и нижнем течении через проточные озёра Бело-Безводное (памятник природы регионального значения), Раифское (на территории заповедника) и Ильинское [3, с.116]. В низовьях русло извилистое, образует старицы, в устье разделяется на протоки.

Длина р. Сумка по нашим данным 37,8 км, из которых 3,4 км протекает по территории заповедника, уклон реки составил 3,4‰, коэффициент извилистости – 1,4. В ходе изучения гидрографической сети р. Сумка нами выделено 15 притоков, из них первого порядка – 9 притоков, второго порядка – 6 притоков. На территории Раифского участка ВКГПБЗ в р. Сумка впадают реки Сопа и Сер-Булак.

В ходе исследования водосборного бассейна р. Сумка, общей площадью 324,4 км², выявлено, что большую часть всей площади занимает лес (53,5%). На долю застроек и сельскохозяйственных угодий приходится соответственно 4,3 % и 17%. Соответственно не менее 21% территории подвергается антропогенному воздействию. Озера и болота занимают гораздо меньшую долю 1,2% и 1,9% соответственно.

Река Сер-Булак. Длина р. Сер-булак составила 11,4 км, из которых 9,5 км протекает по территории заповедника. Исток реки находится на высоте 95 м БС, уклон составил 2,8‰.

Коэффициент извилистости р. Сер-Булак, как и у р. Сумка, небольшой – равен 1,2, что на 0,2 меньше, чем у р. Сумка, площадь водосбора составляет 67 км².

По приведенным на рис.2 данным видно, что большую часть водосборного бассейна р. Сер-Булак занимают леса (70,2%), что должно весьма благоприятно сказываться на устойчивом питании реки, антропогенное воздействие выявлено на 11,7% территории (застройки – 4,1 км², сельскохозяйственные угодья – 3,7 км²), при этом озера и болота занимают 0,6% и 1,3% соответственно.

Озёра. В заповедной и охранной зоне Раифского участка Волжско-Камского заповедника располагается 13 озёр. Нами были уточнены и морфометрические параметры, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Морфометрические характеристики озер Раифского участка ВКГПБЗ

Название озера	Площадь водного зеркала, км ²	Длина береговой линии, км	Длина водоема, км	Средняя ширина водоема, км
Белое	0,061	1,637	0,611	0,099
Черное	0,010	0,442	0,135	0,074
Раифское	0,346	3,336	1,162	0,297
Ильинское	0,186	2,244	0,791	0,235
Илантово	0,089	1,822	0,727	0,122
Гнилое	0,011	0,525	0,214	0,051
Крутое	0,018	0,791	0,253	0,071
Шатуниха	0,020	0,612	0,238	0,084
Линево	0,077	1,390	0,610	0,126
Карасиха	0,004	0,218	0,077	0,052
Казанское	0,001	0,152	0,065	0,015
Круглое	0,007	0,318	0,114	0,061
Долгое	0,001	0,165	0,057	0,017
Моховое	0,01	0,82	0,281	0,025

Из представленных озёр самую большую площадь водного зеркала имеет оз. Раифское, которое располагается на территории Раифского участка. В данное озеро впадают р. Сумка и р. Сер-Булак, а вытекает р. Сумка.

По результатам проведенной работы составлена общая схема гидрологической системы Раифского участка ВКГПБЗ и проведена геоэкологическая оценка влияющих на него факторов: р. Сумка протекает по территории охранной и заповедной зоны с северо-востока на юго-запад, проходя через три проточных озера – Белое, Раифское и Ильинское. Протекая через северную границу заповедной зоны, в р. Сумку впадает р. Сопа, которая в верхнем своём течении подвержена сильному сельскохозяйственному воздействию, что может отрицательно сказываться на экологическом состоянии водоемов и, при усилении давления, привести к их деградации. Река Сер-Булак протекает с востока на запад по территории Раифского участка. До впадения в оз. Карасиха р.Сер-Булак протекает по территории населенного пункта, что крайне негативно сказывается на состоянии реки и озера из-за загрязнений, которые попадают с поверхностным стоком, что вызывает эвтрофирование водоема.

Заключение

Элементами гидрологической системы Раифского участка Волжско-Камского заповедника являются 12 озер, наиболее крупное из которых – озеро Раифское. При этом некоторые озера являются проточными и соединяются

между собой системой реки Сумка, включающей в себя притоки р.Сопа и р.Сер-Булак. При этом большую часть водосбора рек Сумка и Сер-Булак занимают лесные угодья, что можно отнести к благоприятным факторам. Поводом для беспокойства за экологического благополучие гидрологической системы Раифского участка ВКГПБЗ служит состояние р.Сопа, подвергающая интенсивной антропогенной нагрузке за пределами заповедника.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Об утверждении Положения об охранной зоне Волжско-Камского государственного природного заповедника: постановление КМ РТ от 19.04.2002 № 217 (с изм. от 21.01.2009) // редакция Постановлений КМ РТ. – 2012. – № 949.
2. Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника. – Москва : GEOS, 2003. – 410 с.
3. Дедков А.П. Плиоценовые долины и четвертичные террасы Раифы / А.П. Дедков, А.С. Тайсин // Труды Волжско-Камского Государственного Природного Заповедника: выпуск 6. – Казань, 2005. – С. 115–127.
4. Унковская Е.Н. Гидрохимический режим водоёмов и водотоков Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны / Е.Н. Унковская, О.Ю. Тарасов // Труды Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. – Казань. – 2016. – № 7. – С. 9–40.
5. Тайсин А.С. Озера Приказанского района, их современные природные и антропогенные изменения / А.С. Тайсин. – Казань : Изд-во ТГГПУ, 2006. – 167 с.
6. Рогова Т.В. Классификация растительного покрова ВКГПЗ на ландшафтно-экологической основе / Т.В. Рогова, Л.А. Мангутова, О.Е. Любина и др. // Труды Волжско-Камского государственного природного заповедника. – Казань. – 2005. – № 6. – С.213–240.
7. Унковская Е.Н. Результаты мониторинга озер волжско-камского заповедника / Е. Н. Унковская, М.А. Унковская, О.В. Палагушкина и др. // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. – Казань, 2019. – С. 194–199.
8. Мальцев К.А. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов / К.А. Мальцев, О.П. Ермолаев // Геоморфология. – 2014. – №1. – С.45–53.
9. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. – Пермь : Алекс-Пресс, 2010. – 217 с.
10. Шихов А.Н. Геоинформационные системы: применение ГИС-технологий при решении гидрологических задач: учебное пособие / А.Н. Шихов, Е.С. Черепанова, А.И. Пономарчук. – Москва : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2014. – 91 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ob utverzhenii Polozheniya ob ohrannoj zone Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika: postanovlenie KM RT от 19.04.2002 № 217 (s izm. от 21.01.2009) [On approval of the Regulations on the protection zone of the Volga-Kama State Nature Reserve: Resolution of the KM of the RT dated 04/19/2002 No. 217 (with amendments. dated 21.01.2009)] // editorial Board of the Resolutions of the KM RT. – 2012. – № 949.
2. Geologiya Tatarstana: Stratigrafiya i tektonika. [Geology of Tatarstan: Stratigraphy and tectonics] // Moscow : GEOS, 2003. – 410 p. [in Russian]
3. Dedkov A.P. Pliocenovyye doliny i chetvertichnyye terrasy Raify [Pliocene valleys and quaternary terraces of Raifa] / A.P. Dedkov, A.S. Tajsin // Trudy Volzhsko-Kamskogo Gosudarstvennogo Prirodnogo Zapovednika [Works of Volga-Kama State Nature Reserve]: issue 6. – Kazan', 2005. – P. 115–127. [in Russian]
4. Unkovskaya E.N. Gidrohimičeskij rezhim vodoyomov i vodotokov Raifskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika i ego ohrannoj zony [Hydrochemical regime of reservoirs and watercourses of the Raifa section of the Volga-Kama Reserve and its protected zone] / E.N. Unkovskaya, O.Y. Tarasov // Trudy Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [Works of Volga-Kama State Nature Biosphere Reserve]. – Kazan'. – 2016. – № 7. – P. 9–40. [in Russian]
5. Tajsin A.S. Ozera Prikazanskogo rajona, ih sovremennyye prirodnyye i antropogennyye izmeneniya [Lakes of the Prikazansky district, their modern natural and anthropogenic changes] / A.S. Tajsin // Kazan' : TGGPU, 2006. – 167 p. [in Russian]
6. Rogova T.V. Klassifikaciya rastitel'nogo pokrova VKGPZ na landshaftno-ekologičeskoj osnove / T.V. Rogova, L.A. Mangutova, O.E. Lyubina, S.F. Farhutdinova [Classification of the vegetation cover of the EKGPP on a landscape-ecological basis] // Trudy Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika [Works of Volga-Kama State Nature Reserve]. – Kazan'. – 2005. – № 6. – Pp.213–240. [in Russian]
7. Unkovskaya E.N. Rezul'taty monitoringa ozer volzhsko-kamskogo zapovednika / E.N. Unkovskaya, M.A. Unkovskaya, O.V. Palagushkina et al. [The results of monitoring the lakes of the Volga-Kama Reserve] // Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya [Lakes of Eurasia: problems and their solution]. – Kazan', 2019. – Pp. 194–199. [in Russian]
8. Mal'cev K.A. Ispol'zovanie cifrovyyh modelej rel'efa dlya avtomatizirovannogo postroeniya granic vodosborov [The use of digital relief models for automated construction of watershed boundaries] // K.A. Mal'cev, O.P. Ermolaev // Geomorfologiya [Geomorphology]. – 2014. – № 1. – P. 45–53. [in Russian]
9. Kalinin V.G., P'yankov S.V. Primenenie geoinformacionnyh tekhnologij v gidrologičeskikh issledovaniyah. [Application of geoinformation technologies in hydrological research] // Perm': Aleks-Press, 2010. – 217 p. [in Russian]
10. Shihov A.N. Geoinformacionnyye sistemy: primeneniye GIS-tekhnologij pri reshenii gidrologičeskikh zadach: uchebnoe posobie. [Geoinformation systems: the use of GIS technologies in solving hydrological problems] / A.N. Shihov, E.S. Cherepanova, A. I. Ponomarchuk // Moscow : Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet [Perm State University], 2014. – 91 p. [in Russian]