

№ 1 (103) ▪ 2021  
Часть 1 ▪ Январь

---

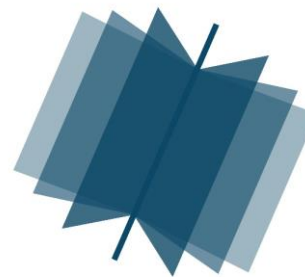
**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

***INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL***

---

**ISSN 2303-9868 PRINT  
ISSN 2227-6017 ONLINE**

Екатеринбург  
2021



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

**№ 1 (103) 2021  
Часть 1  
Январь**

Дата выхода 22.01.2021  
Подписано в печать 17.01.2021  
Тираж 200 экз.  
Цена: бесплатно.  
Заказ 295118.  
Отпечатано с готового оригинал-макета.  
Отпечатано в типографии "А-принт".  
620049, г. Екатеринбург, пер. Лобачевского, д. 1.

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: **ПН № ФС 77 – 51217.**

#### **Члены редколлегии:**

##### **Филологические науки:**

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

##### **Технические науки:**

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

##### **Педагогические науки:**

*Куликовская И.Э.* д-р пед. наук, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия);  
*Сайкина Е.Г.* д-р пед. наук, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена (Санкт-Петербург, Россия);  
*Лукиянова 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. н. проф., Военный авиационный инженерный университет (Воронеж, Россия);  
*Брылеев В.А.* д-р геогр. наук, проф., Волгоградский государственный социально-педагогический университет (Волгоград, Россия);  
*Огуреева Г.Н.* д-р геогр. наук, проф., МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

##### **Биологические науки:**

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

**Архитектура:**

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

**Ветеринарные науки:**

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

**Медицинские науки:**

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

**Исторические науки:**

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

**Культурология:**

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

**Искусствоведение:**

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

**Философские науки:**

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

**Юридические науки:**

Костенко Р.В. д-р юрид. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);  
Мазуренко А.П. д-р юрид. наук, Северо-Кавказский федеральный университет в г. Пятигорске (Пятигорск, Россия);  
Мещерякова О.М. д-р юрид. наук, Всероссийская академия внешней торговли (Москва, Россия);  
Ерғашев 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 (Курс, Россия);  
Папанов С.И. д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);  
Петкова Е.Г. д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);  
Скачилова С.Я. д-р хим. наук, Всероссийский Научный Центр По Безопасности Биологически Активных Веществ (Купавна Старая, Россия); Ураков А.Л., д-р мед. наук, Государственная Медицинская Академия (Ижевск, Россия).

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Абдыманапов Усен ГЕОМЕТРИЯ АБСОЛЮТНЫХ (ДИКИХ) УЗЛОВ И КОС В ТРЕХМЕРНОМ ПАУТИННОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	6
Антоновская О.Г., Бесклубная А.В. О ВЛИЯНИИ ХАРАКТЕРА НЕЛИНЕЙНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ синхронизации квазигармонического осциллятора методом приближенных точечных отображений .....	22
Попов В.И. К ПРОБЛЕМЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОРЕОДИНАМИКИ СРЕД ПЕРЕМЕННОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ	30

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Бочкарев А.В., Сайфуллин Р.Т. РЕКУРРЕНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ БАЗИСА ПЕРЕХОДА ОТ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ФУНКЦИЯМ ЧЕБЫШЕВА-ЭРМИТА К ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЮ.....	41
Бойков В.М., Старцев С.В., Воротников И.Л., Павлов А.В. КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И АГРЕГАТ ДЛЯ ПОЛОСОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ.....	47
Воробжанский Н.Н. СВЕРТОЧНАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МЕТОДОМ К-СРЕДНИХ.....	52
Верховский А.Е., Гаджиев К.Г., Уртенев Д. С., Гаджиев Д.К. ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА СЛУЖЕБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА .....	57
Гулов Д.Ю., Давлатов А.М., Горт М.В. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ РАЙОНОВ ТАДЖИКИСТАНА .....	61
Евгениев Г.Б. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГПС.....	67
Зыков А.В., Юнин В.А., Захаров А.М. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СУШИЛЬНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ УСТАНОВОК .....	75
Команов П.А., Ревазов Х.Ю., Таваснев Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СМАРТ-КОНТРАКТОВ ETHEREUM .....	80
Ксенз Н.С., Пипченко М.В. ....	84
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОФИСА УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОЕКТАМИ	84
Парийская А.Ю., Мокряк А.В. ПРИЗНАКИ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЕНТИЛЯТОРОВ.....	90
Анашкина П.Ж., Москвичева Е.В., Тимошенкова И.А., Москвичев А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗГЛЮТЕННЫХ ВИДОВ МУКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ .....	98
Патрикеев А.В. ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ИНТЕРВАЛЕ МЕЖДУ СМЕЖНЫМИ АКТАМИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	105
Псаров С.А., Шумилин Е.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ТЕПЛОТЫ ГРУНТА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД.....	111
Кулагин С.М., Крупнов Е.И., Ометова М.Ю., Рыбкина Г.В. РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	118
Сафин Д.Р., Белов Ю.А., Сафина А.Д. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ ИЗ СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ .....	123
Сафронова Е.М., Биченкова О.Ф., Черненькая Л.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНОВЫХ НОРМ ВРЕМЕНИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА .....	129
Сиппель И.Я., Магдин К.А. ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЭТАНОЛА НА СВОЙСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ .....	135

Stepanenko A.V. STUDY OF ANGULAR DISTRIBUTIONS OF CRYSTALLITES IN POLYCRYSTALS WITH HCP-STRUCTURE.....	139
---	-----

Федоров С.А., Хромченко А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СЪЕМКЕ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ИСХОДНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПРОЕКТА .....	145
---	-----

Халыева А.С., Чемезов Е.Н. УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ХАРБАЛАХСКОМ УГОЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ ОАО «ТЕЛЕН»...	152
---	-----

Юдин Г.А., Абузин Ю.А., Тюрина С.А. ПОЛУЧЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СВИНЦОВОГО БАББИТА, АРМИРОВАННОГО КВАЗИКРИСТАЛЛАМИ $Al_{65}Cu_{22}Fe_{13}$ .....	160
--	-----

---

#### АРХИТЕКТУРА / ARCHITECTURE

---

Пермяков М.Б., Краснова Т.В. СОЗДАНИЕ КОМФОРТНОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ МАЛОГАБАРИТНОГО ЖИЛЬЯ .....	165
--	-----

Рябов Н.Ф. КОМПОЗИЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ КАК СРЕДСТВО ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНОВЛЕНИЯ СТУДЕНТА-АРХИТЕКТОРА .....	170
--	-----

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.001>ГЕОМЕТРИЯ АБСОЛЮТНЫХ (ДИКИХ) УЗЛОВ И КОС В ТРЕХМЕРНОМ ПАУТИННОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
Обзорная статья

Абдыманапов Усен\*

ORCID: 0000-0002-5569-6266,

Международный юридический институт (МЮИ), Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (u670913[at]mail.ru)

## Аннотация

В данной статье описан оригинальный способ построения аналога - ожерелья Луи Августа Антуана в окрестности выколотых точек на минимальной поверхности винтовых кривых изгибаемых абсолютных (диких) узлов посредством заузленных зацеплений 1- ручек и вероятностных мер Хаоса, размерности Хаусдорфа, относящихся ко всей совокупности наблюдаемых событий по всему направлению трехмерного паутинового пространства. Для исследования патологических свойств и геликоидальных структур изгибаемых абсолютных (диких) узлов и кос, выявления особенностей топологического ковра впервые применен метод "Плетение с винтовым кручением" и наиболее яркие перспективы его дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** абсолютный (дикий) узел, абсолютная (дикая) коса, паутиноое пространство, топологический ковер из геликоидальных (диких) абсолютных узлов, плетение с винтовым кручением.

## GEOMETRY OF WILD KNOTS AND WILD BRAIDS IN THREE-DIMENSIONAL WEBLIKE SPACE

Review article

Abdymanapov Usen\*

ORCID: 0000-0002-5569-6266,

International Law Institute (MUI), Moscow, Russia

\* Corresponding author(u670913[at]mail.ru)

## Abstract

This article describes an original method for constructing an analog of Antoine's necklace in the vicinity of empty dots on the minimal surface of helices of bent wild knots by means of knotted looping of 1-handles and the chaos probability measures with Hausdorff dimension that are related to the entire set of observed events in the entire direction of three-dimensional weblike space. In order to explore the pathological properties and helicoidal structures of bent wild knots and braids and to identify the features of the topological carpet, the study for the first time applies the method of "lattice with helical curvature" and demonstrates the distinct prospects for its further development.

**Keywords:** wild knot, wild braid, web space, topological carpet of helicoidal wild knots, lattice with helical curvature.

## Введение

В 1921 году под руководством Анри Леона Лебега (Henri Leon Lebesgue) Луи Август Антуан (Louis Auguste Antoine) защитил докторскую диссертацию на тему «О гомеоморфности двух фигур и двух окрестностей», среди результатов которой было построение ожерелья, являющегося вложением канторова множества в трехмерном пространстве и обладающее неодносвязным дополнением. То есть дикий узел, содержащий более сложное множество – «ожерелье Луи Августа Антуана», получается, как пересечение убывающей последовательности компактных множеств:

$\mathfrak{Z}_1 \subset \mathfrak{Z}_2 \subset \dots \subset$  - такой, что каждое  $\mathfrak{Z}_m$  является объединением конечного числа непересекающихся полноториев. Если максимальный диаметр полнотория в  $\mathfrak{Z}_m$  стремится к нулю при  $m \rightarrow \infty$  то есть

$\lim_{m \rightarrow \infty} \max_{(m)} \text{diam.}(S^1 \times D^2)_m \rightarrow 0$ , то пересечение:  $\mathfrak{Z} = \bigcap_m \mathfrak{Z}_m$  является компактным вполне несвязным множеством без

изолированных точек, гомеоморфное канторову множеству. При желании можно выбрать последовательность  $\mathfrak{Z}_m$  так, что дополнение к полученному  $\mathfrak{Z}$  неодносвязно и пересечение  $\mathfrak{Z}_{m+1} \cap (S^1 \times D^2)_m$  с каждым полноторием в  $\mathfrak{Z}_m$  образует замкнутую цепь [11]. Такое вложение канторова множества в трехмерном пространстве представляется неоценимым вкладом для развития маломерной топологии и не теряет своей актуальности вплоть до сегодняшнего дня. С тех пор и по сей день интерес к ожерелью Луи Августа Антуана со стороны исследователей-топологов не угасает, возникают новые современные проблемы:

- Если заузлить зацеплением 1 - ручки окрестности выколотых точек на минимальной поверхности винтовых линий изгибаемых абсолютных (диких) узлов, то сохранится ли устойчивость этих винтовых линий?
- В топологическом ковре трансверсальные точки при деформации изгибаемых геликоидальных абсолютных (диких) узлов соединяются ли петлями одинаковой площадью независимо от азимутальных углов?
- Сферические спирально винтовые абсолютные (дикие) узлы с разъединенными концами, зацепляясь между собой в пары, тройки и более образуют ли кольцо подобно ожерелью Луи Августа Антуана?
- При переплетении в косу изгибаемые геликоидальные абсолютные (дикие) узлы допускают ли деформацию по кругу с точностью до раздутий и стягиваний?

Эти четыре проблемы определяют цель данной статьи. Проведенное исследование показывает, что ответ утвердительный. Основные идеи и положения статьи содержатся в докладах и в работах автора [1], [10].

### Актуальность, теоретическая и практическая значимость работы

Актуальность исследования геометрии изгибаемых абсолютных (диких) узлов и кос в трехмерном паутином пространстве обусловлена тем, что она является обобщенной моделью Антуана компакта трехмерного пространства, привлекающего на протяжении почти века внимание геометров, топологов и физиков. Несмотря на то, что работа носит теоретический характер, полученные в ней результаты могут быть использованы в различных задачах маломерной топологии, спирально винтовой геометрии и топологии, а также в архитектурно - строительной инженерии при строительстве высотных спирально винтовых сооружений (где устойчивость витков сооружений играет важную роль).

Напоминаем, что узел называется ручным, если существует его расширение до полнотория  $S^1 \times D^2$ , допускающее вложение в 3 - сферу. А дикими называются узлы, содержащие дуги Фокса - Артина - некоторые простые дуги, полученные диким вложением в трехмерное евклидово пространство  $E^3$ . Также легко можно построить дикий узел, содержащий не только одну, а несколько патологических точек, образующих канторово множество. Если для любых двух непрерывных функций  $\xi(t)$  и  $\theta(t)$  на отрезке  $[0, t]$  существует гладкая кривая кривизна и кручения которой определяются уравнениями кривой

$$\begin{cases} k = \xi(t) \\ \theta = \eta(t) \end{cases} \quad (1)$$

то уравнения кривой (1) не зависят от выбора системы координат. Поэтому кривая определена уравнениями кривой (1) однозначно с точностью до перемещения в пространстве. Следовательно, уравнения пространственной кривой (1) задают её кривизну и кручения с учётом того, что отношение кручения к кривизне постоянно. По сути дела, кривизна — это мера отклонения кривой от касательной, а кручение — это мера отклонения кривой от соприкасающейся плоскости. Но, с другой стороны, для координатных функций кривой имеет место уравнение

$$\begin{cases} x\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{k}{k^2 + \theta^2} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right), \\ y\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{k}{k^2 + \theta^2} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right), \\ z\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\pi\theta}{2(k^2 + \theta^2)} \end{cases} \quad (2)$$

которое определяет винтовую линию, лежащую на круговом цилиндре

$$x^2 + y^2 = \frac{k^2}{(k^2 + \theta^2)^2} \quad (3)$$

Так как нормали в точках поверхности, образованной касательными к винтовой линии, образуют постоянный угол с осью винта, то чем больше мера отклонения кривой от соприкасающейся плоскости, тем кривая пространственнее. В противном случае кривая меньше отличается от плоской кривой. Подобно тому, что при винтовом движении точек образуются винтовые линии (цилиндрические, конические, сферические и гиперболические) и при винтовом движении отрезка прямой линии получается винтовая поверхность, можно получить винтовое геометрическое тело. Если какую-либо плоскую фигуру передвигать по поверхности круглого цилиндра так, чтобы вершины плоской фигуры перемещались по винтовым линиям, а плоскость плоской фигуры постоянно проходила через ось круглого цилиндра, то образуется винтовой выступ, ограниченный винтовыми и цилиндрическими поверхностями. Следовательно, построение такого винтового выступа сводится к построению столько винтовых линий, сколько вершин у выбранной плоской фигуры. Из пространственных кривых линий, в технике широко применяются цилиндрические винтовые линии одинакового уклона - геликоиды.

Как геометрическая фигура, геликоид по своему значению по разнообразию форм и свойств не имеет себе равных. Иначе говоря, геликоид — это винтовая поверхность, описываемая параметрическими соотношениями, образованная движением прямой, вращающейся вокруг перпендикулярной к ней оси и одновременно поступательно движущейся в направлении этой оси с пропорциональной скоростью этих движений. Главной особенностью этой винтовой линии является минимальная величина, подвергаемая к любой деформации её площади при заданной внешней границе. Так как изгибание поверхности представляет собой топологическое отображение, то есть гомеоморфизм, который исключает сжатие и растяжение, то небольшую локальную область геликоида можно изометрически продеформировать в локальной области катеноида или однополостного гиперболоида.

### Обозначения и основные понятия

Если иное не предусмотрено, то в этой работе будут применяться следующие понятия и обозначения:

- $((SWS, \rho)^3$  - конечное, трехмерное паутинное (дикое) пространство;
- $WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega) = \{\cup_s \text{int}((WAKn.), \rho)_s^3 \subset bd((WAKn.), \rho)^3\}$  - трехмерный изгибаемый абсолютный (дикий) узел;
- $WABr_{((SWS), \rho)^3}^3(\Theta) = \{\cup_i 2(t+2)[(WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega_i) \cap_{(i \neq j)} WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega_j)); (WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega_i) \cap_{(i \neq k)} WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega_k)); (WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega_j) \cap_{(j \neq k)} WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega_k))]\}$  - трехмерное абсолютная (дикая) коса;
- $Carpet_{((SWS), \rho)^3}^3(C) = \{(0, 2^l) \times (0, 2^m) \times (0, 2^{-\left(\frac{n \leq \min_{(l \neq m \neq n)}(l, m)}\right)}) I\left(l, m, n \leq \min_{(l \neq m \neq n)}(l, m)\right) \in \{N\}\}$  -

топологический ковер из геликоидальных (диких) абсолютных узлов.

**Определение 1.** Паутинное (дикое) пространство — это множество расслоенных, изгибаемых геликоидальных паутин, наклоны которых к горизонтальной плоскости в поперечных сечениях, зависят только лишь от расстояний до оси винтовой развертки поверхности кривых линий в концентрические дуги, а не от азимутальных углов.

**Определение 2.** Абсолютный (дикий) узел — это деформированная минимальная поверхность, натянутая на винтовую линию и содержащая множество выколотых точек с окрестностью в ожерелье Луи Августа Антуана, патологически вложенная в трехмерное паутинное (дикое) пространство.

**Определение 3.** Абсолютная (дикая) коса — это трёхмерный пучок, состоящий из “m” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов, в которых непересекающиеся между собой выпуклые и вогнутые касательные точки над и под пересечениями, пересекают каждый изгибаемый абсолютный (дикий) узел однократно, и при этом допускают сплетение с точностью до  $2(m+2)$  ( $m \in \{N\}$ ) повторений.

**Определение 4.** Топологический ковер из геликоидальных (диких) абсолютных узлов — это с высокой точностью и толщиной переплетенные между собой множества изгибаемых абсолютных (диких) узлов, сотканые соответственно с

$2^{m+n} \left(1 \leq \min_{(m \neq n)}(m, n) < \infty\right)$  продольными и поперечными слоями, состоящими из множества четных и нечетных

выколотых точек минимальной поверхности, попарно перекрученные на целое число оборотов дикими 1 - ручками по винтовой минимальной поверхности вдоль оси изгибаемых абсолютных (диких) узлов.

**Определение 5.** Геометрическое шарообразное трёхмерное тело со спирально винтовым выступом — это шарообразный спирально винтовой геликоид с бесконечным числом витков, ограниченный сферически спиральной поверхностью, расстояние между витками которого уменьшено до минимума по мере приближения их к полюсам.

### Геометрические и геликоидальные структуры изгибаемых абсолютных (диких) узлов и кос в трехмерном паутинном (диком) пространстве

Согласно теории Э. Артиновой кос [12] одной из важных задач топологии является проблема узлов и ее обобщение. Если можно считать, что узел — это непрерывная замкнутая пространственная кривая без двойных точек, то деформация определяется, как непрерывное видоизменение этой кривой без самопересечения, и любой узел тогда под влиянием деформации переходит в окрестность. Под плетением нитей (или шнурков) в косы или косой “m” - го порядка понимается следующий топологический образ [12].

Пусть в пространстве дан прямоугольник с противоположными сторонами  $\alpha_1, \alpha_2$  - длины и  $\beta_1, \beta_2$  - ширины. И пусть на каждой из обеих сторон  $\alpha_1, \alpha_2$  - длины даны “m” - точки, соответственно  $X_1, X_2, \dots, X_m$  и  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ , причем направление нумерации идет от ширины сторон прямоугольника  $\beta_1$  к ширине сторон прямоугольника  $\beta_2$ . Тогда в каждой точке  $X_i$  длины стороны прямоугольника  $\alpha_1$  однозначно ставится в соответствие некоторая точка  $Y_{j_i}$  длин сторон прямоугольника  $\alpha_2$ , соединенные между собой с пространственной кривой  $\gamma_i$  без двойных точек, которые не пересекаются ни одной из кривых  $\gamma_k$ . Следовательно, пространственная кривая  $\gamma_i$  ориентирована от точки  $X_i$  длины сторон прямоугольника  $\alpha_1$  к точке  $Y_{j_i}$  длины сторон прямоугольника  $\alpha_2$ . Далее классическая техника плетения кос производится по разработанному алгоритму. Более изящный способ переплетения кос принадлежит американскому топологу, одному из создателей теории узлов - Джеймсу Уэнделлу Александру. Некоторые тонкие соображения из этого способа применены в работах [13], [14].

В случае конечного паутинового (дикого) трёхмерного пространства в качестве пространственной кривой, мы возьмем пучок изгибаемых абсолютных (диких) узлов. Когда говорим об изгибаемом абсолютном (диком) узле, то под этим понятием мы понимаем следующие:

Предположим, что  $\wp$  - некоторое многообразие в произвольной степени. И, пусть  $B^m(\tau, \varepsilon)$  - m - мерный шар (или  $cyl.(C^m)$  - m - мерный круглый цилиндр), что  $\wp \cap B^m(\tau, \varepsilon) \subset bd.\wp$  (или  $\wp \cap cyl.(C^m) \subset bd.\wp$ ). Тогда существует гомеоморфизм  $\psi: D^n \times D^{m-n} \rightarrow B^m(\tau, \varepsilon)$  (или  $\psi: D^n \times D^{m-n} \rightarrow cyl.(C^m)$ ) такой, что  $\psi(bd.(D^n \times D^{m-n})) = B^m(\tau, \varepsilon) \cap \wp$  (или  $\psi(bd.(D^n \times D^{m-n})) = cyl.(C^m) \cap \wp$ ). Отсюда вытекает, что 1 - ручка - это произведение  $D^1 \times D^{m-1}$  - дисков, приклеенное вдоль пары  $(m-1)$  - мерных дисков  $S^0 \times D^{m-1}$ ; 2 - ручка - это



произведение  $D^2 \times D^{m-2}$  - дисков, приклеенное вдоль пары  $(m-2)$  - мерных дисков  $S^1 \times D^{m-2}$ ; 3 - ручка - это произведение  $D^3 \times D^{m-3}$  - дисков, приклеенное вдоль пары  $(m-3)$  - мерных дисков  $S^2 \times D^{m-3}$ ; и так далее  $m$  - ручка - это произведение  $D^n \times D^0$  - дисков, приклеенное вдоль пары 0 - мерных дисков  $S^{n-p} \times D^0$ . Следовательно,

1 - ручка:  $(D^1 \times D^{m-1}) \cup_{\psi} (S^0 \times D^{m-1})$  (или  $(D^1 \times D^{m-1}) \cap_{\psi} (S^0 \times D^{m-1})$ );

2 - ручка:  $(D^2 \times D^{m-2}) \cup_{\psi} (S^1 \times D^{m-2})$  (или  $(D^2 \times D^{m-2}) \cap_{\psi} (S^1 \times D^{m-2})$ );

3 - ручка:  $(D^3 \times D^{m-3}) \cup_{\psi} (S^2 \times D^{m-3})$  (или  $(D^3 \times D^{m-3}) \cap_{\psi} (S^2 \times D^{m-3})$ );

и так далее,

$m$  - ручка:  $(D^n \times D^0) \cup_{\psi} (S^{n-1} \times D^0)$  (или  $(D^n \times D^0) \cap_{\psi} (S^{n-1} \times D^0)$ ). Где

$S^0 = \{x \in E^1 : \|x\| = 1\}$  - нульмерная сфера, то есть совокупность двух отдельно лежащих точек;

$S^1 = \{x \in E^2 : \|x\| = 1\}$  - одномерная сфера, то есть окружность границы круга;

$S^2 = \{x \in E^3 : \|x\| = 1\}$  - двумерная сфера, то есть поверхность трехмерного шара;

и так далее,

$S^{n-1} = \{x \in E^n : \|x\| = 1\}$  -  $(n-1)$  - мерная сфера, то есть поверхность  $m$  - мерного шара.

Абсолютный (дикий) узел представляет собой спирально винтовое изгибаемое трёхмерное тело с той разницей, что его винтовые минимальные поверхности переплетены с диким заузленным ожерельем Луи Августа Антуана и выколоты круглыми дырками. Если пронумеровать все выколотые круглые дырки на винтовом выступе по круговому квадранту:

$\left(0, \frac{\pi}{2}\right), \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right), \left(\pi, \frac{3\pi}{2}\right), \left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right)$  чередующиеся с нечетными и четными числами, то каждая малая

окрестность винтовой толщины, образует двумерный диск  $D^2 = \{(x, y) : x^2 + y^2 \leq 1\}$ , а сжимающиеся к центру

узкие окрестности винтовой толщины образуют настолько малый диск  $\varepsilon\left(\frac{1}{2}, 0\right)$ , что множество

$\left\{\varepsilon\left(\frac{1}{2}, 0\right), \psi\left(\varepsilon\left(\frac{1}{2}, 0\right)\right), \dots, \psi^{m-1}\left(\varepsilon\left(\frac{1}{2}, 0\right)\right)\right\}$  попарно не пересекается. Следовательно, отображение  $\psi : D^2 \rightarrow D^2$

есть вращение вокруг начала координат на угол  $\left(\frac{2\pi}{m}\right)$ . Таким образом,  $D^2 \setminus \bigcup_{i=0}^{m-1} \psi^i\left(\text{int}\left(\varepsilon\left(\frac{1}{2}, 0\right)\right)\right)$  - малый

двумерный диск 1 - ручки с “ $m$ ” - выколотыми круглыми дырками на винтовом выступе изгибаемого абсолютного (дикого) узла. Так как 1 - ручки на винтовом выступе зацеплены между собой

$$m \left( D^1 \times D^2 \cup_{\psi} S^0 \times D^2 \right)_{[(4m-3), (4m-1)]} \cap_{m=1}^n \left( D^1 \times D^2 \cup_{\psi} S^0 \times D^2 \right)_{[(4m-2), 4m]} \quad (4)$$

то все заузленные и зацепленные друг с другом 1 - ручки могут быть перекручены на целое число оборотов, так как поверхность винтового выступа ориентируема. Из вышесказанного приходим к выводу, что винтовая поверхность, натянутая на винтовую линию, сохраняет устойчивость.

Напоминаем, что в классическом понимании коса из “ $m$ ” - прядей нити (или шнура) — это геометрический объект, состоящий из двух параллельных плоскостей в трехмерном (универсальном) пространстве, содержащий упорядоченные множества в равном количестве точек, соответствующих двум параллельным плоскостям, и из “ $m$ ” - непересекающихся между собой простых дуг, соединяющих упорядоченные множества точек, пересекающих каждую параллельную плоскость однократно.

Следовательно, коса из “ $m$ ” - прядей нити (или шнура) — это геометрический объект, который абстрактно (или визуально) описывает переплетение косы из “ $m$ ” - прядей нити (или шнура) между собой в длину.

#### **Метод «плетение с винтовым кручением (или плетение с винтовым кручением, равномерно сжимающимся в направлении к центральной оси по круговому квадранту)»**

Для наглядности возьмем шарообразный трёхмерный пучок, состоящий из множества всех изгибаемых абсолютных (диких) узлов, проходящих через одну и ту же ось пересечений и разобьём его на шесть взаимно перпендикулярных направляющих полуосей со множеством “ $m$ ” - прядей. Выберем одну из шести направляющих полуосей со множеством прядей, состоящих из всех изгибаемых абсолютных (диких) узлов, каждый из которых по прямой винтовой поверхности развёртывается в концентрические дуги, при одном и том же фиксированном центральном угле. Так как

• витки изгибаемого абсолютного (дикого) узла с правой винтовой поверхностью, получаются при разрезке кольца произвольной толщины, угол которого вращается с кручением по круговому квадранту на симметричных пределах

$\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$  и  $\left(\pi, \frac{3\pi}{2}\right)$  или  $\left(\frac{\pi}{2}, \pi\right)$  и  $\left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right)$  с возвратно - поступательным перемещением, или наоборот, и откладывается на наружной стороне винтовой поверхности от радиальной линии, в направлении по ходу часовой стрелки;

• витки изгибаемого абсолютного (дикого) узла с левой винтовой поверхностью, получают при разрезке кольца произвольной толщины, угол которого вращается с кручением по круговому квадранту на симметричных пределах  $\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$  и  $\left(\pi, \frac{3\pi}{2}\right)$  или  $\left(\frac{\pi}{2}, \pi\right)$  и  $\left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right)$  с возвратно - поступательным перемещением, или наоборот, и откладывается на наружной стороне винтовой поверхности от радиальной линии, в направлении против хода часовой стрелки;

то при плетении абсолютной (дикой) косы из “m” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов с правой винтовой поверхностью, либо с левой винтовой поверхностью, либо одновременно с чередующимися правыми и левыми винтовыми поверхностями, следует добиваться к коллинеарным вложениям витков (включая компланарные барьеры между витками с чередующимся плетением над и под пересечениями изгибаемых абсолютных (диких) узлов) с помощью бесконечного изгиба, деформируя концентрические дуги проходящие под, либо над пересечениями изгибаемых абсолютных (диких) узлов по круговому квадранту  $\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$  и  $\left(\pi, \frac{3\pi}{2}\right)$  или  $\left(\frac{\pi}{2}, \pi\right)$  и  $\left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right)$ . Такой

процесс плетения абсолютной (дикой) косы из “m” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов продолжается до тех пор, пока не заплетётся вся её длина. Алгоритм метода аналогичным образом применим ко всем остальным пяти взаимно перпендикулярным направляющим полуосям со множеством “m” - прядей.

*Замечание 1.* Если точку пересечения всех плотно переплетённых абсолютных (диких) кос, шарообразного трёхмерного пучка перевернуть одновременно по вертикальным и по горизонтальным полуосям до самого конца, то получим плотный трёхмерный шар с закрученным винтовым выступом.

**Классическая техника плетения абсолютной (дикой) косы с применением метода «плетение с винтовым кручением (или плетение с винтовым кручением, равномерно сжимающимся в направлении к центральной оси по круговому квадранту)»**

Классическая техника плетения абсолютной (дикой) косы с применением нового метода, рассматривается в конечном паутином (диком) трёхмерном пространстве в следующих вариантах:

- плетение абсолютной (дикой) косы из “m” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов с правой винтовой поверхностью;
- • плетение абсолютной (дикой) косы из “m” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов с левой винтовой поверхностью;
- • • плетение абсолютной (дикой) косы из “m” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов совместно с правыми и с левыми, или наоборот, винтовыми поверхностями.

Переплетение абсолютной (дикой) косы из “m” - прядей с изгибаемыми абсолютными (дикими) узлами в вариантах (•) и (••), кроме варианта (•••) с применением нового метода, никакого особого труда не составляет. Наиболее интересен (•••) - вариант. Так как плетение девичьей косы начинается из трёх прядей, состоящих из нескольких волосинок, то мы рассмотрим (•••) - вариант по аналогии девичьей косы со следующими частными случаями и его обобщение до “m” - й пряди.

*Замечание 2.* В качестве геометрического объекта для плетения абсолютной (дикой) косы возьмём шарообразный трёхмерный пучок, состоящий из множества изгибаемых абсолютных (диких) узлов.

1. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из трёх прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

- плетение осуществляется путём наложения крайних прядей абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  над и под центральной прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ;
- повторяем этот процесс плетения до тех пор, пока не заплетётся вся длина пряди абсолютных (диких) узлов:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  в абсолютную (дикую) косу  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$ ;

• процесс плетения повторяется через каждые шесть шагов.

2. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из четырёх прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

- разделим все множество абсолютных (диких) узлов на четыре пряди в равном количестве и пронумеруем их слева направо:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ ;

• третью прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  наложим на вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ , после подсунем её под первую прядку абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ , далее наложим её над четвертую прядку абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ ;

• четвертую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  наложим на первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ , как будто третья и вторая прядки абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  оплетают их;

• вторую прядку абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  просунем под первую прядку абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ , после её же наложим на третью прядку абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ;

• процесс плетения продолжаем, пока не заплетём всю длину пряди абсолютных (диких) узлов:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  в абсолютную (дикую) косу  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$ ;

• процесс плетения повторяется через каждые восемь шагов.

3. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из пяти прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

• разделим все множество абсолютных (диких) узлов на пять одинаковых прядей и пронумеруем их слева направо:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ ;

• пятую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$  проводим над третьей прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и под вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ;

• первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  проводим над третьей прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и под вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ;

• пятую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$  проводим над четвертой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  и под третью прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ;

• первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  проводим над третьей прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и под вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ;

• процесс плетения продолжается, пока вся длина абсолютной (дикой) косы  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$  не заплетётся с абсолютными (дикими) узлами:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ ;

• процесс плетения повторяется через каждые десять шагов.

4. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из шести прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

• все пряди множества абсолютных (диких) узлов, шарообразного трёхмерного пучка переложим на одну направляющую полуось из шести взаимно перпендикулярных между собой направляющих полуосей, и разделим их на левую и на правую часть;

• из левой части пряди абсолютных (диких) узлов сформируем три пряди абсолютных (диких) узлов, и пронумеруем их слева направо:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ;

• первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  уложим на вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  и проведём её под третью прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ;

• из правой части пряди абсолютных (диких) узлов также сформируем три одинаковые пряди абсолютных (диких) узлов, и пронумеруем их, продолжая нумерацию пряди из левой части:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ ;

• шестую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$  уложим под пятую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ , затем проведём её над четвёртой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  и под первой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ;

• процесс плетения продолжается, пока вся длина абсолютной (дикой) косы  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$  не заплетётся с абсолютными (дикими) узлами:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ ;

• процесс плетения повторяется через каждые двенадцать шагов.

5. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из семи прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

• разобьём шарообразный трёхмерный пучок со множеством прядей из абсолютных (диких) узлов на семь одинаковых частей и разделим их на левую и на правую стороны;

• три пряди из семи абсолютных (диких) узлов:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  переложим в левую сторону, а в правую - четыре пряди абсолютных (диких) узлов:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)$ ;

• четвертую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  поочерёдно перекладываем, то в левую, то в правую стороны;

• где больше количество прядей абсолютных (диких) узлов, там мы пронумеруем их последовательно слева направо:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)_1$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)_2$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)_3$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)_4$ ;

• первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)_1$  уложим над второй прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)_2$  и протянем её под третью прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)_3$  и под четвёртую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)_4$ ;

• первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)_1$  переложим с правой стороны на левую сторону;

• в левой стороне теперь стало четыре пряди абсолютных (диких) узлов, и мы вновь пронумеруем их слева направо:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3((\Omega_4)_1)_4$ , повторяем тот же алгоритм плетения;

• первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  уложим над второй прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ , затем проводим её под третью прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и под четвёртую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3((\Omega_4)_1)_4$ ;

• снова переложим четвёртую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3((\Omega_4)_1)_4$  с левой стороны на правую сторону;

• процесс плетения продолжается, пока не заплетётся до конца вся длина абсолютной (дикой) косы  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$ ;

• процесс плетения повторяется через каждые четырнадцать шагов.

6. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из восьми прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

• разобьём шарообразный трёхмерный пучок со множеством прядей из абсолютных (диких) узлов на восемь одинаковых частей и пронумеруем их слева направо:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,

$WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_8)$ ;

- первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  уложим под вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ , затем на третью прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ , далее просунем её под четвёртую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ , после на пятую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ , затем проводим её под шестую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ , также на седьмую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)$  и под восьмую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_8)$ ;

- заметим, что крайняя левая прядка абсолютного (дикого) узла стала крайней справа, но, с другой стороны, первая прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  осталась по-прежнему неизменной;

- от первой пряди абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  пронумеруем все остальные пряди абсолютных (диких) узлов справа налево;

- вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  заведём под третью прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ , уложим её на четвёртую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ , под пятую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ , на шестую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ , протянем её под седьмой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)$  и над восьмой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_8)$ ;

- снова поменяем нумерацию прядей абсолютных (диких) узлов, оставляя первую прядь абсолютного (дикого) узла по - прежнему неизменной;

- возьмём соседнюю - вторую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$  уложим её над третьей прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ , под четвёртую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ , далее протянем её над пятой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ , под шестой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ , затем заведём её над седьмой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)$  и под восьмой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_8)$ ;

- не трогая только что заплетённое множество прядей абсолютных (диких) узлов, возьмём соседнюю с ним прядь и проведём её под третьей прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ , над четвёртой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ , уложим её под пятой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$  и над шестой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ , протянем её под седьмой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)$ , заведём её над восьмой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_8)$ ;

- алгоритм плетения продолжается, пока не заплетётся вся длина абсолютной (дикой) косы  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$ ;

- процесс плетения повторяется через каждые шестнадцать шагов.

7. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из девяти прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

- весь шарообразный трёхмерный пучок со множеством прядей из абсолютных (диких) узлов переложим раскидывая назад, соединив их концы в одну общую точку и получим по виду напоминающий вытянутый к вершине круглый конус, слегка полуогнутый вовнутрь с выпуклым основанием и разобьём его по периметру поверхности на левую, центральную и правую одинаковые части;

• из центральной его части, выделим пять прядей абсолютных (диких) узлов:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ ;

• из пяти - три пряди абсолютных (диких) узлов:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  уложим друг на друга;

• первую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$  проведём под соседней прядью абсолютного (дикого) узла и над следующей прядью абсолютного (дикого) узла;

• аналогичные техники плетения кос выполняются с пятой прядью абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$  и с пятью прядями абсолютных (диких) узлов:  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_1)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_2)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$ ,  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$  и  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_5)$ ;

• отделив из левой части шестую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_6)$ , протянем её над ближайшей соседней прядью абсолютного (дикого) узла, под следующей прядью абсолютного (дикого) узла и снова над ещё соседней прядью абсолютного (дикого) узла;

• седьмую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_7)$  уложим над соседней прядью абсолютного (дикого) узла, протянем её под следующей прядью абсолютного (дикого) узла и вновь над очередной прядью абсолютного (дикого) узла и в итоге, все пряди абсолютных (диких) узлов будут располагаться в две стороны;

• восьмую прядь абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_8)$  проводим под ближайшей соседней прядью абсолютного (дикого) узла, затем над следующей прядью абсолютного (дикого) узла, вновь под и над очередной прядью абсолютных (диких) узлов;

• в конце концов каждую новую прядь абсолютных (диких) узлов переплетаем с ближайшими третьими прядями абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_3)$  и четвёртыми прядями абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_4)$ , чередуя положение плетений над и под, и переплетение завершится в том и только в том случае, если все пряди абсолютных (диких) узлов центральной части будут располагаться в одну из трёх частей;

• девятую прядь абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_9)$  проводим под ближайшей прядью абсолютных (диких) узлов, затем уложим её над следующей прядью абсолютного (дикого) узла и вновь под очередной прядью абсолютного (дикого) узла;

• к крайней прядке абсолютных (диких) узлов добавим небольшую часть абсолютных (диких) узлов, взятую в одной из трёх частей (точнее из левой части), и уложим их все вместе под прядью абсолютного (дикого) узла, над прядью абсолютного (дикого) узла, чередуя положение плетений и, так далее;

• доведём до конца плетение основной пряди абсолютных (диких) узлов вместе с добавленной частью из левой части, где множество прядей абсолютных (диких) узлов, располагается по разные стороны;

• аналогичным образом проведём переплетение с добавленными прядями абсолютного (дикого) узла из правой части;

• вновь заплетаем, пока не закончатся свободные пряди абсолютных (диких) узлов и дальше будем формировать косичку, заплетая ее без добавочных прядей абсолютных (диких) узлов;

• процесс плетения повторяется через каждые восемнадцать шагов.

8. Классическое плетение абсолютной (дикой) косы из “m” - прядей с абсолютными (дикими) узлами с применением метода - плетение с винтовым кручением.

• аналогичным образом плетутся абсолютные (дикие) косы  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$  из нескольких “m” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов;

• техника плетения абсолютной (дикой) косы  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$ , остается прежней;

• процесс плетения повторяется через каждые  $2(m+2)(\forall m \in \{N\})$  шагов.

### Наиболее яркие перспективы метода - плетение с винтовым кручением, и его дальнейшее развитие

Вновь возьмём шарообразный трёхмерный пучок, состоящий из “m” - прядей множества всех изгибаемых абсолютных (диких) узлов, проходящих через одну и ту же ось пересечения, и разобьём их

• на три взаимно перпендикулярные оси, или на шесть взаимно перпендикулярных направляющих полуосей со множеством  $\left(\frac{m}{6}\right)$  - прядей;

- на пять взаимно перпендикулярных осей, или на десять взаимно перпендикулярных направляющих полуосей со множеством  $\left(\frac{m}{10}\right)$  - прядей;
- на девять взаимно перпендикулярных осей, или на восемнадцать взаимно перпендикулярных направляющих полуосей со множеством  $\left(\frac{m}{18}\right)$  - прядей;
- на семнадцать взаимно перпендикулярных осей, или на тридцать четыре взаимно перпендикулярных направляющих полуосей со множеством  $\left(\frac{m}{34}\right)$  - прядей, и так далее.

Очевидно, что разности между последующими и предыдущими взаимно перпендикулярными осями со множеством “ $m$ ” - прядей, представляются рядами геометрической прогрессии

$$2, 2^2, 2^3, 2^4, \dots, 2^m, (m \in \{N\}) \quad (5)$$

но, с другой стороны, количество чисел, взаимно перпендикулярных направляющих полуосей со множеством “ $m$ ” - прядей, также представляется неполными рядами геометрической прогрессии с отсутствием первого члена ряда

$$2^2, 2^3, 2^4, 2^5, \dots, 2^{m+1}, (m \in \{N\}) \quad (6)$$

Произвольным образом, можно переплестать абсолютную (дикую) косу  $WABr_{((SWS), \rho)^3}^3(\Theta)$  из шарообразного трёхмерного пучка, состоящего из множества “ $m$ ” - прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS), \rho)^3}^3(\Omega_{i_{jk}})$ , проходящих через одну и ту же ось винтовых кривых, по всем его взаимно перпендикулярным направляющим полуосям. От произвольного значения угла наклона оси винтовой развёртки поверхности кривых в концентрические дуги, то есть от поверхности, представляющей геометрическое место главных нормалей винтовой линии, получим

- плотно закрученный с переплетением абсолютный (дикий) шар с винтовым выступом;
- плотно закрученный с переплетением абсолютный (дикий) эллипсоид с винтовым выступом;
- конически переплетённый абсолютной (дикой) косой, продолговатый круглый конус с винтовым скрученным выступом.

Но, с другой стороны, если предположим параметрическое уравнение поверхности, представляющее геометрическое место главных нормалей винтовой линии в виде

$$\begin{cases} x = \xi \cos \varphi \cos \eta, \\ y = \xi \cos \varphi \sin \eta, \\ z = \xi \sin \varphi + \chi \eta \end{cases} \quad (7)$$

в цилиндрической системе координат, в которой за координату  $\xi$  примем расстояние по образующей, а за координаты соответственно  $\eta$  - угол вращения образующей и  $\varphi$  - угол наклона образующей поверхности, представляющий геометрическое место главных нормалей винтовой линии, то в смысле А.Л. Гольденвейзера [15] очевидно получим аналогичное геометрическое соотношение

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_\xi - \left( \frac{\chi \sin(\varphi) \xi_\eta \xi \cos(\varphi) \sqrt{\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2} - \chi \sin(\varphi) \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_\eta \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^3}}{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^2} \right) = \\ = \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_\xi - \frac{\chi \xi_\eta}{\xi^4 \cos^4(\varphi) + 2\chi^2 \xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^4} \times \\ \times \left( \sin(\varphi) \xi \cos^2(\varphi) \sqrt{\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2} - \sin(\varphi) \frac{\partial}{\partial \xi} \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^3} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\xi_\xi \xi \cos^2(\varphi) \sqrt{\xi^2 + \chi^2} + \xi^2 \sin(2\varphi) \xi_z}{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) \sqrt{\xi^2 + \chi^2}} \quad (9)$$

$$\frac{\chi^2 \sin^2(\varphi) \xi_\eta \xi \cos(\varphi) (\xi^2 + \chi^2) \sqrt{\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2} + \cos(\varphi) (\xi^2 + \chi^2)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_\eta \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^3}}{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^2 \sqrt{(\xi^2 + \chi^2)^3}} -$$

$$\frac{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^2 \chi \xi_z \sqrt{\xi^2 + \chi^2}}{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^2 \sqrt{(\xi^2 + \chi^2)^3}} \quad (10)$$

$$\frac{-\xi_z \xi \cos(\varphi) - \xi_\xi \xi \chi \cos(\varphi) \sin(\varphi) + \xi_z \chi (\xi^2 + \chi^2 + \xi^2 \sin^2(\varphi))}{\sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) \sqrt{\xi^2 + \chi^2} (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)}} =$$

$$= \frac{-\xi_z \xi \cos(\varphi) (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^2 \sqrt{(\xi^2 + \chi^2)^3} - \xi_\xi \xi \chi \cos(\varphi) \sin(\varphi) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^3 (\xi^2 + \chi^2)^3}}{\sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^5 (\xi^2 + \chi^2)^4}} + (11)$$

$$+ \frac{\xi_z \chi (\chi^2 + \xi^2 (1 + \sin^2(\varphi))) + (\xi^2 + \chi^2) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^3}}{\sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^5 (\xi^2 + \chi^2)^4}}$$

$$- \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_z + \frac{\chi \cos(\varphi) \xi_\eta}{\sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)}} \quad (12)$$

$$\frac{\xi^2 \sin(2\varphi) \xi_\eta \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)} - \chi \cos(\varphi) \xi_\xi (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) \sqrt{\xi^2 + \chi^2}}{(\xi^2 + \chi^2) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^3}} \quad (13)$$

$$\frac{(\xi^2 + \chi^2) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 \cos^2(\varphi))} + \chi^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \xi_z (\xi^2 + \chi^2) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)}}{\cos(\varphi) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)^3}} -$$

$$\frac{\chi^2 \sin^2(\varphi) \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_z - \chi^2 \cos^2(\varphi) \xi_z (\xi^2 + \chi^2) (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^2}{\cos(\varphi) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)^3}} =$$

$$(14)$$

$$\frac{(\xi^2 + \chi^2) \{ \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 \cos^2(\varphi))} + \chi^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \xi_z \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)} \}}{\cos(\varphi) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)^3}} -$$

$$\frac{\chi^2 \cos^2(\varphi) \xi_z (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2)^2 \} - \chi^2 \sin^2(\varphi) \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_z}{\cos(\varphi) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)^3}}$$

$$\frac{\cos(\varphi) \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_z (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) + \chi^2 \cos(\varphi) \xi_z}{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) \sqrt{(\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) (\xi^2 + \chi^2)}} \quad (15)$$



$$\begin{aligned}
& \frac{2 \sin(2\varphi) (\xi^2 \cos^2(\varphi) (\xi^2 + \chi^2) - \chi^2 (\xi^2 + \chi^2 + \xi^2 \sin^2(\varphi))) \chi \xi_z + \chi \sin(2\varphi) \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \xi_z (\xi^2 + \chi^2)}{2 (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) \sqrt{(\xi^2 + \chi^2)^3}} = \\
& = \frac{\sin(2\varphi) \xi_z \left[ 2 (\xi^2 \cos^2(\varphi) (\xi^2 + \chi^2) - \chi^2 (\xi^2 + \chi^2 + \xi^2 \sin^2(\varphi))) \chi + \chi \xi \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi^2 + \chi^2) \right]}{2 (\xi^2 \cos^2(\varphi) + \chi^2) \sqrt{(\xi^2 + \chi^2)^3}} \quad (16)
\end{aligned}$$

В дополнение к этому можно подчеркнуть некоторые соображения в [16].

### Изгибающие континуумы с относительной метрикой, деформируемые в сферически спиральный абсолютный (дикий) узел

По сути дела, абсолютная (дикая) коса  $WABr.^3_{((SWS), \rho)^3}(\Theta)$ , переплетённая из всех множеств прядей изгибаемых абсолютных (диких) узлов  $WAKn.^3_{((SWS), \rho)^3}(\Omega_{i_{jk}})$  является частным случаем голографической спиральной (дикий) косы  $WHSBr.^3_{((SWS), \mathfrak{T})^3}(H)$ , переплетённой из всех множеств голографических спиральных (диких) узлов  $WHSKn.^3_{((SWS), \mathfrak{T})^3}(H_{i_{jk}})$ , изгибающих континуумы с относительной метрикой, и путь познания природы таких узлов, несомненно, лежит через познание их патологических структур и свойств. Геометрическая томография множеств голографических спиральных (диких) узлов  $WHSKn.^3_{((SWS), \mathfrak{T})^3}(H_{i_{jk}})$ , изгибающих континуумы с относительной метрикой и переплетённых ими голографических спиральных (диких) кос  $WHSBr.^3_{((SWS), \mathfrak{T})^3}(H)$  представляется плотно скрученным к центральной оси симметрии улитковым фракталом, причем, каждая его сканированная часть допускает геометрическую и топологическую структуру. Непрерывно деформируя изгибающие континуумы с относительной метрикой, получим сферически спиральные изгибаемые абсолютные (дикие) узлы  $WSSAKn.^3_{((SWS), \mathfrak{T})^3}(S) \subseteq ((SWS), \rho)^3$  с разъединёнными концамидвигающимися в конечном трёхмерном паутином (диком) пространстве  $((SWS), \rho)^3$  случайно с равной вероятностью, с конечным числом раскладок и объёмов.

**Замечание 3.** Трёхмерная сферическая (или шарообразная) спираль — это винтовая кривая на поверхности сферы (или внутри плотного шара), пересекающая все меридианы сферы (или шара) под постоянным углом и имеющая бесконечное число витков, в которой расстояние между витками убывает по мере приближения к полюсам. В качестве такого трёхмерного винтового кривого выступает изгибаемый абсолютный (дикий) узел с параметрическим уравнением:

$$\begin{cases} x = r \frac{\cos \theta}{ch.((\theta - \theta_0)ctg\alpha)}, \\ y = r \frac{\sin \theta}{ch.((\theta - \theta_0)ctg\alpha)}, \\ z = rth.((\theta - \theta_0)ctg\alpha), (0 \leq \theta \leq 2\pi) \end{cases} \quad (17)$$

где ch. и th. - гиперболические косинус и тангенс.

Заметим, что сферически спиральные изгибаемые абсолютные (дикие) узлы  $WSSAKn.^3_{((SWS), \mathfrak{T})^3}(S)$  с разъединёнными концами допускают геометрические структуры и метрические аппроксимации со сферически спиральными дикими точками, и мера хаоса при этом, представляется с точностью до случайных перемещений, не имеющих общей цели:

$$mes.(H)_{((SWS),\rho)^3}^3 \left\{ WSAKn_{((SWS),\mathfrak{T})^3}^3(S) \right\} = 2^{\max\{C_1(m)C_2(m)C_3(m)\}} \log_2 \left( \frac{m \ln m}{\left( \frac{2}{24m+1} \right) \ln \left( \left( \frac{m}{e} \right) \right)} \right) \quad (18)$$

где  $C_1(m)$ ,  $C_2(m)$  и  $C_3(m)$  - число случайных перемещений.

Так как компактное множество  $\Xi$ , сотканых топологических ковров из геликоидальных (диких) абсолютных узлов, не разбивается на два и более непересекающихся инвариантных подмножества  $\Xi_i$ , и в то же время оно разбивается на конечное число измеримых подмножеств, то размерность Хаусдорфа  $\mu(\Xi_H)$  и размерность хаоса  $\mu(\Xi_{CH})$  соответственно будут равны

$$\begin{aligned} \mu(\Xi_H) &= \lim_{(\max diam(\Xi_i))} \frac{\sum_i \Re(\Xi_{i_1 i_2 \dots i_m}) \ln(\Xi_{i_1 i_2 \dots i_m})}{\ln(\max diam(\Xi_i))} = \\ &= \lim_{(\max diam(\Xi_i))} \frac{\sum_i \Re(\Xi_{i_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{i_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{i_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{i_m}))}{\ln(\max diam(\Xi_{i_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{i_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{i_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{i_m})))} \times \\ &\quad \times \frac{\ln(\Xi_{i_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{i_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{i_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{i_m}))}{\ln(\max diam(\Xi_{i_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{i_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{i_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{i_m})))}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mu(\Xi_{CH}) &= \lim_{(\max diam(\Xi_i))} \lim_{(m \rightarrow \infty)} (m)^{-1} (-\ln(C_\gamma^{(m)}(\max diam(\Xi_i)))) = \\ &= \lim_{(\max diam(\Xi_i))} \lim_{(m \rightarrow \infty)} (m2^m)^{-1} (-\ln(C_\gamma^{(m)}(\max diam(\Xi_i)))) = \\ &= \lim_{(\max diam(\Xi_i))} \lim_{(m \rightarrow \infty)} (m2^m)^{-1} (-\ln(C_\gamma^{(m)}(\max diam(\Xi_{i_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{i_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{i_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{i_m}))))). \end{aligned} \quad (20)$$

### Основные результаты

Все изложенные выше исследования, естественно, приводят к следующим равносильным эквивалентным утверждениям:

**Предложение 1.** Пусть задано конечное, трёхмерное паутинное (дикое) пространство  $((SWS), \rho)^3$ . И пусть  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega) \in ((SWS), \rho)^3$  - абсолютный (дикий) узел. Тогда следующие утверждения эквивалентны:

- абсолютный (дикий) узел  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$  представляет собой цилиндрически спирально винтовое или сферически спирально винтовое с разъединёнными концами геометрическое тело с винтовым выступом, каждый виток винтового выступа которого выколот круглыми дырками по круговому квадранту:  $\left(0, \frac{\pi}{2}\right), \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right), \left(\pi, \frac{3\pi}{2}\right)$  и  $\left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right)$  чередующимися чётными и нечётными числами;

- так как 1 - ручки с “m” - выколотыми круглыми дырками на винтовом выступе могут быть зацеплены друг с другом, то каждая зацепленная друг с другом 1 - ручка, может быть перекручена на целое число оборотов;

- число заклеенных 1 - ручек на спирально винтовом выступе не превосходит  $\left(\frac{2 + (\alpha - \beta - \gamma)}{2}\right)$ , где  $\alpha$  - число

двойных точек на нормальной проекции,  $\beta$  - максимальное значение индекса пересечения Джордана  $J(x, z)$  нескольких объединений замкнутых линий в трехмерном конечном паутинном(диком)пространстве, которые попарно не пересекаются друг с другом,  $\gamma$  - множество всех вырезанных круглых дырок;

- поверхность винтового выступа абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$ , которая представляет собой либо цилиндрически спирально винтовое, либо сферически спирально винтовое с разъединёнными концами геометрическое тело, вытянутое вдоль винтовой линии, сохраняет устойчивость;

- любой тип конфигурации абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$  допускает геометрическую структуру и метрически аппроксимируемо либо цилиндрически спиральными, либо сферически спиральными соответственно точками;
- сферически спирально винтовые абсолютные (дикие) узлы  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega_i)$  с разъединёнными концами зацепляясь между собой в пары, тройки и более образуют шарообразное кольцо;
- любой тип конфигурации абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$ , расположенных неравномерно и визуальнo в трёхмерном конечном паутином (диком) пространстве  $((SWS),\rho)^3$ , имеет меру хаоса

$$mes.(H)_{((SWS),\rho)^3}^3 \left\{ WSSAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(S) \right\} = 2^{\max_{(m)} \{C_1(m), C_2(m), C_3(m)\}} \log_2 \left( \frac{m \ln m}{\left( \frac{2}{24m+1} \right) \ln \left( \left( \frac{m}{e} \right) \right)} \right),$$

где  $C_1(m)$ ,  $C_2(m)$  и  $C_3(m)$  - число случайных перемещений, не имеющих общей цели, то есть любой тип конфигурации абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$  под влиянием деформации двигается в конечном трёхмерном паутином (диком) пространстве  $((SWS),\rho)^3$  случайно с равной вероятностью, а  $m$  - число раскладок любого типа абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$  в заданном конечном трёхмерном паутином (диком) пространстве  $((SWS),\rho)^3$ .

*Предложение 2.* Пусть в трёхмерном конечном паутином (диком) пространстве  $((SWS),\rho)^3$  задано трёхмерная абсолютная (дикая) коса  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta) \in ((SWS),\rho)^3$  из “м” - прядей абсолютных (диких) узлов  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$ . И пусть  $Carpet_{((SWS),\rho)^3}^3(C) \in ((SWS),\rho)^3$  - топологический ковер из геликоидальных (диких) абсолютных узлов. Тогда следующие утверждения эквивалентны:

- всякое переплетение из “м” - прядей любого типа конфигураций абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$ , начиная с трёх и более - есть абсолютная (дикая) коса  $WABr_{((SWS),\rho)^3}^3(\Theta)$  с различным типом плетения;

- в топологическом ковре из геликоидальных (диких) абсолютных узлов  $Carpet_{((SWS),\rho)^3}^3(C) \in ((SWS),\rho)^3$  трансверсальные точки  $\sigma_i \in Carpet_{((SWS),\rho)^3}^3(C)$  соединяются петлями одинаковой площадью, образуя пучкообразную мозаику кривых и на порядок отличаются от неподвижной точки  $\beta \in \Sigma$  многообразия  $\Sigma \subseteq ((SWS),\rho)^3$ , которое имеет сложную патологическую структуру;

- неподвижная точка  $\beta \in \Sigma$  многообразия  $\Sigma$  имеет соответственно, устойчивые  $\Sigma_1 \in ((SWS),\rho)^3$  и неустойчивые  $\Sigma_2 \in ((SWS),\rho)^3$  многообразия, не имеющие самопересечение  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ ;

- если имеет место соотношение  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ , то петли, с помощью которых соединены трансверсальные точки  $\sigma_i \in Carpet_{((SWS),\rho)^3}^3(C)$  посредством отображения  $\tau(\sigma_i)$  вытягиваются до предельного касания соответственно между выпуклыми и вогнутыми касательными точек любого типа конфигураций абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$ ;

- если же имеет место соотношение  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 \neq \emptyset$ , то возникают свободные (дикие) точки  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \bigcap_{j=-\infty}^{\infty} \gamma_j$ , которые определяются бесконечным множеством пересечений;

- локальную область любого типа конфигураций абсолютного (дикого) узла  $WAKn_{((SWS),\rho)^3}^3(\Omega)$  можно изометрически гладко подвергать к деформации в локальную область топологического ковра из геликоидальных (диких) абсолютных узлов  $Carpet_{((SWS),\rho)^3}^3(C)$ ;

- если компактное множество  $\Xi \subseteq Carpet_{((SWS),\rho)^3}^3(C)$  разбивается на конечное число измеримых подмножеств  $\Xi_k$ , то размерность Хаусдорфа и размерность хаоса соответственно равны

$$\begin{aligned}
\mu(\Xi_H) &= \lim_{(\max \text{diam}(\Xi_k))} \frac{\sum_k \Re(\Xi_{k_1 k_2 \dots k_m}) \ln(\Xi_{k_1 k_2 \dots k_m})}{\ln(\max \text{diam}(\Xi_k))} = \\
&= \lim_{(\max \text{diam}(\Xi_k))} \frac{\sum_k \Re(\Xi_{k_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{k_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{k_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{k_m}))}{\ln(\max \text{diam}(\Xi_{k_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{k_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{k_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{k_m})))} \times \\
&\quad \times \frac{\ln(\Xi_{k_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{k_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{k_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{k_m}))}{\ln(\max \text{diam}(\Xi_{k_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{k_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{k_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{k_m})))}. \\
\mu(\Xi_{CH}) &= \lim_{(\max \text{diam}(\Xi_k))} \lim_{(m \rightarrow \infty)} m^{-1} (-\ln(C_\gamma^{(m)}(\max \text{diam}(\Xi_k)))) = \\
&= \lim_{(\max \text{diam}(\Xi_k))} \lim_{(m \rightarrow \infty)} (m2^m)^{-1} (-\ln(C_\gamma^{(m)}(\max \text{diam}(\Xi_k)))) = \\
&= \lim_{(\max \text{diam}(\Xi_k))} \lim_{(m \rightarrow \infty)} (m2^m)^{-1} (-\ln(C_\gamma^{(m)}(\max \text{diam}(\Xi_{k_1} \cap \Psi^{-1}(\Xi_{k_2}) \cap \Psi^{-2}(\Xi_{k_3}) \cap \dots \cap \Psi^{-(m-1)}(\Xi_{k_m}))))))
\end{aligned}$$

### Заключение

В полном объеме исследованы геометрические и геликоидальные структуры изгибаемых абсолютных (диких) узлов и кос в трёхмерном конечном паутином (диком) пространстве. Построен топологический ковер из геликоидальных (диких) абсолютных узлов и особый тип геометрического трехмерного тела с винтовым выступом.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Абдыманапов У. Дикое вложение звездного тела в трёхмерном Евклидовом пространстве / У. Абдыманапов // Наука и новые технологии. Нетрадиционные идеи и новые направления науки. - 2002.- № 4. - С.101-103.
2. Abdymanapov U. Wild embeddings of the star body in three-dimensional Euclidean space (continued research) / U. Abdymanapov // 4<sup>th</sup> European Congress of Mathematics. - Stockholm: ICMS-Progress in Mathematics (- 2004/- vol.2004/- no.1).
3. Abdymanapov U. Intersection of surfaces with skeletons in three-dimensional star space / U. Abdymanapov // Dubrovnik VII - Geometric Topology. Inter-University Centre. Dubrovnik and Department of Mathematics. University of Zagreb. - Dubrovnik. Croatia. - 2011. - P. 1-2.
4. Abdymanapov U. Cobraid braids / U. Abdymanapov // 46<sup>th</sup> Annual Spring Topology and Dynamics Conference. Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM). Mexico City. D.F. - Mexico. - 2012. - P. 1-2.
5. Abdymanapov U. Pathological ( wild ) knots and braids in three-dimensional of the Euclidean space / U. Abdymanapov // 28<sup>th</sup> Summer Conference on Topology and it's Applications. Nipissing University. - North Bay. - Ontario. Canada - 2013. - P. 1-2.
6. Abdymanapov U. Intersection of the spiral disks with skeletons in three-dimensional of the coral space / U. Abdymanapov // The 4<sup>th</sup> Abu Dhabi University. Annual International Conference: Mathematical Science and it's Applications. - 2015. - Abu Dhabi. United Arab Emirates. - P. 1-2.
7. Абдыманапов У. Патологические ( дикие ) узлы и косы в трёхмерном звёздном пространстве / У. Абдыманапов // Сборник трудов всероссийской научной конференции МИЕСЭКО-2016. - Москва. - Том 1. - 2016. - С. 20 - 33.
8. Абдыманапов У. Геометрия поверхностей конфокальной системы в трёхмерном Евклидовом пространстве / У. Абдыманапов // Труды XLI Межд. научно-практической конференции “ Естественные и математические науки в современном мире “. - Новосибирск. - 2016. - № 4 (39). - С. 122 - 132.
9. Abdymanapov U. Wild knots in the spiral braided continuum / U. Abdymanapov // 2016 International Conference of the Honam Mathematical Society. Chonbuk National University. - 2016. Jeonju. South Korea. - P. 1-2.
10. Abdymanapov U. Wild knots in the spiral braided continuum (continued research) / U. Abdymanapov // International Conference on Application of Mathematics to Nonlinear Sciences. Association of Nepal Mathematicians in America and Nepal Mathematical Society. - 2016. - Kathmandu. Nepal. - P. 1-2.
11. Louis Auguste Antoine. Sur l'homeomorphisme de deux figures et leurs voisinages / Louis Auguste Antoine // Journal Math.Pures.-1921. et appl.4. - P. 221-325.
12. Artin E. Abhandl aus dem / E. Artin // Mathem. Seminar. - Hamburg. - 1925. - vol. 4. - P. 47-72.
13. Alexander J.W. On the deformation of n - cell / J.W. Alexander // Proc. Nat. Acad. Sc. USA. -1923. - vol. 9. - P. 406-407.
14. Alexander J.W. The combinatorial theory of complexes / J.W. Alexander // Ann. Math. - 1930. - vol. 30. - P. 2092-2320.
15. Гольденвейзер А.Л. Теория тонких упругих оболочек / А.Л. Гольденвейзер. - М.: ГТТИ. - 1953. -544с.
16. Рекач В.Г. Расчёт оболочек сложной геометрии / В.Г.Рекач, С.Н.Кривошапка. // Монография. - М.: изд-во УДН. - 1988. -176 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Abdymanapov U. Dikoe vložhenie zvezdnogo telo v trjohmernom Evklidovom prostranstve [Wild embeddings of the star body in three-dimensional Euclidean space] / U. Abdymanapov // Nauka i novye tehnologii. Netradicionnye idei i novye napravlenija nauki [Science and new technologies. Unconventional ideas and new directions of science]. - 2002.- № 4. - P.101-103. [in Russian]

2. Abdymanapov U. Wild embeddings of the star body in three-dimensional Euclidean space (continued research) / U. Abdymanapov // 4th European Congress of Mathematics. - Stockholm: ICMS-Progress in Mathematics (- 2004/- vol.2004/- no.1).
3. Abdymanapov U. Intersection of surfaces with skeletons in three-dimensional star space / U. Abdymanapov // Dubrovnik VII - Geometric Topology. Inter-University Centre. Dubrovnik and Department of Mathematics. University of Zagreb. - Dubrovnik. Croatia. - 2011. - P. 1-2.
4. Abdymanapov U. Cobraid braids / U. Abdymanapov // 46th Annual Spring Topology and Dynamics Conference. Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM). Mexico City. D.F. - Mexico. - 2012. - P. 1-2.
5. Abdymanapov U. Pathological ( wild ) knots and braids in three-dimensional of the Euclidean space / U. Abdymanapov // 28th Summer Conference on Topology and it's Applications. Nipissing University. - Noth Bay. - Ontario. Canada - 2013. - P. 1-2.
6. Abdymanapov U. Intersection of the spiral disks with skeletons in three-dimensional of the coral space / U. Abdymanapov // The 4th Abu Dhabi University. Annual International Conference: Mathematical Science and it's Applications. - 2015. - Abu Dhabi. United Arab Emirates. - P. 1-2.
7. Abdymanapov U. Patologicheskie ( dikie ) uzly i kosy v trjohmernom zvjozdnom prostranstve [Pathological ( wild ) knots and braids in three-dimensional of the star space] / U. Abdymanapov // Sbornik trudov vserossijskoj nauchnoj konferencii MIESJeKO-2016 [Proceedings of the Conference of Mathematics, Informatics, Natural Science in Economics and Society (CMINSES)]. - Moscow. - Vol 1. - 2016. - P. 20 - 33. [in Russian]
8. Abdymanapov U. Geometrija poverhnostej konfokal'noj sistemy v trjohmernom Evklidovom prostranstve / U. Abdymanapov [The geometry of the surfaces of the confocal system in three –dimensional Euclidean space] // Trudy XLI Mezhd. nauchno-prakticheskoy konferencii “ Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire” [Proceedings of the XLI International Scientific and Practical Conference “ Natural and mathematical sciences in the modern world”]. -Novosibirsk. - 2016. - no.4(39). - P.122 - 132. [in Russian]
9. Abdymanapov U. Wild knots in the spiral braided continuum / U. Abdymanapov // 2016 International Conference of the Honam Mathematical Society. Chonbuk National University. - 2016. Jeonju. South Korea. - P. 1-2.
10. Abdymanapov U. Wild knots in the spiral braided continuum (continued research) / U. Abdymanapov // International Conference on Application of Mathematics to Nonlinear Sciences. Association of Nepal Mathematicians in America and Nepal Mathematical Society. - 2016. - Kathmandu. Nepal. - P. 1-2.
11. Louis Auguste Antoine. Sur l'homeomorphisme de deux figures et leurs voisinages [On the homeomorphism of two figures and their neighbourhoods] / Louis Auguste Antoine // Journal Math.Pures.-1921. et appl.4. - P. 221-325. [in French]
12. Artin E. Abhandl aus dem [Abhandl from the] / E. Artin // Mathem. Seminar. - Hamburg. - 1925. - vol. 4. - P. 47-72. [in German]
13. Alexander J.W. On the deformation of n - cell / J.W. Alexander // Proc. Nat. Acad. Sc. USA. -1923. - vol. 9. - P. 406-407.
14. Alexander J.W. The combinatorial theory of complexes / J.W. Alexander // Ann. Math. - 1930. - vol. 30. - P. 2092-2320.
15. Gol'denvejzer A.L. Teorija tonkih uprugih obolochek [Theory of thin elastic shells] / A.L. Gol'denvejzer. - M.: GTTI. - 1953. -544 p. [in Russian]
16. Rekach V.G. Raschjot obolochek slozhnoj geometrii [Calculation of shells of complex geometry] / V.G.Rekach, S.N.Krivoshapka. - M.: Publishing House of UDN. - 1988. -176 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.002>

# О ВЛИЯНИИ ХАРАКТЕРА НЕЛИНЕЙНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНХРОНИЗАЦИИ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА МЕТОДОМ ПРИБЛИЖЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Научная статья

Антоновская О.Г.<sup>1,\*</sup>, Бесклубная А.В.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-5688-7996;<sup>1,2</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

\* Корреспондирующий автор (olga.antonovskaja[at]yandex.ru)

## Аннотация

В настоящее время вряд ли есть необходимость обосновывать важность колебательных процессов в современной физике и естествознании. Признанным средством исследования колебательных процессов в различных разделах физики и техники является аппарат теории дифференциальных уравнений. Естественно, наиболее доступными для исследования являются колебательные системы с малой нелинейностью. Причем до сих пор особый интерес представляет изучение систем, близких к гармоническому осциллятору (квазигармонический осциллятор). В настоящей работе исследуется возможность сведения задачи об исследовании синхронизации квазигармонического осциллятора к исследованию функций последования точечного отображения, при построении которого используется метод последовательных приближений, а также делается вывод о зависимости результатов исследования системы в целом от вида нелинейности.

**Ключевые слова:** фазовое пространство нелинейной колебательной системы, синхронизация, квазигармонический осциллятор, малый параметр, асимптотические методы исследования, метод точечных отображений.

## ON THE EFFECT OF NONLINEARITY TYPES ON THE RESULTS OF STUDYING THE SYNCHRONIZATION OF QUASI-HARMONIC OSCILLATOR VIA APPROXIMATE POINT MAPPING

Research article

Antonovskaya O.G.<sup>1,\*</sup>, Besklubnaya A.V.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-5688-7996;<sup>1,2</sup> Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

\* Corresponding author (olga.antonovskaja[at]yandex.ru)

## Abstract

At present, there is no particular need to justify the importance of oscillatory processes in modern physics and natural science. The apparatus of the theory of differential equations is a recognized tool for studying oscillatory processes in various branches of physics and engineering. Naturally, oscillatory systems with low nonlinearity are the most accessible for research and in so far, the study of systems close to the harmonic oscillator (quasi-harmonic oscillator) presents particular interest. The article explores the possibility of reducing the problem of studying the synchronization of a quasi-harmonic oscillator to the study of the Poincare functions of a point map, which is constructed using the method of successive approximation. The article concludes that the results of the study of the system as a whole depend on the type of nonlinearity.

**Keywords:** phase field of a nonlinear oscillating system, synchronization, quasi-harmonic oscillator, small parameter, asymptotic research methods, point mapping method.

Изучение нелинейной колебательной системы означает прежде всего разбиение ее фазового пространства на траектории всех возможных типов, а в пространстве параметров – выделение областей существования движений того или иного типа. Получение ответов на поставленные вопросы возможно, если известны функции, определяющие состояния системы и изменения этих состояний [1, С. 35]. Однако эти функции, которые и приходится изучать, как правило, определены с помощью дифференциальных уравнений, описывающих данную систему, и другого определения не имеют. Поэтому необходимо из самих дифференциальных уравнений извлекать информацию относительно характера и вида функций, этими уравнениями определяемых [1, С. 35].

Наиболее общее средство описания и достаточно эффективный математический аппарат исследования нелинейных колебательных систем дает метод точечных отображений, поскольку позволяет единообразно подходить к исследованию систем различной физической природы [2]. Возможность использования теории точечных отображений для изучения решений дифференциальных уравнений основана на сводимости изучения фазовых траекторий динамической системы, описываемой дифференциальными уравнениями, к рассмотрению точечных отображений, порождаемых этими фазовыми траекториями на секущих поверхностях [2, С. 184-187]. При этом практическое применение этого метода оказалось связанным с рядом трудностей, главная из которых – отыскание функций последования. Естественно, что построение точечных отображений не представляет затруднений, если известно общее решение рассматриваемых дифференциальных уравнений. В случае, когда получение такого общего решения невозможно, можно прибегнуть к тем или иным приближенным (в том числе и асимптотическим) методам [2, С. 205-210].

В настоящей работе исследуется возможность сведения задачи о синхронизации квазигармонического осциллятора к изучению вопроса о существовании неподвижных точек аналитически заданного точечного отображения, при построении которого используется метод последовательных приближений [3], [4], [5]. При этом делается вывод о влиянии характера нелинейности на результаты исследования поведения траекторий системы в целом методом приближенных точечных отображений.

Рассмотрим уравнение движения синхронизируемого осциллятора вида

$$\ddot{x} + x = \mu \cdot f(x, \dot{x}, t/p) \quad (1)$$

в котором  $0 < \mu \ll 1$ , а  $2p\pi$  - период внешней силы, или, если ввести  $y = \dot{x}$ , систему двух уравнений первого порядка

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = -x + \mu \cdot f(x, y, t/p) \quad (2)$$

Величина параметра  $\mu$  при заданной функции  $f(x, y, t/p)$  определяет степень близости рассматриваемой системы к линейной консервативной системе (гармоническому осциллятору) [1, С. 479]. Относительно самой функции  $f(x, y, t/p)$  обычно предполагается ее ограниченность и непрерывность для любого  $t$  (либо ограниченность и наличие только конечного числа точек разрыва). Задача состоит в нахождении условий существования у (2) периодического решения с периодом  $2p\pi$ .

Следует отметить, что изучение систем, близких к гармоническому осциллятору (квазигармонический осциллятор) [1, С. 479–534], [6, С.19–21], до сих пор играет особую роль. Одним из важных достоинств таких систем является возможность использовать хорошо известные математические свойства процессов колебаний гармонического осциллятора с медленно меняющейся частотой в различного вида задачах [7], [8], [9]: от задач обработки сигналов [7] до изучения неравновесных экономических систем [9].

Исследование поведения траекторий синхронизируемого осциллятора (1), (2) может быть сведено к изучению точечного отображения  $T$  секущей поверхности  $t = [t/(2p\pi)]2p\pi$  фазового пространства  $x, y, t$  в себя [3], [4], [5] (или секущей поверхности  $t=0$  в секущую поверхность  $t = 2p\pi$ ), порожденного траекториями системы. Для получения функций последования отображения можно воспользоваться заменой переменных  $(x, y) \rightarrow (a, b)$  типа Ван-дер-Поля [1, С. 481]

$$\dot{x} = y, \quad x = a \cos t + b \sin t, \quad y = -a \sin t + b \cos t$$

При этом  $a, b$  будут определяться дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{a} &= -\mu f(a \cos t + b \sin t, -a \sin t + b \cos t, t/p) \sin t, \\ \dot{b} &= \mu f(a \cos t + b \sin t, -a \sin t + b \cos t, t/p) \cos t, \end{aligned}$$

а для отображения  $T$  точек  $M_0(x_0, y_0)$  в точки  $M(\bar{x}, \bar{y})$  получим

$$\begin{aligned} x_0 = x_0, y_0 = b_0, \quad \bar{x} &= \bar{a} \cos 2p\pi + \bar{b} \sin 2p\pi, \quad \bar{y} = -\bar{a} \sin 2p\pi + \bar{b} \cos 2p\pi, \quad \text{где} \\ a_0 &= a(0), b_0 = b(0), x_0 = x(0), y_0 = y(0), \quad \bar{a} = a(2p\pi), \bar{b} = b(2p\pi), \quad \bar{x} = x(2p\pi), \\ &\quad \bar{y} = y(2p\pi). \end{aligned}$$

Заметим, что согласно [3], [5], [10], с точностью до величин порядка  $\mu^2$  выражения для  $\bar{a}, \bar{b}$  могут быть приближенно представлены формулами

$$\tilde{a} = a_0 - \mu F_1(a_0, b_0), \quad \tilde{b} = b_0 + \mu F_2(a_0, b_0), \quad (3)$$

где

$$F_1(a_0, b_0) = \int_0^{2p\pi} f(a_0 \cos t + b_0 \sin t, -a_0 \sin t + b_0 \cos t, t/p) \sin t \, dt \quad (4)$$

$$F_2(a_0, b_0) = \int_0^{2p\pi} f(a_0 \cos t + b_0 \sin t, -a_0 \sin t + b_0 \cos t, t/p) \cos t \, dt. \quad (5)$$

Соотношения (3)–(5), порождают приближенное точечное отображение  $\tilde{T}$

$$\tilde{x} = \tilde{a} \cos 2p\pi + \tilde{b} \sin 2p\pi, \quad \tilde{y} = -\tilde{a} \sin 2p\pi + \tilde{b} \cos 2p\pi$$

с функциями последования

$$\tilde{x} = [x_0 - \mu F_1(x_0, y_0)] \cos 2p\pi + [y_0 + \mu F_1(x_0, y_0)] \sin 2p\pi, \quad (6)$$

$$\tilde{y} = -[x_0 - \mu F_1(x_0, y_0)] \sin 2p\pi + [y_0 + \mu F_1(x_0, y_0)] \cos 2p\pi \quad (7)$$

Поскольку формулы (6)–(7) явные, изучение условий существования синхронного режима с периодом внешней силы может быть проведено с помощью изучения условий существования и устойчивости простой неподвижной точки  $\tilde{x} = x_0 = x^*, \tilde{y} = y_0 = y^*$  приближенного точечного отображения  $\tilde{T}$ .

Особый интерес представляет изучение движений квазигармонического осциллятора вблизи главного резонанса ( $p \approx 1 + \mu\xi$ ). В этом случае рассматриваются уравнения вида

$$\ddot{x} + x = \mu[-\xi x + g(x, \dot{x}) + A \cos t] \quad (8)$$

где  $g(x, \dot{x})$  – нелинейная функция. В [1, С. 479-534] было отмечено, что применение асимптотических методов исследования квазилинейных дифференциальных уравнений при конечных, хотя и малых, значениях параметра  $\mu$  возможно лишь для количественного их исследования, поскольку качественное поведение траекторий реальной системы и приближенной модели во всем фазовом пространстве могут отличаться друг от друга. Метод приближенных точечных отображений применялся для исследования уравнения (8) с различными нелинейностями [3], [5], [11]. При этом ключевым стал вопрос о том, является ли при этом бесконечность неустойчивой, как и в реальной системе (такая приближенная модель системы называлась невырожденной), или же она устойчива, и возможно лишь локальное применение результатов приближенного исследования (а модель была названа вырожденной).

Получение качественно различных ответов на вопрос о вырожденности – невырожденности математической модели в методе приближенных точечных отображений при исследовании синхронизации квазигармонического осциллятора с нелинейностями разного вида приводит к задаче о выделении классов нелинейностей, отвечающих случаям вырожденности и невырожденности приближенной математической модели.

Для системы общего вида

$$y = \dot{x}, \dot{y} = -x + \mu[-\xi x + g(x, y) + A \cos t] \quad (9)$$

приближенное точечное отображение  $\tilde{T}$  секущей поверхности  $t=0$  фазового пространства  $x, y, t$  в секущую поверхность  $t=2\pi$ , приближающее точечное отображение  $T$ , порожденное траекториями (9), с точностью до членов порядка  $\mu^2$ , имеет вид

$$\tilde{x} = x_0 - \mu\pi[x_0 - \xi y_0 + G_1(x_0, y_0)], \quad (10)$$

$$\tilde{y} = y_0 - \mu\pi[\xi x_0 + y_0 - G_2(x_0, y_0) - A] \quad (11)$$

где

$$G_1(x_0, y_0) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(x_0 \cos t + y_0 \sin t, -x_0 \sin t + y_0 \cos t) \sin t dt,$$

$$G_2(x_0, y_0) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(x_0 \cos t + y_0 \sin t, -x_0 \sin t + y_0 \cos t) \cos t dt.$$

Причем условием существования неподвижных точек  $\tilde{x} = x_0 = x^*, \tilde{y} = y_0 = y^*$  точечного отображения  $\tilde{T}$  является наличие решений  $(x^*, y^*)$  не зависящей от параметра  $\mu$  системы уравнений

$$x_0 - \xi y_0 + G_1(x_0, y_0) = 0, \quad \xi x_0 + y_0 - G_2(x_0, y_0) - A = 0.$$

В дальнейшем будем предполагать, что неподвижная точка отображения  $\tilde{T}$  существует и устойчива [3], [5], [11].

Для исследования вопроса о вырожденности – невырожденности построенной приближенной математической модели используем метод функций Ляпунова, распространенный на случай дискретных систем [12], [13, С. 36-49], [14, С.145-172].

В качестве функции Ляпунова выберем функцию



$$V(x_0, y_0) = x_0^2 + y_0^2 \quad (12)$$

Первая разность функции Ляпунова (12) в силу формул точечного отображения (10)-(11) имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta V(x_0, y_0) = V(\tilde{x}, \tilde{y}) - V(x_0, y_0) = & \mu\pi[(\mu\pi(1 + \xi^2) - 2)(x_0^2 + y_0^2) + \\ & + 2(\mu\pi - 1)(x_0 G_1(x_0, y_0) + y_0 G_2(x_0, y_0)) + 2\mu\pi\xi(x_0 G_2(x_0, y_0) - \\ & - y_0 G_1(x_0, y_0)) + \mu\pi(G_1^2(x_0, y_0) + G_2^2(x_0, y_0)) + \\ & + 2A((1 - \mu\pi)y_0 - \mu\pi\xi x_0) + A^2]. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, если

$$\lim_{x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty} \frac{G_1^2(x_0, y_0) + G_2^2(x_0, y_0)}{x_0^2 + y_0^2} = 0, \quad (14)$$

то определяющим членом (13) при  $x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty$  является  $\mu\pi(\mu\pi(1 + \xi^2) - 2)(x_0^2 + y_0^2)$ , и знак  $\Delta V(x_0, y_0)$  при  $x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty$  зависит от знака. Заметим, что  $\Delta V(x_0, y_0) < 0$  при  $x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty$ , если  $|\xi| < \sqrt{2/(\mu\pi) - 1}$ ,  $0 < \mu\pi < 2$ . То есть при больших значениях  $x_0^2 + y_0^2$  итерации отображения входят внутрь сечений функции Ляпунова  $V(x_0, y_0) = V_0$ , с которых начинают движение, и бесконечность неустойчива. Но  $\Delta V(x_0, y_0) > 0$ , если  $|\xi| > \sqrt{2/(\mu\pi) - 1}$ ,  $0 < \mu\pi < 2$  и всегда при  $\mu\pi > 2$ , т.е. в этом случае итерации точечного отображения переходят на внешние по отношению к начальному сечения  $V(x_0, y_0) = V_0$  причем  $V_0 \rightarrow \infty$  для этих сечений, и бесконечность устойчива даже в случае существования устойчивой неподвижной точки отображения. Таким образом, можно сделать вывод о том, что область  $|\xi| < \sqrt{2/(\mu\pi) - 1}$ ,  $0 < \mu\pi < 2$  пространства параметров является областью невырожденности приближенной модели в этом случае. Если же имеет место соотношение

$$\lim_{x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty} \frac{G_1^2(x_0, y_0) + G_2^2(x_0, y_0)}{x_0^2 + y_0^2} = +\infty, \quad (15)$$

то определяющим членом (13) при  $x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty$  является  $(\mu\pi)^2[G_1^2(x_0, y_0) + G_2^2(x_0, y_0)]$  и  $\Delta V(x_0, y_0) > 0$  при больших  $x_0^2 + y_0^2$  вне зависимости от величины параметров системы, что означает устойчивость бесконечности, и вырожденность приближенной модели.

### Примеры

1. Рассмотрим уравнение синхронизируемого синтезатора (8) с нелинейностью вида  $g(x, \dot{x}) = -(\pi/4)E_0 \operatorname{sgn}[\dot{x}]$  [3]. В этом случае

$$G_1(x_0, y_0) = E_0 x_0 / \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \quad G_2(x_0, y_0) = E_0 y_0 / \sqrt{x_0^2 + y_0^2},$$

то есть  $G_1^2(x_0, y_0) + G_2^2(x_0, y_0) = E_0^2$  и имеет место соотношение (14). Но это значит, что  $\Delta V(x_0, y_0) < 0$  при  $x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty$ , если  $|\xi| < \sqrt{2/(\mu\pi) - 1}$ ,  $0 < \mu\pi < 2$ , при больших значениях  $x_0^2 + y_0^2$  итерации отображения входят внутрь сечений функции Ляпунова  $V(x_0, y_0) = V_0$ , с которых начинают движение, и бесконечность неустойчива. А это означает невырожденность приближенной модели при  $|\xi| < \sqrt{2/(\mu\pi) - 1}$ ,  $0 < \mu\pi < 2$ .

Аналогичные выводы можно сделать относительно математической модели работы [5].

2. Рассмотрим уравнение (8) с нелинейностью вида кубической параболы  $g(x, \dot{x}) = -(4/3)\eta\dot{x}^3$  ( $\eta \neq 0$ ) [4]. В этом случае

$$G_1(x_0, y_0) = \eta x_0(x_0^2 + y_0^2), \quad G_2(x_0, y_0) = \eta y_0(x_0^2 + y_0^2),$$

то есть  $G_1^2(x_0, y_0) + G_2^2(x_0, y_0) = \eta^2(x_0^2 + y_0^2)^2$  и имеет место соотношение (15), что означает вырожденность математической модели.

Если

$$\lim_{x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty} \frac{G_1^2(x_0, y_0) + G_2^2(x_0, y_0)}{x_0^2 + y_0^2} = C > 0, \quad (16)$$

то для определения знака  $\Delta V(x_0, y_0)$  необходимо включить в рассмотрение все члены, не содержащие  $A$ , что требует дополнительного исследования в каждом конкретном случае. То же относится и к случаю, когда стоящий в левой части (14)-(16) предел не существует.

Рассмотрим два наиболее распространенных случая приближенных точечных отображений, построенных для систем вида (9) [3], [11], [17].

1. Одним из распространенных случаев является случай, когда  $G_1(x_0, y_0) = -x_0 G(x_0, y_0)$ ,  $G_2(x_0, y_0) = -y_0 G(x_0, y_0)$ , и точечное отображение (10)-(11) имеет вид

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_0 - \mu\pi [x_0(1 - G(x_0, y_0)) - \xi y_0], \\ \tilde{y} &= y_0 - \mu\pi [\xi x_0 + y_0(1 - G(x_0, y_0)) - A]. \end{aligned}$$

В этом случае  $\Delta V(x_0, y_0)$  (13) есть

$$\begin{aligned} \Delta V(x_0, y_0) &= V(\tilde{x}, \tilde{y}) - V(x_0, y_0) = \mu\pi \{-2(x_0^2 + y_0^2)(1 - G(x_0, y_0)) + \\ &+ 2Ay_0 + \mu\pi[(x_0^2 + y_0^2)(\xi^2 + (1 - G(x_0, y_0))^2 + A^2 - \\ &- 2A(\xi x_0 + y_0(1 - G(x_0, y_0))))]\}. \end{aligned}$$

Заметим, что неравенство  $\Delta V(x_0, y_0) < 0$  можно рассматривать как квадратное неравенство относительно  $z = z(x_0, y_0) = 1 - G(x_0, y_0)$ , а именно

$$\begin{aligned} \mu\pi(x_0^2 + y_0^2)z^2 - 2[x_0^2 + y_0^2 + \mu\pi Ay_0]z + 2Ay_0 + \mu\pi(A^2 - 2A\xi x_0 + \\ + \xi^2(x_0^2 + y_0^2)) < 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Для дискриминанта соответствующего квадратного уравнения имеем выражение

$$D/4 = (1 - (\mu\pi\xi)^2)(x_0^2 + y_0^2)^2 - (\mu\pi)^2(x_0^2 + y_0^2)(A^2 - 2A\xi x_0) + (\mu\pi A)^2 y_0^2 \quad (18)$$

В случае  $D > 0$  существуют решения  $z_1 < z_2$  соответствующего (17) квадратного уравнения, и  $\Delta V(x_0, y_0) < 0$ , как только

$$z_1(x_0, y_0) < z(x_0, y_0) < z_2(x_0, y_0). \quad (19)$$

Поскольку для решения вопроса о неустойчивости бесконечности необходимо и достаточно выполнения оценки вида (17) для всех значений  $x_0^2 + y_0^2 > \rho_0$ , это, в свою очередь, означает, что дискриминант (18) должен быть положительным (т.е. коэффициент перед определяющим членом  $(x_0^2 + y_0^2)^2$  в (18) должен быть больше нуля и  $|\xi| < 1/(\mu\pi)$ ). Заметим, что если обозначить через  $\rho = x_0^2 + y_0^2$ , то

$$D/4 \geq \rho[(1 - (\mu\pi\xi)^2)\rho - 2(\mu\pi)^2 A/\xi/\sqrt{\rho} - 2(\mu\pi A)^2] > 0$$

при любом значении

$$\rho = x_0^2 + y_0^2 > \rho_0 = (A/\xi/(\mu\pi))^2 + \mu\pi A\sqrt{2 - (\mu\pi\xi)^2}/(1 - (\mu\pi\xi)^2)$$

как только  $|\xi| < 1/(\mu\pi)$ . Т.е. при  $V(x_0, y_0) > \rho_0$  оценка вида (19) есть

$$\frac{1}{\mu\pi} + \frac{Ay_0}{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{\frac{1}{(\mu\pi)^2} - \xi^2 - \frac{A^2 - 2A\xi x_0}{x_0^2 + y_0^2} + \frac{A^2 y_0^2}{(x_0^2 + y_0^2)^2}} < z(x_0, y_0) < \\ < \frac{1}{\mu\pi} + \frac{Ay_0}{x_0^2 + y_0^2} + \sqrt{\frac{1}{(\mu\pi)^2} - \xi^2 - \frac{A^2 - 2A\xi x_0}{x_0^2 + y_0^2} + \frac{A^2 y_0^2}{(x_0^2 + y_0^2)^2}},$$

а значит, поскольку  $z(x_0, y_0) = 1 - G(x_0, y_0)$ , то

$$1 - \frac{1}{\mu\pi} - \frac{Ay_0}{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{\frac{1}{(\mu\pi)^2} - \xi^2 - \frac{A^2 - 2A\xi x_0}{x_0^2 + y_0^2} + \frac{A^2 y_0^2}{(x_0^2 + y_0^2)^2}} < G(x_0, y_0) < \\ < 1 - \frac{1}{\mu\pi} - \frac{Ay_0}{x_0^2 + y_0^2} + \sqrt{\frac{1}{(\mu\pi)^2} - \xi^2 - \frac{A^2 - 2A\xi x_0}{x_0^2 + y_0^2} + \frac{A^2 y_0^2}{(x_0^2 + y_0^2)^2}},$$

Или

$$1 - \frac{1}{\mu\pi} - \sqrt{\frac{1}{(\mu\pi)^2} - \xi^2} \leq \lim_{x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty} G(x_0, y_0) \leq \overline{\lim}_{x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty} G(x_0, y_0) \leq \\ \leq 1 - \frac{1}{\mu\pi} + \sqrt{\frac{1}{(\mu\pi)^2} - \xi^2}.$$

То есть функция  $G(x_0, y_0)$  должна быть предельно ограниченной. В этом случае приближенная модель является невырожденной. В противном случае она вырожденная.

Таким образом, уже по внешнему виду нелинейности можно сделать вывод об устойчивости либо неустойчивости бесконечности в приближенной модели. Так, в случае полиномиальной нелинейности бесконечность в приближенной модели будет устойчивой (т.е. модель может быть только условно невырожденной, если у нее может существовать устойчивое притягивающее множество в конечной части фазовой плоскости, причем область его притяжения всегда является ограниченной). Если же нелинейность является функцией ограниченной по  $x_0, y_0$  то область невырожденности модели является множество  $|\xi| < \min\{\sqrt{2/(\mu\pi)-1}, 1/(\mu\pi)\} = \sqrt{2/(\mu\pi)-1}$ ,  $0 < \mu\pi < 2$ , при этом в конечной части фазового пространства приближенной модели существует притягивающее множество, область притяжения которого является все фазовое пространство. При  $\xi^2 > 2/(\mu\pi)-1$  приближенная модель является вырожденной.

### Пример

Рассмотрим уравнение Ван-дер-Поля [3], т.е. уравнение вида (8) с нелинейностью  $g(x, \dot{x}) = -4x^2\dot{x}$ . Это уравнение относится к рассмотренному случаю с  $G(x_0, y_0) = x_0^2 + y_0^2$ . Таким образом, в случае уравнения Ван-дер-Поля бесконечность в приближенной модели является устойчивой, что означает вырожденность приближенной модели.

2. Вторым из наиболее распространенных случаев является случай, когда  $G_1(x_0, y_0) = -\eta y_0 G(x_0, y_0)$ ,  $G_2(x_0, y_0) = \eta x_0 G(x_0, y_0)$ , и точечное отображение (10)-(11) имеет вид

$$\tilde{x} = x_0 - \mu\pi [x_0 - y_0(\xi + \eta G(x_0, y_0))], \\ \tilde{y} = y_0 - \mu\pi [x_0(\xi + \eta G(x_0, y_0)) + y_0 - A].$$

В этом случае  $\Delta V(x_0, y_0)$  (13) есть

$$\Delta V(x_0, y_0) = V(\tilde{x}, \tilde{y}) - V(x_0, y_0) = \mu\pi \{-2(x_0^2 + y_0^2) + 2Ay_0 + \mu\pi[(x_0^2 + y_0^2) + \\ + (x_0^2 + y_0^2)(\xi + \eta G(x_0, y_0))^2 - 2Ax_0(x_0^2 + y_0^2)(\xi + \eta G(x_0, y_0)) + \\ + A^2 - 2Ay_0]\}.$$

Заметим, что неравенство  $\Delta V(x_0, y_0) < 0$  можно рассматривать как квадратное неравенство относительно  $z = z(x_0, y_0) = \xi + \eta G(x_0, y_0)$ , а именно

$$\mu\pi(x_0^2 + y_0^2)z^2 - 2\mu\pi Ax_0z + 2Ay_0 + \mu\pi(A^2 - 2Ay_0 + x_0^2 + y_0^2) - 2(x_0^2 + y_0^2) < 0 \quad (20)$$

Рассуждая, как в предыдущем случае, получим, что бесконечность в приближенной модели будет неустойчива только если  $0 < \mu\pi < 2$  и

$$-\frac{\xi}{|\eta|} - \frac{1}{|\eta|\sqrt{\frac{2}{\mu\pi}} - 1} \leq \lim_{x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty} G(x_0, y_0) \leq \overline{\lim}_{x_0^2 + y_0^2 \rightarrow +\infty} G(x_0, y_0) \leq \\ \leq -\frac{\xi}{|\eta|} + \frac{1}{|\eta|\sqrt{\frac{2}{\mu\pi}} - 1}.$$

То есть функция  $G(x_0, y_0)$  является предельно ограниченной. В этом случае приближенная модель является невырожденной. В противном случае она вырожденная.

### Пример

Рассмотрим уравнение Дуффинга [16], [17], т.е. уравнение вида (8) с нелинейностью  $g(x, \dot{x}) = -(4/3)\eta\dot{x}^3 (\eta \neq 0)$ . Это уравнение относится к рассмотренному случаю с  $G(x_0, y_0) = x_0^2 + y_0^2$ . Таким образом, в случае уравнения Дуффинга бесконечность в приближенной модели является устойчивой, что означает вырожденность приближенной модели.

Полученные результаты полностью подтверждаются результатами исследования поведения траекторий приближенных точечных отображений, построенных для систем вида (9) с различными нелинейностями в удаленных частях плоскости [16].

Существенное различие результатов качественного исследования, полученных асимптотическими методами и качественно-численного исследования исходных систем при одном и том же значении малого параметра, определяет необходимость развития численных и каких-либо качественных методов построения границ области применимости результатов приближенного исследования колебательных систем при заданном малом, но конечном  $\mu$  [2, С. 210-218], [17].

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Андронов А. А. Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
2. Неймарк Ю. И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. / Ю. И. Неймарк. – М.: Наука, 1972. – 472 с.
3. Антоновская О. Г. О влиянии насыщения нелинейности на результаты исследования принудительной синхронизации методом приближенных точечных отображений / О. Г. Антоновская // Математическое моделирование и оптимальное управление: Вестник ННГУ, Нижний Новгород. – 1999. – № 2(21). – С. 198–208.
4. Антоновская О. Г. Об одном случае исследования принудительной синхронизации методом приближенных точечных отображений / О. Г. Антоновская, М. Н. Зайцева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 8(74). – С. 7–14.
5. Антоновская О. Г. К исследованию квазигармонического осциллятора с нелинейностью, обладающей насыщением / О. Г. Антоновская, А. В. Бесклубная // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 2(92). – С. 10–18.
6. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 504 с.
7. Журавлев В. М. Построение огибающей и локальной частоты стохастического процесса на основе модели осциллятора с флуктуирующей частотой / В. М. Журавлев, П. П. Миронов, С. В. Летуновский // Изв. вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – №3(27). – С. 159–169.
8. Ахмерова Э. Ф. Асимптотика спектра гармонического осциллятора, возмущенного негладким потенциалом / Э. Ф. Ахмерова // Изв. вузов. Математика. – 2007. – № 11 (546), – С. 71–74.
9. Ивинская Е. Ю. Теоретические аспекты исследования неравновесных экономических систем на основе модели гармонического осциллятора / Е. Ю. Ивинская // Теория и практика общественного развития. Экономические науки. – № 21. – 2015. – С. 57–59.
10. Антоновская О. Г. Метод последовательных приближений в оценке близости приближенного и точного точечных отображений при учете неизохронности процессов в динамике систем ИФАПЧ / О. Г. Антоновская // Вестник ННГУ, Нижний Новгород. – 2013. – № 5(1). – С. 210–212.
11. Антоновская О. Г. Об изложении приложений метода точечных отображений в учебном процессе / О. Г. Антоновская, А. В. Бесклубная // Тенденции развития науки и образования. – 2019. – № 49. – Ч. 1. – С. 12–17.
12. Неймарк Ю. И. Метод точечных преобразований в теории нелинейных колебаний II / Ю. И. Неймарк // Изв. вузов: Радиофизика. – 1958. – Т. 1. – № 2. – С. 95–117.

13. Бромберг П. В. Устойчивость и автоколебания импульсных систем регулирования / П. В. Бромберг. – М.: Оборонгиз, 1953. – 224 с.
14. Кунцевич В. М. Нелинейные системы управления с частотно- и широтно-импульсной модуляцией. / В. М. Кунцевич, Ю. Н. Чеховой. – Киев: Техника, 1970. – 340 с.
15. Косякин А. А. Колебания в цифровых автоматических системах. / А. А. Косякин, Б. М. Шамриков. – М.: Наука, 1983. – 336 с.
16. Антоновская О. Г. К исследованию поведения траекторий точечных отображений плоскости в плоскость в удаленных частях фазовой плоскости / О. Г. Антоновская, В. И. Горюнов // Математическое моделирование и оптимальное управление: Вестник ННГУ, Нижний Новгород. – 2002. – № 1(25). – С. 68–75.
17. Антоновская О. Г. О достоверности результатов исследования принудительной синхронизации методом приближенных точечных отображений / О. Г. Антоновская // Математическое моделирование и оптимальное управление: Вестник ННГУ, Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2001. Вып.1(23). С.243-254.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Andronov A. A. Teoriya kolebaniy [Vibrations theory] / A. A. Andronov, A. A. Vitt, S. Yu. Haykin. – М.: Fizmatgiz, 1959. – 916 p. [in Russian]
2. Neymark Yu. I. Metod tochechnykh otobrazheniy v teriyi nelineynykh kolebaniy [Point mappings method in non-linear vibrations theory] / Yu. I. Neymark. – М.: Nauka, 1972. – 472 p. [in Russian]
3. Antonovskaya O. G. O vliyani nasysleniya nelineynosti na rezultaty issledovaniya prinuditelnoy sinkhronizatsii metodom priblizhennykh tochechnykh otobrazheniy [On the influence of nonlinearity saturation on the results of the forced synchronization received by means of approximate point mappings method] / O. G. Antonovskaya // Matematicheskoye modelirovaniye I optimalnoye upravleniye. Vestnik NNGU [Mathematical modeling and optimal control. NNGU bulletin], Nizhny Novgorod. – 1999. – № 2(21). – P. 198–208. [in Russian]
4. Antonovskaya O. G. Ob odnom sluchae issledovaniya prinuditelnoy sinkhronizatsii metodom priblizhennykh tochechnykh otobrazheniy [Investigation of forced synchronization by the method of approximate point mappings] / O. G. Antonovskaya, M. N. Zaytseva // International research journal – 2018. – № 8(74). – P. 7–14. [in Russian]
5. Antonovskaya O. G. K issledovaniyu kvazigarmonicheskogo oscillatora s nelineynost'yu, obladayushey nasysleniyem [On study of quasiharmonic oscillator with nonlinearity and saturation] / O. G. Antonovskaya, A. V. Besklunaya // International research journal – 2020. – № 2 (92). – P. 10–18. [in Russian]
6. Bogolyubov N. N. Asimptoticheskiye metody v teorii nelineynykh kolebaniy [Asymptotic methods in nonlinear vibrations theory] / N. N. Bogolyubov, A. Yu. Mitropolskiy – М.: Nauka, 1974. – 504 p. [in Russian]
7. Zhuravlev V. M. Postroyeniye ogibayushey b lokalnoy chastoty stohasticheskogo protsesssa na osnove modeli ossillyatora s fluktuiruyushey chastoty [The construction of envelope and local frequency of stochastic process on the base of oscillator with fluctuating frequency] / V. M. Zhuravlev, P. P. Mironov, S. V. Letunovskiy // Izv. Vuzov. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskiye nauki. [Higher educational proceedings of Povolzhsky region. Physical and mathematical sciences] – 2013. – № 3(27) – P. 159–169. [in Russian]
8. Akhmerova E. F. Asimptotika spektra garmonicheskogo oscillatora, vozmushennogo negladkim potentsialom [Asymptotic of spectrum of quasi-harmonic oscillator under perturbation of non-smooth potential] / E. F. Akhmerova // Izv. Vuzov. Matematika [Proceedings of higher institutions. Mathematics] – 2007. – № 11 (546), – P. 71-74. [in Russian]
9. Ivinskaya E. Yu. Teoreticheskiye aspekty issledovaniya neravnovesnykh ekonomicheskikh system na osnove modeli garmonicheskogo oscillyatora [Teoretical aspects of studying non-equilibrium economic systems based on the model of harmonic oscillator] / E. Yu. Ivinskaya // Teoriya I praktika obshchestvennogo razvitiya. Ekonomicheskiye nauki [Theory and practice of public development. Economic sciences] – 2015. – № 21 – P. 57–59. [in Russian]
10. Antonovskaya O. G. Metod posledovatel'nykh priblizheniy v otsenke blizosti priblizhennogo I tochnogo tochechnykh otobrazheniy pri uchete neizokhronnosti protsessov v dinamike sistemy IFAPCH [Successive approximation technique in proximity evaluation for exact and approximate point mappings, taking into account non-isochronism in pulsed phase-locked loop system dynamics] / O. G. Antonovskaya // Vestnik NNGU [NNGU bulletin], Nizhny Novgorod. – 2013. – № 5(1). – P. 210–212. [in Russian]
11. Antonovskaya O. G. Ob izlozhenii prilozheniy metoda tochechnykh otobrazheniy v uchebnoy protsesse [On giving in account of applications of point mappings method in teaching process] / O. G. Antonovskaya, A. V. Besklunaya // Tendentsii razvitiya nauki I obrazovaniya [Tendencies of science and education development] – 2019. – № 49. – Part 1. – P. 12–17. [in Russian]
12. Neymark Yu. I. Metod tochechnykh preobrazovaniy v teriyi nelineynykh kolebaniy II [Point mappings method in non-linear vibrations theory. II] / Yu. I. Neymark // Izv. Vuzov. Radiofizika. [Proceedings of higher institutions. Radio-physics] – 1958. – V. 1. – № 2. – P. 95-117. [in Russian]
13. Bromberg P. V. Ustoytchivost i avtokolebaniya impulsnykh system regulirovaniya [Stability and auto-vibrations of pulsed regulation systems] / P. V. Bromberg. – Moscow: Oborongiz, 1953. – 224 p. [in Russian]
14. Kuntsevich V. M. Nelineynye sistemy upravleniya s chastotno- I shirotno-impul'snoy modulyatsiyey / V. M. Kuntsevich, Yu. N. Chekhovoy – Kiev: Tekhnika, 1970. – 340 p.
15. Kosyakin A. A. Rjebaniya v tsifrovyykh avtomaticheskikh sistemakh [Vibrations in digital automatic systems] / A. A. Kosyakin, B. M. Shamrikov. – М.: Nauka, 1983. – 336 p. [in Russian]
16. Antonovskaya O. G. K issledovaniyu povedeniya traektoriy tochechnogo otobrazheniya ploskosti v ploskost v udalennykh tchast'ah ploskosti [On the investigation of trajectory behavior of plane point mapping in remote phase plane parts] / O. G. Antonovskaya, V. I. Goryunov // Matematicheskoye modelirovaniye I optimalnoye upravleniye. Vestnik NNGU [Mathematical modeling and optimal control. NNGU bulletin], Nizhny Novgorod. – 2002. – № 1(25). – P. 68–75. [in Russian]
17. Antonovskaya O. G. O dostovernosti rezultatov issledovaniya prinuditel'noy sinkhronizatsii metodom priblizhennykh tochechnykh otobrazheniy [On the reliability of the results of investigation of the forced synchronization received by means of approximate point mappings method] / O. G. Antonovskaya // Matematicheskoye modelirovaniye I optimalnoye upravleniye. Vestnik NNGU [Mathematical modeling and optimal control. NNGU bulletin], Nizhny Novgorod. – 2001. – № 1(23). – P. 243–254. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.003>**К ПРОБЛЕМЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОРЕОДИНАМИКИ СРЕД ПЕРЕМЕННОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ**

Научная статья

**Попов В.И.\***

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

\* Корреспондирующий автор (vilpopov[at]mail.ru)

**Аннотация**

Получены закономерности и проанализировано влияние переменной межмолекулярной ориентационной и внутримолекулярной релаксационной микроструктуры класса сред и их базовых течений соответственно на кинематические и динамические характеристики потока. Для среды с релаксационной внутренней микроструктурой выделен диапазон чисел  $De$  и  $We$ , в области которых диссипативные потоки не определяются только градиентом соответствующего потенциала переноса, как для среды с ориентационной микроструктурой, а являются решениями эволюционного уравнения для внутреннего параметра среды. Уравнение позволяет описать процесс релаксации термореединамических параметров к своим мгновенным и локально - равновесным величинам.

**Ключевые слова:** термореединамика, напряжения, релаксация, микроструктура, процессы переноса.

**ON NON-EQUILIBRIUM THERMORHEODYNAMICS OF THE MEDIA OF VARIABLE MICROSTRUCTURE**

Research article

**Popov V.I.\***

Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

\* Corresponding author (vilpopov[at]mail.ru)

**Abstract**

The current study obtains the regularities and analyzes and the influence of the variable of intermolecular orientation and intramolecular relaxation microstructures of the media class and their base flows on the kinematic and dynamic characteristics of the flow. For a medium with a relaxation internal microstructure, the study distinguishes a range of the numbers  $De$  and  $We$ , in the region of which the dissipative flows are not solely determined by the gradient of the corresponding streaming potential as for a medium with an orientational microstructure, they are solutions of the evolution equation for the internal parameter of the medium. The equation allows for a description of the process of relaxation of thermorheodynamic parameters to their instantaneous and local equilibrium values.

**Keywords:** thermorheodynamics, stress, relaxation, microstructure, streaming processes.

**Введение**

Из-за большого разнообразия микроструктурных сред и их течений, возникает необходимость обобщения концепции континуальной термодинамики на микроструктурные среды и неравновесные процессы в открытых системах вдали от термодинамического равновесия.

В отличие от линейной неравновесной термодинамики [1] проблема неравновесной термореединамики заключается в количественном изучении нелинейных неравновесных процессов переноса в средах с переменной микроструктурой, которые даже в малом пространственно-временном масштабе могут находиться вдали от состояния равновесия.

Решение проблемы следует искать в выработке основополагающих принципов, методов и подходов с позиций феноменологической и статистической термореединамики [1], [2], с привлечением реологических методов, которые охватывают почти все аспекты изучения деформации сред под действием приложенных напряжений [3], [5].

Важнейшая задача проблемы состоит в замыкании закона сохранения баланса импульса применительно к исследованию явлений переноса в процессах полимерной химической технологии (получения, переработки, модификации), энергетики, транспорта и т.п. системах.

Исследования важны не только для установления общих закономерностей процессов переноса, протекающих в различных условиях переработки и применения полимерных систем. Завершая на некотором временном этапе процесс, можно получать структурируемые материалы с прогнозируемыми физико-химическими свойствами. Время технологического процесса при этом должно быть меньше внутренних временных параметров получаемой, перерабатываемой полимерной системы.

Рассматриваемые в работе среды (растворы, расплавы естественных и синтетических полимеров и их смеси - топлива, сополимеры, нефти и т. п.) наделены сложной внутренней микроструктурой, вносящие в поток дополнительные напряжения, и вследствие этого имеют особые физико-механические (реологические) свойства.

Известно [3], [5], что даже в условиях базовых потоков, когда в тензоре скоростей деформаций присутствует лишь одна сдвиговая компонента, их механическое поведение определено измеряемыми в реометрических опытах нелинейно - вязкими и нелинейно - релаксационными свойствами.

Наряду с касательными напряжениями сдвига среды с эластичной микроструктурой проявляют в этих опытах первую и вторую разности нормальных компонент девиатора тензора напряжений, релаксирующих к состоянию равновесия немгновенно и нелокально. Это запаздывающее явление необходимо учитывать, например, при определении скоростей неравновесных процессов в зависимости от внешних условий, геометрии потока.

Для релаксационного класса сред и их систем при сдвиге преобладают внутримолекулярные искажения микроструктуры, то есть конформации с энтропийной релаксацией к состоянию равновесия малых кинетических сегментов (звеньев Куна, Рауза), связывающих между собой эластичные полимерные цепи [5], [6]. В связи с этим

исследование термореодинамики сред с эластичной микроструктурой должно включать релаксационную зависимость переменных, определяющих энтропийное состояние системы.

В связи со сложным характером микроструктурного взаимодействия, в рассматриваемых средах, следуя [6], целесообразно выделить две доминирующие микроструктуры, вполне отвечающие реологическому отклику среды на приложение силы. Нелинейно - вязкие свойства, то есть зависимость вязкости от скорости сдвига, связаны с ориентационной межмолекулярной структурой среды, а ее нелинейно - релаксационные свойства связаны с эластичной внутримолекулярной микроструктурой, проявляющееся в поле сдвиговых, энтропийных и диффузионных сил [6].

Процессы переноса в этих средах не могут быть описаны параболическими (мгновенными и локальными) уравнениями линейной неравновесной термодинамики [7], [8]. Проблема осложнена тем, что связанные между собой термодинамические параметры состояния подсистемы, в результате релаксационных явлений, с разной скоростью приходят в состояние локального равновесия. Поэтому перенос, например, импульса в средах с релаксационной микроструктурой не может быть определен только градиентом соответствующего термодинамического потенциала переноса.

Термодинамика неравновесных процессов достаточно хорошо разработана для простых моделей среды, когда справедливы линейные связи между потоками и сопряженными с ними термодинамическими силами [1], [9]. Феноменологические связи при этом носят локальный и мгновенный характер, а их коэффициенты зависят только от локальных параметров состояния системы.

Феноменологическая теория явлений переноса, основанная на принципах линейной неравновесной термодинамики, широко используется при исследовании процессов переноса в сплошных (бесструктурных) средах со свойствами вязкости, теплопроводности, диффузии вблизи их равновесия. Линейные реологические соотношения для переноса импульса, также тепла и массы, имеют характер мгновенного (без релаксационного временного запаздывания развития процесса) и локального отклика среды на внешние воздействия (вне зависимости состояния точки сплошной среды от релаксационного и тепломассообменного состояния точек ее ближайшего окружения). При исследовании неравновесных и необратимых (из-за производства энтропии) процессов переноса системы в целом предполагается, что связи между собой переменных состояния, подчиняются тем же соотношениям, что и для локально - равновесного состояния подсистемы. Допускается при этом, что переменные состояния неравновесной системы, в результате обмена между подсистемами энергией, импульсом, веществом, зависят от пространственных координат и времени.

Аналогичный локально - равновесный принцип феноменологического подхода используется при изучении процессов переноса нелинейно-вязких сред с ориентационной микроструктурой. Для этих сред характерна жесткая межмолекулярная ориентационная микроструктура, которая формируется сдвиговыми деформациями системы. При исследовании процессов переноса пользуются различными опытными аппроксимациями, реологические соотношения которых позволяют учитывать зависимость вязкости от скорости сдвига, температуры и т. п. параметров возмущения системы [5], [10].

Основная цель работы состоит в том, чтобы с позиций неравновесной термореодинамики для доминирующего класса реологических сред с межмолекулярной ориентационной и внутримолекулярной релаксационной микроструктурой проанализировать их характерное кинематическое и динамическое поведение как базовый принцип для количественного исследования потоков в других практически важных условиях их неравновесного деформирования.

### **Система уравнений для исследования неравновесных процессов переноса в средах с переменной микроструктурой**

Система уравнений для макроскопического описания открытых систем вдали от равновесия включает: уравнение баланса для малого объема несжимаемой среды, полученного на основе закона сохранения импульса; уравнения баланса для неравновесной энтропии состояния системы; определяющего уравнения для потока импульса и уравнения движения внутреннего макроструктурного параметра.

Уравнение несжимаемости среды и уравнение количества движения с плотностью  $\rho$  в декартовых координатах имеют обычный [1], [3] вид:

$$\partial v_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\rho (\partial v_i / \partial t + v_j \partial v_i / \partial x_j) = \partial P_{ij} / \partial x_j \quad (2)$$

Величины  $P_{ij}$  являются компонентами тензора давлений (напряжений). Тензор полных механических напряжений, на основе принципа его разложения по физическим процессам применительно к исследованию среды с ориентационной и релаксационной микроструктурой, представлен в [11], [12] и имеет вид:

$$P_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\gamma}_{ij})\dot{\gamma}_{ij} + \varepsilon(\langle x_i x_j \rangle - \delta_{ij}) \quad (3)$$

Первый член уравнения (3) представляет собой скалярное давление, а второй связан с поверхностными силами, то есть с изменением ориентационной формы деформируемой системы. Третий член — это избыточное напряжение, обусловленное отклонением внутреннего параметра среды  $\langle x_i x_j \rangle$  от равновесного состояния  $\delta_{ij}$ . Эта часть уравнения

учитывает релаксационные процессы в деформируемой системе, обусловленные установлением равновесного состояния сегментов в эластичных цепях между узлами пространственной сеточной модели [11], [12].

В уравнении (3) величина  $\varepsilon = 2\mu/\alpha$  – энтропийный модуль эластичности;  $\alpha = \zeta S_1 b^2 / 12kT$  – время релаксации, время структурных перестроек кинетических единиц в цепях сеточной модели на масштабе  $\sim S_1 b^2$  к равновесному состоянию. Предполагается, что кинетические сегменты цепи с малым масштабом длины  $b$  в количестве  $S_1$ , оказывают в цепи такое же сопротивление движению, как и соответствующий сеточный узел диаметра  $d$ , являющейся концентратором напряжения, то есть сопротивление Стокса  $\zeta = 6\pi\mu d$ . Недеформируемая часть эластичной цепи  $b$  это сегмент Куна [6]. Эффективная вязкость среды  $\mu$ , время релаксации  $\alpha$ , общем случае зависят от чисто сдвиговой скорости деформации [3], [5], [6].

Величина  $p$  в уравнении (3) это часть тензора давления, которое остается после вычета из него тензоров напряжений с вязкими ( $\mu$ ) и релаксационными ( $\alpha$ ) свойствами системы. Из дальнейшего видно, что для сред с релаксационной внутренней микроструктурой, оно не является независимым гидростатическим давлением, то есть функцией переменных равновесного состояния системы.

Таким образом, дополнительная диссипация энергии в системе происходит в результате релаксационного запаздывания кинетических сегментов цепей, то есть эффективных узлов пространственной эластичной полимерной сетки, как концентраторов напряжений, от их среднего движения [11], [12].

Уравнение (3) записано на основе расширенного фундаментального уравнения баланса Гиббса для локальной энтропии -  $s$  элемента открытой системы [1], которое является следствием первого и второго законов термодинамики. В отличие от аналогичного расширения по диссипативным потокам (использование “быстрых” переменных с относительно высокой скоростью стремления к локально-равновесному состоянию системы [7], [8]), в данной работе расширение локальной энтропии состояния элемента среды выполнено с учетом влияния внутреннего релаксационного параметра для производства неравновесной энтропии в виде:

$$Td_t s = d_t \varepsilon_1 + p d_t v - x d_t \langle x_i x_j \rangle \quad (4)$$

$$\text{В соотношении (4) величина } x = \left[ \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \langle x_i x_j \rangle} \right]_{S,p} = -T \left( \frac{\partial S}{\partial \langle x_i x_j \rangle} \right)_{\varepsilon_1, p} - \text{сродство релаксационного процесса}$$

изменения внутренней энергии  $\varepsilon_1$  вследствие деформации моментов функции распределения. Сродство представляет собой количественную меру, сопряженную с внешними параметрами неравновесной части диссипируемой энергии системы, которая дополнительно затрачивается на перестройку релаксационной молекулярной микроструктуры. Величины  $T, p, x$  являются функциями ( $\langle x_i x_j \rangle - \delta_{ij}$ ), а также объема  $v = 1/\rho$ . Величина  $\rho$  – плотность среды. В равновесии  $\langle x_i x_j \rangle$ ,  $T$ ,  $p$  принимают свое равновесное значение, а величина  $x = 0$ .

Термодинамическая сила  $x$  может быть разложена в ряд по  $\dot{v}_{ij}$ , так что отклонению внутреннего тензорного параметра второго ранга от состояния равновесия, размерность термодинамической силы соответствует. Следует отметить, что перенос импульса возникает в неравновесных состояниях статистической системы, когда ее функция распределения даже незначительно отличается от равновесной.

Применительно к исследованию неравновесных процессов переноса импульса традиционная процедура анализа производства энтропии [1], [9] на основе уравнения (3), закона сохранения импульса приводит к соотношению для неравновесной формы ее интенсивности:

$$\sigma_s = -T^{-1} P_{ij} \dot{v}_{ij} - T^{-1} x d_t \langle x_i x_j \rangle \quad (5)$$

Из соотношения (5) видно, что производство энтропии дополнительно порождено процессом релаксации. При этом ее производство определяется не только диссипацией механической энергии, но и эволюцией (релаксацией) ее макроструктуры к состоянию равновесия. Производство энтропии в микроструктурируемой системе, как источник необратимости процесса переноса, зависит от произведений термодинамических потоков процесса переноса  $T^{-1} P_{ij}$ ,

$T^{-1} d_t \langle x_i x_j \rangle$  на сопряженные с ними термодинамические силы  $\dot{v}_{ij}$ ,  $x$ . Величина  $T$  – температура. Даже в стационарных процессах в малом элементе системы, имеет место локально – неравновесное деформирование, обусловленное наложением энтропийных сил, имеющих тепловую природу, на сдвиговые возмущения.

В связи с тем, что  $x = f(\langle x_i x_j \rangle - \delta_{ij})$  представляет собой набор независимых переменных, характеризующих отклонение системы от равновесного состояния, имеем следующие функциональные связи, определяющие перенос импульса в средах с неравновесной микроструктурой.



$$P_{ij} = f_1(\dot{v}_{ij}, <x_i x_j>); d_t <x_i x_j> = f_2(\dot{v}_{ij}, <x_i x_j>) \quad (6)$$

Соотношения (6) совместно с законом сохранения импульса, с точностью до определяемых функций, устанавливают для неравновесного процесса переноса импульса параметры квазиизотермического состояния среды. Конкретный вид функций может быть установлен лишь в рамках структурно-кинетического подхода [11], [12].

Уравнение движения для плотности вероятности внутреннего параметра  $<x_i x_j> = \int_{-\infty}^{\infty} x_i x_j W(\bar{x}, \bar{v}_i, t) d^3 \bar{v}_i$  с эволюционирующей микроструктурой с тепловой скоростью  $\bar{v}_i$  находится из условия сохранения малых фазовых объемов с переменной конфигурацией во времени [13].

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W \bar{V}_i) = 0 \quad (7)$$

Уравнение непрерывности (7) устанавливает вероятность событий, что каждый узел в фазовом пространстве модели занимает определенное положение с конкретным значением скорости  $\bar{V}_i$ .

Величина  $<x_i x_j>$  это статистический внутренний макропараметр среды, связывающий измеряемые в опытах термодинамические параметры среды с ее неравновесным релаксационным микросостоянием.

Усреднение в элементарном объеме выполняется по всем возможным микросостояниям структурно-кинетических сегментов с использованием представления идентичных систем статистического ансамбля и функции распределения их плотности вероятности в фазовом пространстве координат и импульсов. Он представляет собой интеграл от функции распределения плотности вероятности  $W(\bar{x}, \bar{v}_i, t)$  структурно-кинетических элементов (сегментов) цепей, диадного  $x_i x_j$  масштаба их пробужденных событий в фазовом пространстве координат и импульсов с тепловой (флуктуационной) скоростью  $\bar{v}_i$ . Тепловая скорость структурно-кинетических элементов субцепей принимается относительно центра масс узлов их ближайшего окружения [11], [12].

Мгновенная скорость представительного узла относительно системы координат, начало которых помещено в центр масс аналогичных узлов его ближайшего окружения, находится из условия безынерционного баланса механических, энтропийных (эластичных) и диффузионных сил, действующих на узел:

$$\bar{V}_i = x_j \dot{v}_{ij} - x_i / \zeta \bar{a} - kT / \zeta \partial(\ln W) / \partial x_i \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) непосредственно находим уравнение для функции распределения плотности вероятности в виде:

$$\partial W / \partial t + x_j \dot{v}_{ij} \partial W / \partial x_j = \bar{a}^{-1} [\Delta W + \nabla(\bar{x} W)] \quad (9)$$

В соотношении (9) координаты  $x_{i,j}$  отнесены к соответствующей величине, получаемой из условия равновесного состояния и нормировки  $W$  на единицу. В соотношении (8)  $x_j \dot{v}_{ij}$  - скорость узла относительно центра масс узлов его ближайшего окружения [11]. Сопутствующая система координат помещена в центр масс.

Умножая (9)  $x_{i,j}$  и интегрируя по переменным (координат и скоростей), находим уравнение для моментов функции распределения для плотности вероятности в виде [11]:

$$De d <x_i x_j> / d \bar{t} = We [ <x_i x_k> \dot{v}_{kj}^* + <x_j x_k> \dot{v}_{ki}^* ] - 2(<x_i x_j> - \delta_{ij}) \quad (10)$$

Уравнение (10) записано для релаксационного процесса ( $De = \bar{a} / t_*$  число Дебори,  $We = G \bar{a}$  число Вейссенберга) приведения ансамблей  $<x_i x_j>$  микрочастиц (узлов сеточной модели) в новое состояние статистического равновесия, соответствующее возмущению системы.

Приближение внутреннего макропараметра к равновесному состоянию  $\langle x_i x_j \rangle \rightarrow \delta_{ij}$  определяет характер немгновенного и нелокального неравновесного процесса переноса и соответствующие макроскопические потоки. В уравнении (10) важным является не само абсолютное значение внутреннего макропараметра, а мера его отклонения от равновесного значения  $\delta_{ij}$ , которое для краткости обозначения имеет вид  $<x_i x_j>$ .

### Кинематические и динамические характеристики движения класса нелинейно - вязких сред с ориентационной микроструктурой

Неравновесные процессы переноса класса сред (с жесткой, не эластичной микроструктурой) могут быть рассмотрены достаточно просто в рамках феноменологического локально - равновесного приближения. Структурные изменения в малом элементе объема (подсистемы) успевают следовать за внешними изменениями. Равновесное состояние в малом элементе объема среды успевает устанавливаться в процессе движения. Для расчета изменения энтропии элемента объема можно воспользоваться соотношением (4) без учета его релаксационного члена.

Неравновесные процессы переноса в этом случае рассчитываются как последовательная смена равновесных параметров состояния подсистем в пространстве и времени: скоростью, изотропным давлением, плотностью, температурой [1], [9].

Анализ опытных данных (ротационные, капиллярные вискозиметры, конус – плоскость [5]) показывает, что для термореодинамического анализа таких систем вязкость является более сложной (гиперболической) функцией состояния, чем обратная ей величина текучесть. В связи с этим уравнение движения (2) удобно замыкать соотношением (3) с учетом лишь физической нелинейности, то есть зависимостью эффективной текучести  $\phi = \mu^{-1}$  от сдвиговой компоненты тензора напряжения.

Для одномерного потока по направлению X, в случае ламинарного стабилизированного стационарного и изотермического течения в круглой трубе радиуса – R, уравнение движения в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$r^{-1} \partial (r\tau_{rx}) / \partial r = \partial P / \partial x \quad (11)$$

Интегрируя (11) в пределах  $0 \leq r \leq R$ , имеем для касательных напряжений в любой точки потока и соответственно на стенке трубы соотношения:

$$\tau_{rx} = 0.5 r \partial P / \partial x ; \tau_{ct} = 0.5 R \partial P / \partial x ; \tau_{rx} / \tau_{ct} = r/R = \xi \quad (12)$$

Уравнение движения для  $\tau_{rx}$  является общим уравнением и не зависит от ее реологических свойств.

Обратная величина вязкости текучесть имеет очень удобную для построения модели и дальнейших расчетов линейную зависимость [10]. Поэтому нелинейно-вязкие (реологические) свойства рассматриваемых сред, при их термореодинамическом анализе, например, в трубе, можно представить в виде:

$$\frac{dV}{dr} = (\phi_0 + \theta \tau_{xr}) \tau_{rx} \quad (13)$$

В уравнении (13)  $\phi_0$  - нулевая текучесть, получаемая экстраполяцией в область  $\tau_{xr} \rightarrow 0$  (следует заметить физическую оправданность такой процедуры, так как на оси трубы  $\tau_{xr} = 0$ );  $\theta$  – реологический коэффициент, величина которого характеризует нелинейно-вязкие (ориентационные) свойства системы;  $V_x$  - скорость в направлении оси трубы. В неизотермическом случае течения нелинейно - вязких сред величины  $\theta$  и  $\phi_0$  являются функциями от температуры.

Из соотношений (12) и (13), граничного условия  $V_x = 0$  при  $\xi = 1$ , имеем выражение для профиля скорости потока в трубе:

$$V_x = -R \int_0^1 (\phi_0 + \theta \tau_{ct} \xi) \tau_{ct} \xi d\xi = 0.5 R \phi_0 \tau_{ct} \left[ 1 - \xi^2 + \frac{2}{3} \frac{\theta \tau_{ct}}{\phi_0} (1 - \xi^3) \right] \quad (14)$$

При этом средняя по сечению трубы скорость потока равна:

$$\bar{W} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2 \pi r V_x dr = 0.25 R \phi_0 \tau_{ct} \left( 1 + 0.8 \frac{\theta \tau_{ct}}{\phi_0} \right) \quad (15)$$

В соответствии с (14) и (15) безразмерный профиль скорости имеет вид:

$$\omega = 2 \left( 1 - \xi^2 + \frac{2}{3} \frac{\theta \tau_{ct}}{\phi_0} (1 - \xi^3) \right) \left( 1 + 0.8 \frac{\theta \tau_{ct}}{\phi_0} \right)^{-1} \quad (16)$$

На рис.1 в соответствии с (16) представлен безразмерный профиль скорости ( $\omega = V_x / \bar{W}$ ) течения нелинейно-вязкой жидкости в круглой трубе.

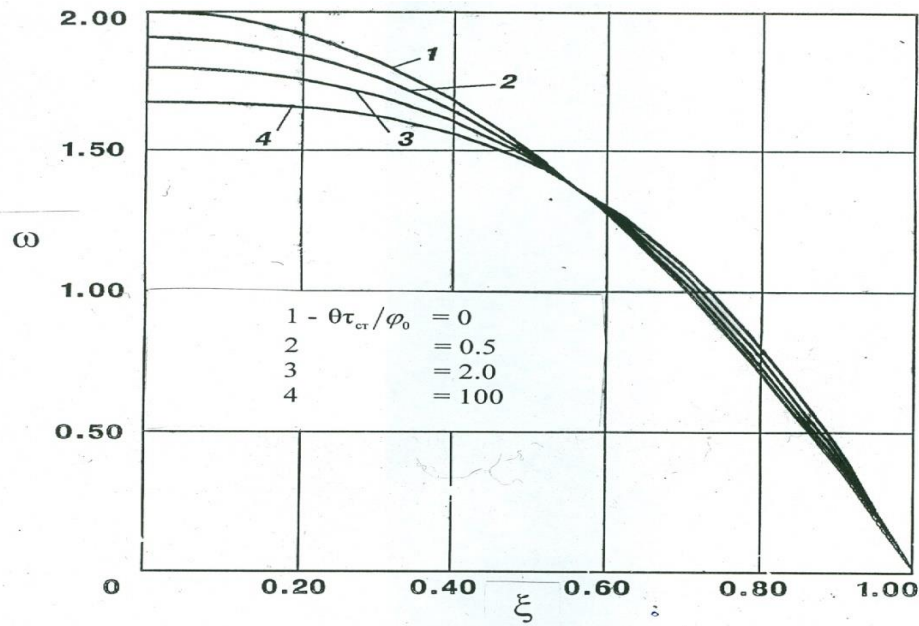


Рис. 1 – Профили скоростей нелинейно-вязкой жидкости в круглой трубе

для различных значений реодинамического параметра  $\frac{\theta\tau_{\text{ст}}}{\phi_0}$

Случай  $\frac{\theta\tau_{\text{ст}}}{\phi_0} = 0$  соответствует течению бесструктурной (ньютоновской) жидкости. Следует обратить внимание на

наличие полюсов в семействе профилей скорости для координаты  $\xi = 0.55$ , в области которой равновесная скорость практически не зависит от параметра  $\frac{\theta\tau_{\text{ст}}}{\phi_0}$ . В остальных случаях имеет место однопараметрическое семейство

профилей, скорости которых зависят от ориентационных свойств и динамических характеристик потока, то есть напряжения сдвига на стенке канала (граничных условий).

Определяя коэффициент сопротивления потока в трубе обычным образом  $C_f = \frac{8\tau_{\text{ст}}}{\rho\bar{W}^2}$ , имеем:

$$C_f \text{Re}_0 = \frac{5\text{Re}_0}{\beta_0} \left\{ \left[ 1 + \frac{128\beta_0}{5\text{Re}_0} \right]^{0.5} - 1 \right\} \quad (17)$$

Здесь  $\beta_0 = \frac{\theta}{\phi_0} \rho \bar{W}^2$ ,  $\text{Re}_0 = \bar{W} d \phi_0 \rho$  - число Рейнольдса потока среды плотности  $\rho$  в трубе диаметра  $d$ ;  $\frac{\beta_0}{\text{Re}_0}$  -

время ориентации микроструктуры.

На рис.2 представлена зависимость реодинамического сопротивления потока в круглой трубе от нелинейно-вязких свойств среды.

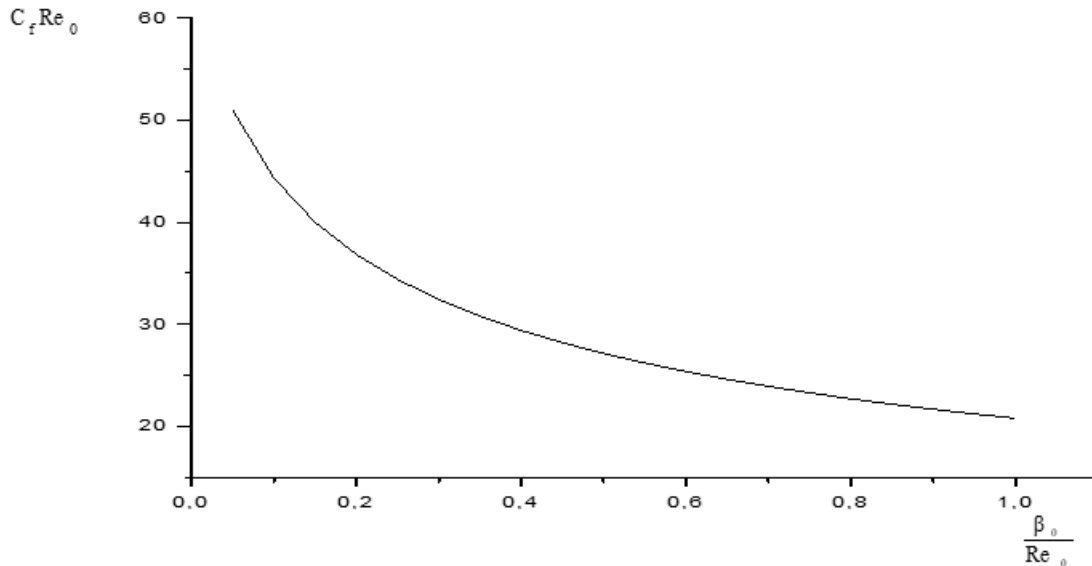


Рис. 2 – Влияние нелинейно-вязких  $\frac{\beta_0}{Re_0}$  (ориентационных) свойств потока на реодинамическое сопротивление  $C_f Re_0$  в круглой трубе

Видно, что с ростом числа  $\frac{\beta_0}{Re_0}$  реодинамическое сопротивление потока снижается. Следует отметить, что выделенные реологические параметры системы относительно легко измеряются и их можно использовать как диагностические показатели.

В данное время считается общепринятым, что снижение сопротивления нелинейно-вязких сред с жесткой микроструктурой при их течении в трубах и каналах вызвано ориентационными явлениями структуры среды по потоку.

#### Динамические характеристики переноса импульса класса сред с релаксационной микроструктурой

Характерной особенностью описания движения сред с релаксационной микроструктурой является наличие в полной системе уравнений движения внутреннего релаксационного параметра, определяющего пространственно – временное отклонение системы от термодинамического равновесия и оказывающего даже в малом объеме среды немгновенное и нелокальное (запаздывающее) влияние на термореодинамические процессы переноса.

В связи с этим, отмеченные выше принципы линейной и нелинейной неравновесной термодинамики, для исследования сред с релаксационной микроструктурой неприменимы. Равновесная энтропия состояния элементарного объема подсистемы должна быть расширена [8] на случай учета влияния внутреннего релаксационного параметра для производства статистически неравновесной энтропии (4).

С целью получения обозримых аналитических результатов ниже проведены исследования динамических характеристик релаксационных систем широкого класса реометрических движений. Для определения возникающих напряжений, как основу реологической модели среды, обычно полагают, что сдвиговое течение по X начинается в момент времени  $t=0$  заданным постоянным градиентом скорости  $\dot{\gamma}_{12} = G$  (течение Куэтта), а все компоненты тензора градиентов сдвиговой скорости равны нулю.

Из системы уравнений (2) и (3), когда  $2\mu(\dot{\gamma}_{ij}) \dot{\gamma}_{ij} \ll \varepsilon(\langle x_i x_j \rangle - \delta_{ij})$ , то есть в предположении о том, что система по термореодинамическим параметрам приходит в состояние равновесия быстрее, чем статистическим параметрам, имеем:

$$\partial P_{ij} / \partial x_j = 0, P_{ij} = -p \delta_{ij} + \varepsilon (\langle x_i x_j \rangle - \delta_{ij}) \quad (18)$$

Для мгновенного возмущения среды в момент  $t=0$ , заданным одним постоянным градиентом скорости  $G$ , из уравнения (10) имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} d \langle x_1^2 \rangle / dt + 2\alpha^{-1} [\langle x_1^2 \rangle - 1] &= 2G \langle x_1 x_2 \rangle; \\ d \langle x_1 x_2 \rangle / dt + 2\alpha^{-1} [\langle x_1 x_2 \rangle - 1] &= G \langle x_2^2 \rangle; \\ d \langle x_2^2 \rangle / dt + 2\alpha^{-1} [\langle x_2^2 \rangle - 1] &= 0; \\ d \langle x_3^2 \rangle / dt + 2\alpha^{-1} [\langle x_3^2 \rangle - 1] &= 0; \\ d \langle x_1 x_3 \rangle / dt + 2\alpha^{-1} [\langle x_1 x_3 \rangle - 1] &= G \langle x_2 x_3 \rangle; \\ d \langle x_2 x_3 \rangle / dt + 2\alpha^{-1} [\langle x_2 x_3 \rangle - 1] &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Из системы неоднородных уравнений (19), находим соответствующие моменты  $\langle x_i x_j \rangle$ , начальным условием которых являются:

$$\langle x_1^2 \rangle = \langle x_2^2 \rangle = \langle x_3^2 \rangle = 1; \quad \langle x_3 x_1 \rangle = \langle x_1 x_2 \rangle = \langle x_2 x_3 \rangle = 0.$$

Последовательное решение системы (19) приводит к следующим выражениям для ненулевых моментов:

$$\langle x_2^2 \rangle = \langle x_3^2 \rangle = 1;$$

$$\begin{aligned} \langle x_1 x_2 \rangle &= 0.5 G \alpha (1 - \exp(-2\alpha^{-1}t)) \\ \langle x_1^2 \rangle &= 1 + 0.5 G^2 \alpha^2 [1 - \exp(-2\alpha^{-1}t) - 2\alpha^{-1}t \exp(-2\alpha^{-1}t)] \end{aligned} \quad (20)$$

Уравнения (20) отражают конформационные структурные изменения релаксационной полимерной системы в процессе деформирования. Градиент скорости деформирует диагональную компоненту  $\langle x_1 x_2 \rangle$  тензора моментов и эластично растягивает компоненту относительно начальных значений  $\langle x_1^2 \rangle = 1$ .

В соответствии с (20), при  $t \rightarrow \infty$ , имеем:

$$\langle \tilde{x} \rangle = \frac{\langle x_1^2 \rangle - \langle x_2^2 \rangle}{\langle x_1 x_2 \rangle} = G \alpha \quad (21)$$

$\langle \tilde{x} \rangle$  - тензорный параметр, характеризующий изменение структурных компонент деформируемой системы в результате релаксационных явлений. Из определяющего уравнения (18), в соответствии с (20), находим соотношения для компонент тензора напряжений, характеризующие реодинамические характеристики потока:

$$\begin{aligned} \tau_{12} &= \frac{\varepsilon G \alpha}{2} (1 - \exp(-2\alpha^{-1}t)), \text{ где } 0.5 \varepsilon \alpha = \mu \\ P_{11} - P_{22} &= \frac{\varepsilon G^2 \alpha^2}{2} [1 - \exp(-2\alpha^{-1}t) - 2\alpha^{-1}t \exp(-2\alpha^{-1}t)]. \end{aligned} \quad (22)$$

На рис.3 представлен характер изменения сдвигового компонента импульса ( $\tilde{\tau} \equiv 2\tau_{12} / \varepsilon$ ), а на рис.4 характер изменения первой разности нормальных компонент ( $\tilde{P} \equiv 2(P_{11} - P_{22}) / \varepsilon$ ) девиатора тензора напряжений отклонения системы от равновесного состояния, вызванного импульсным градиентом скорости сдвига  $G$ . Видно, что сдвиговый  $\tilde{\tau}$  и разностный  $\tilde{P}$  отклик напряженного состояния системы на немгновенный и нелокальный перенос импульса имеет различный характер. Следует отметить важную особенность полученного результата: реологически измеряемая первая (соотношение (22)) и вторая ( $P_{22} - P_{33}$ ) разности нормальных напряжений не зависят от термодинамически неопределенной величины давления  $P$ . Следует также отметить, что  $(P_{11} - P_{22}) \gg (P_{22} - P_{33})$  [3], [14].

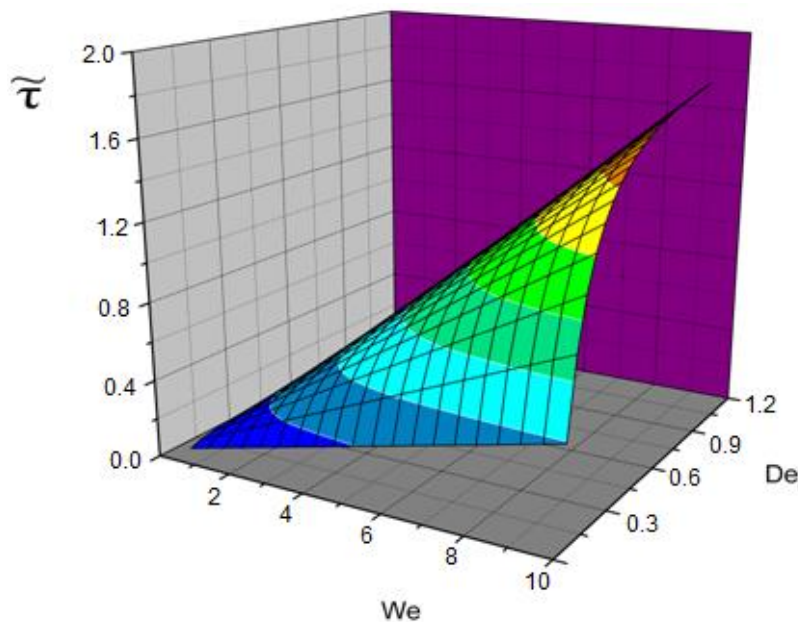


Рис. 3 – Влияние  $De$  и  $We$  на величину и характер изменения сдвиговой компоненты девиатора тензора напряжений

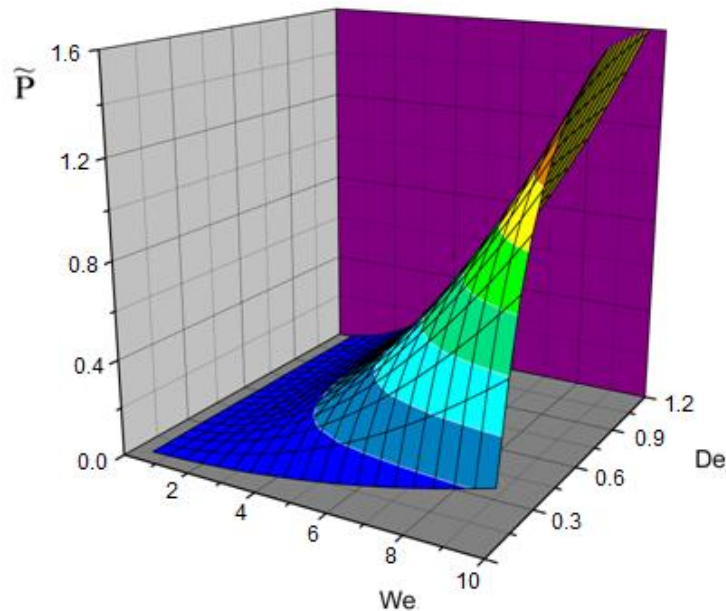


Рис. 4 – Влияние  $De$  и  $We$  на величину и характер изменения первой разности нормальных компонент девиатора тензора напряжений

На рис.3 видно, что немгновенный и нелокальный (запаздывающий) отклик среды с релаксационной микроструктурой на сдвиговые возмущения имеет монотонный характер и существенен при числах  $We > 3$ .

В отличие  $\tilde{\tau}$ , в той же области определяющих процесс параметров, на рис. 4 имеем более сложный, характер изменения  $\tilde{P}$ , из которого также следует, что областью мгновенного и локального отклика среды на сдвиговые возмущения является область  $We < 3$ . В этой области деформирования сред с релаксационной микроструктурой можно пользоваться приближением, приведенным для сред с ориентационной микроструктурой. Этот результат представляет интерес для исследования сред с релаксационной микроструктурой в конкретном диапазоне изменения технологических параметров процесса.

В области чисел  $We > 3$  в процессе деформирования уже имеет место нелокальный и немгновенный переход малого элемента среды к новому равновесному состоянию. Нельзя в этом случае при деформировании среды совершить однородный сдвиг, не прикладывая дополнительных поперечных усилий основному потоку. Этот вывод соответствует реометрическим измерениям и связан с действием разностей нормальных напряжений компонентов девиатора тензора напряжений.

Таким образом, непосредственное использование основных принципов неравновесной термодинамики, из-за релаксационной неравновесности энтропии состояния малого масштаба системы (4), оказывается проблематичным. Особенно это отражается в ускоряющихся потоках [15] (внешнее обтекание поверхностей, участки стабилизации в формирующих каналах и т.п.), а также в каналах сложной геометрии, в которых реодинамические свойства среды с релаксационной микроструктурой проявляются по-разному в зависимости от свойств и геометрии потока [3], [16].

Представленные данные на рис.3 и рис.4 характеризуют роль чисел  $We$  и  $De$ , то есть соответственно пространственно - временных масштабов потока в неравновесном процессе переноса импульса.

Из уравнения (10) видно, что быстропротекающие и микромасштабные процессы переноса должны сопровождаться отклонением полимерной системы от равновесного состояния ( $\langle x_i x_j \rangle - \delta_{ij}$ ). Такие процессы переноса нелокальны как в пространстве, так и во времени. Поэтому они не могут быть адекватно описаны классическими (мгновенными и локальными) параболическими уравнениями линейной неравновесной термодинамикой.

Управляя величинами  $De$ ,  $We$ , можно интенсифицировать неравновесные компоненты  $\tilde{\tau}$  и  $\tilde{P}$  тензора переноса импульса, а их соотношением формировать структурно-релаксационные масштабы  $\langle \tilde{X} \rangle$  полимерных систем. Неравновесные состояния существенно проявляются при  $De \sim 1$ . При этом  $\tilde{\tau}$ ,  $\tilde{P}$ ,  $\langle \tilde{X} \rangle$  от числа  $De$  зависят нелинейно. Зависимость  $\tilde{\tau}$ ,  $\langle \tilde{X} \rangle$  от  $We$  – линейная; зависимость  $\tilde{P}$  от  $We$  – нелинейная.

Из анализа системы уравнений (22) следует, что при прочих равных условиях с изменением  $G$  касательные напряжение релаксирует в равновесное состояние интенсивнее первой разности нормальных напряжений. Время релаксации зависит от уровня  $G$ , с которого началась релаксация. Чем больше  $G$ , тем меньше время релаксации. Для данного мгновенного возмущения  $G$  напряженное состояние  $\tau_{12}$  вначале превышает по величине  $P_{11} - P_{22}$ , затем они выравниваются. В дальнейшем  $\tau_{12}$  становится значительно меньше  $P_{11} - P_{22}$ .

При  $t \rightarrow \infty$  из (20), то есть для установившегося течения, имеем:

$$\langle x_i x_j \rangle = \begin{vmatrix} 1 + 0.5G^2 \alpha^2 & G\alpha & 0 \\ G\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (23)$$

Из определяющего уравнения (18), в соответствии с (23), находим соотношения для компонент девиатора тензора напряжений:

$$P_{ij} = \begin{vmatrix} -P + 0.5\varepsilon G^2 \alpha^2 & \varepsilon G \alpha & 0 \\ \varepsilon G \alpha & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{vmatrix} \quad (24)$$

В соответствии с элементарной теорией напряженного состояния в малом дифференциальном объеме сред в условиях простого сдвига из (23) и (24), находим:

$$\frac{\langle x_1^2 \rangle - \langle x_2^2 \rangle}{\langle x_1 x_2 \rangle} = \frac{P_{11} - P_{22}}{\tau_{12}} = G \alpha = 2 \operatorname{ctg} 2\psi \quad (25)$$

Из соотношения (25) следует, что в условиях стационарного однородного сдвига напряженное состояние дифференциального объема среды с неравновесной микроструктурой характеризуется измеряемым комплексом  $(P_{11} - P_{22}) / \tau_{12} = G \alpha$ .

Зависимость между первой разностью нормальных напряжений и сдвиговым напряжением определяется конформационными изменениями в структуре полимерной среды. В установившихся потоках имеет место поляризационный характер процесса переноса импульса в средах с неравновесной микроструктурой. Соотношение (25) удобно для опытного исследования динамической структуры полимерной среды или, например, распределения, рассеяния в потоке полимерной жидкости красителей, смесевых наполнителей, наночастиц или энергетического поглощения других физико-химических элементов [6]. Оно определяет вероятность того, как главные оси эллипса напряженного состояния ориентированы на угол  $\psi$  по направлению  $G$ . Из соотношения (25) также виден возрастающий характер зависимости диссипации механической энергии ( $G \tau_{12}$ ) от частоты релаксации. При этом тепловое рассеяние (поглощение) энергии зависит от фактора поляризации системы, то есть от  $2 \operatorname{ctg} 2\psi$ .

Сопоставляя для одного числа  $We$  величины  $\tau_{12}$  и  $P_{11} - P_{22}$ , с учетом  $G \approx \mu^{-1} \tau_{12}$ , находим:

$$\frac{G \tau_{12}}{P_{11} - P_{22}} = \frac{\alpha^{-1} (1 - \exp(-2\alpha^{-1}t))^2}{1 - \exp(-2\alpha^{-1}t) - 2\alpha^{-1}t \exp(-2\alpha^{-1}t)} \quad (26)$$

Соотношение (26) представляет собой временную связь между механической энергией диссипации (теплого рассеяния) и энергией эластической деформации. Предельные соотношения (25) и (26), отражают фундаментальный термодинамический принцип применительно к процессу переноса импульса в средах с неравновесной микроструктурой: наличие связи диссипации энергии ( $G \tau_{12}$ ), вызванной внешними возмущениями и тепловыми релаксационными флуктуациями (флуктуационно-диссипативные теоремы [1], [2]).

## Выводы

Получены закономерности и проанализировано влияние переменной межмолекулярной ориентационной и внутримолекулярной релаксационной неравновесной микроструктуры широкого класса сред и их базовых течений на кинематические и динамические характеристики соответственно. Полное исследование неравновесной термореодинамики сред с внутренней релаксационной микроструктурой должно проводиться с включением в теорию фундаментальной зависимости производства энтропии от релаксационного параметра состояния системы. Для сред с релаксационной микроструктурой выявлен диапазон чисел  $De$  и  $We$ , которые определяют немгновенный и локально - неравновесный процесс деформирования. Вблизи равновесия соотношения между силами и сопряженными с ними потоками могут иметь нелинейный характер, а процессы переноса изучены методами неравновесной термодинамики. В области значительных чисел  $De$  и  $We$  отклик среды на внешние возмущения носит уже немгновенный и нелокальный релаксационный характер. В этой области деформирования системы равновесно связанные между собой классические параметры энтропии состояния, также как термодинамические потенциалы, изменяются между собой неравновесно, включая малый элемент системы. Для определения, например, скорости процесса переноса в зависимости от внешних условий, уже нельзя воспользоваться принципами линейной неравновесной термодинамики, рассматривая его как последовательную смену локально - равновесных состояний подсистемы. Гидростатическое давление неопределено, то есть не является изотропным, так как его компоненты в тензоре напряжений оказываются различными. Диссипативные потоки не определяются только градиентами потенциала переноса, а являются решениями эволюционного уравнения, описывающего процесс релаксации термореодинамических параметров состояния к локально - равновесным значениям. Результаты работы имеют перспективу развития в направлении изучения процессов неравновесного переноса в средах с релаксационной микроструктурой в практически важной области их немгновенного и нелокального отклика на внешние возмущения.

## Конфликт интересов

Не указан.

## Conflict of Interest

None declared.

## Список литературы / References

1. Де Грот С. Неравновесная термодинамика / С. Де Грот, П. Мазур. Москва: Мир, 1964.
2. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика / Д.Н. Зубарев. Москва: Наука, 1971.
3. Астарита Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Дж. Астарита, Дж. Марручи. Москва: Мир, 1978.
4. Bird R.B. Dynamics of polymeric liquids: Fluid Mechanics / R.B. Bird, R.C. Armstrong, O. Hassager. New York: Wiley – Interscience, 1987.
5. Мидлман С. Течение полимеров / С. Мидлман. Москва: Мир, 1971.
6. Цветков В.Н. Структура макромолекул в растворах / В.Н. Цветков, В.Е. Эскин, С.Я. Френкель. Москва: Наука, 1964.
7. Соболев С.Л. Локально-неравновесные модели процессов переноса / С.Л. Соболев // Успехи физических наук. 1997. Т.167, №10. С. 1095-1106.
8. Жоу Д. Расширенная необратимая термодинамика / Д. Жоу, Х. Касас-Баскес, Дж. Лебон. Москва-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”; Институт компьютерных исследований, 2006.
9. Протоdjаконов И.О. Явления переноса в процессах химической технологии / И.О. Протоdjаконов, Н.А. Марцулевич, А.В. Марков. Ленинград: Химия, 1981.
10. Кутателадзе С.С. К гидродинамике жидкостей с переменной вязкостью / С.С. Кутателадзе, В.И. Попов, Е.М. Хабахпашева // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1966. №1. С.45-49.
11. Попов В.И. Реокинетика переноса вещества и импульса в химически активных средах с микроструктурой / В.И. Попов // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т.8, №2. С.269-281.
12. Попов В.И. Исследование эволюции химически активных полимерных структур в поле сдвиговых, энтропийных и диффузионных сил / В.И. Попов // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т.45, №5. С.519-528.
13. Терлецкий Я.П. Статистическая физика / Я.П. Терлецкий. Москва: Высшая школа, 1966
14. Попов В.И. Роль эффектов нелокальности и запаздывания в процессах переноса в средах с микроструктурой / В.И. Попов // Журн. прикл. механики и техн. физики. 2002. Т.43, № 6. С.151-155.
15. Кекалов А.Н. Влияние реологических факторов на закономерности движения и теплообмена вязкоупругих потоков при малых числах Деборы / А.Н. Кекалов, В.И. Попов // Инженерно-физический журнал. 1978. Т.35, №4. С. 681-690.
16. Хан Ч.Д. Реология в процессах переработки полимеров / Ч.Д. Хан. Москва: Химия, 1979.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. De Grot S. Neravnovesnaja termodinamika [Non-Equilibrium Thermodynamics] / S. De Grot, P. Mazur. Moskva: Mir, 1964. [in Russian]
2. Zubarev D.N. Neravnovesnaja statisticheskaja termodinamika [Nonequilibrium Statistical Thermodynamics] / D.N. Zubarev. Moskva: Nauka, 1971. [in Russian]
3. Astarita Dzh. Osnovy gidromekhaniki nen'jutonovskikh zhidkostej. [Marruci George. Fundamentals of Hydro-Mechanics of Non-Newtonian Fluids.] / Dzh. Astarita, Dzh. Marruchi. Moskva: Mir, 1978. [in Russian]
4. Bird R.B. Dynamics of polymeric liquids: Fluid Mechanics / R.B. Bird, R.C. Armstrong, O. Hassager. New York: Wiley – Interscience, 1987.
5. Midlman S. Tehenie polimerov [The Flow of Polymers] / S. Midlman. Moskva: Mir, 1971. [in Russian]
6. Cvetkov V.N. Struktura makromolekul v rastvorakh [Structure of Macromolecules in Solutions] / V.N. Cvetkov, V.E Ehsin, S.Ja. Frenkel'. Moskva: Nauka, 1964. [in Russian]
7. Sobolev S.L. Lokal'no-neravnovesnye modeli processov perenosa [Local Non-Equilibrium Models of Transport Processes]. / S.L. Sobolev // Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in Physical Sciences]. 1997. Vol.167, №10. pp. 1095-1106. [in Russian]
8. Zhou D. Rasshirennaja neobratimaja termodinamika [Advanced Irreversible Thermodynamics]. Moskva-Izhevsk: NIC “Reguljarnaja i khaoticheskaja dinamika” [“Regular and Chaotic Dynamics” Research institute] / D. Zhou, Kh. Kasas-Baskes, Dzh. Lebon; Institut komp'juternyx issledovanij, 2006. [in Russian]
9. Protod'jakonov I.O. Javlenija perenosa v processakh khimicheskoy tekhnologii [Transport Phenomena in Chemical Processes] / I.O. Protod'jakonov, N.A. Marculevich, A.V. Markov. Leningrad: Khimija, 1981. [in Russian]
10. Kutateladze S.S. K gidrodinamike zhidkostej s peremennoj vjazkost'ju [To Hydrodynamics of Liquids With Variable Viscosity]. / S.S. Kutateladze, V.I. Popov, E.M. Khabakhpasheva // Zhurn. prikl. mekhaniki i tekhn. fiziki [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 1966. №1. pp.45-49. [in Russian]
11. Popov V. I. Reokinetika perenosa veshhestva i impul'sa v himicheski aktivnyh sredah s mikrostrukturuj [Rheokinetic the transfer of matter and momentum in chemically active media with microstructure]. / V.I. Popov // Teplofizika i aeromehanika [Thermophysics and aeromechanics]. 2001. Vol. 8, no. 2. pp. 269-281. [in Russian]
12. Popov V.I. Issledovanie ehvolucii khimicheski aktivnykh polimernykh struktur v pole sdvigovykh, ehntropijnykh i diffuzionnykh sil [Investigation of the Evolution of Chemically Active Polymer Structures in the Field of Shear, Entropy and Diffusion Forces] / V.I. Popov // Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii [Theoretical Foundations of Chemical Technology]. 2011. Vol.45, №5. pp.519-528. [in Russian]
13. Terleckij Ja.P. Statisticheskaja fizika [Statistical Physics]. Moscow: Vysshaja shkola, 1966 [in Russian]
14. Popov V.I. Rol' ehffektov nelokal'nosti i zapazdyvaniya v processakh perenosa v sredakh s mikrostrukturuj [The Role of the Effects of Nonlocality and Retardation in the Transport Processes in Media With Microstructure]. / V.I. Popov // Zhurn. prikl. mekhaniki i tekhn. fiziki [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2002. Vol.43, № 6. pp.151-155. [in Russian]
15. Kekalov A.N. Vlijanie reologicheskikh faktorov na zakonmernosti dvizhenija i teploobmena vjazkouprugikh potokov pri malyx chislakh Debory [The Influence of Rheological Factors on the Laws of Motion and Heat Transfer of Viscoelastic Flows at Lower Deborah Numbers]. / A.N. Kekalov, V.I. Popov // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 1978. Vol.35, №4. pp. 681-690. [in Russian]
16. Khan Ch.D. Reologija v processakh pererabotki polimerov [Rheology in the Processes of Polymer Processing]. Moscow: Khimija, 1979. [in Russian]



## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.004>**РЕКУРРЕНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ БАЗИСА ПЕРЕХОДА ОТ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ФУНКЦИЯМ ЧЕБЫШЕВА-ЭРМИТА К ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЮ**

Научная статья

**Бочкарев А.В.<sup>1,\*</sup>, Сайфуллин Р.Т.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1615-5659;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7047-3979;<sup>1,2</sup> Самарский Государственный Технический Университет, Самара, Россия

\* Корреспондирующий автор (bochkarevpublicit[at]gmail.com)

**Аннотация**

Цель работы заключается в формировании рекуррентного представления для базиса, позволяющего по коэффициентам разложения исходного сигнала в базисе функций Чебышева-Эрмита восстановить массив вейвлет-коэффициентов исходного сигнала. В качестве вейвлетов в работе используются производные функции Гаусса  $m$ -го порядка. Рекуррентное представление необходимо для сокращения времени вычислений. Рекуррентное представление рассматриваемого базиса формируется на основе свойств полиномов Эрмита, входящих в состав производных функции Гаусса и функций Чебышева-Эрмита. Благодаря использованию полученных формул расчета вейвлет-коэффициентов с учетом описанного алгоритма их применения удастся построить быстрые вычислительные алгоритмы обработки сигналов.

**Ключевые слова:** функции Чебышева-Эрмита, вейвлет-преобразование, вейвлеты Гаусса, разложение сигнала.

**RECURRENT REPRESENTATION OF THE TRANSITION BASIS FROM THE EXPANSION COEFFICIENTS BASED ON THE CHEBYSHEV-HERMITE TO THE WAVELET TRANSFORM**

Research article

**Bochkarev A.V.<sup>1,\*</sup>, Saifullin R.T.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1615-5659;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7047-3979;<sup>1,2</sup> Samara State Technical University, Samara, Russia

\* Corresponding author (bochkarevpublicit[at]gmail.com)

**Abstract**

The aim of the work is to form a recurrent representation for the basis that allows for reconstructing an array of wavelet coefficients of the original signal from the expansion coefficients of the source signal in the basis of Chebyshev-Hermite functions. The derivatives of the Gauss function of the  $m$  order are used as wavelets. The recurrent representation is necessary to reduce the calculation time. The recurrent representation of the studied basis is formed according to the properties of Hermite polynomials that are part of the derivatives of the Gauss function and the Chebyshev-Hermite functions. Because of the use of the obtained formulas for calculating the wavelet coefficients, taking into account the described algorithm for their application, it is possible to build fast computational algorithms for signal processing.

**Keywords:** Chebyshev-Hermite functions, wavelet transform, Gaussian wavelets, signal decomposition.

**Введение**

Одним из подходов к созданию алгоритмов обработки сигналов является кодирование сигнала в базисе функций Чебышева-Эрмита с последующим декодированием по другим, предварительно рассчитанным базисам; причем, в зависимости от выбора базиса возможно получить сам сигнал [1], [2], производную различных порядков [2], вейвлет преобразование [3], [4] и т.п.

Функции Чебышева-Эрмита находят широкое распространение в различных областях науки и техники. Так, их повсеместно применяют в математике, к примеру, в работе [5] изучается вопрос нахождения приближенных решений нелинейных дифференциальных уравнений с использованием спектрального метода, в работах [6] и [7] исследуется тот же вопрос с применением проекционного метода. В работе [8] описано применение данных функций для построения ортогонального банка фильтров, поскольку функции обладают сглаживающим свойством, при их использовании в качестве базиса для кодирования сигналов.

Вейвлет-анализ является одним из наиболее мощных и гибких средств исследования как одномерных, так и двумерных сигналов. Так, в работе [9] вейвлет-преобразование служит для анализа поверхностей методом проекционных полос с учетом возникающих дифракционных пятен. Также вейвлет-преобразование способствует в работе [10] определению экономического влияния COVID-19 на производство США. В работе [11] рассматривается вопрос существования решения интегрального уравнения Фредгольма с использованием сразу нескольких вейвлетов. Помимо этого, вейвлет-преобразование широко применяется в хроматографии и спектроскопии, к примеру, в работе [12] данное преобразование позволяет авторам дешево, быстро и точно определять содержание дорзоламида и тимолола в человеческой слезе, при этом используется множество различных вейвлетов одновременно.

Вейвлет-преобразование, при использовании множества вейвлетов одновременно, из-за необходимости осуществлять интегрирование зачастую вызывает затруднение при анализе сигналов произвольной формы, что и составляет рассматриваемую в данной работе научную проблему. Следовательно, для разработки современных алгоритмов обработки сигналов и решения уравнений актуальным является вопрос вычисления вейвлет-

преобразования сигналов произвольной формы без необходимости интегрирования. В соответствии с этим, задачей настоящего исследования является формирование быстрого вычислительного алгоритма рекуррентного вычисления вейвлет-преобразования сигналов без интегрирования с применением методики кодирования в базисе функций Чебышева-Эрмита.

### Базис перехода от коэффициентов разложения по функциям Чебышева-Эрмита к вейвлет-преобразованию

Ранее, в работе [4] была рассмотрена возможность перехода от коэффициентов  $c_1, c_2, \dots, c_N$  кодирования сигнала в базисе функций Чебышева-Эрмита  $\varphi_n\left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right)$  к вейвлет-преобразованию  $W_m(a, b)$  этого сигнала при использовании в качестве вейвлета производной функции Гаусса  $m$  порядка (далее вейвлет-преобразование  $m$  порядка). Если сигнал  $S(x)$ , закодированный в базисе функций  $\varphi_n\left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right)$  по  $N+1$  функциям (при  $0 \leq n \leq N$ ) можно восстановить по выражению:

$$S(x) = \sum_{n=0}^N c_n \varphi_n\left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right), \quad (1)$$

где  $x_0$  - величина сдвига функции Чебышева-Эрмита;

$\gamma$  - коэффициент масштаба функции Чебышева-Эрмита;

то для восстановления вейвлет-преобразования  $W_m(a, b)$  сигнала  $S(x)$   $m$  порядка можно прибегнуть к подобному

(1) выражению, в котором  $\varphi_n\left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right)$  сменяются на функции  $W_{m, \varphi_n}(a, b)$  базиса перехода к вейвлет-преобразованию:

$$W_m(a, b) = \sum_{n=0}^N c_n W_{m, \varphi_n}(a, b), \quad (2)$$

где  $a$  - коэффициент масштаба вейвлета;

$b$  - коэффициент сдвига вейвлета;

и сам базис записывается следующим образом:

$$W_{m, \varphi_n}(a, b) = \frac{(x_0-b)^2}{\alpha_n \sqrt{a}} \cdot \frac{-e^{-\frac{(x_0-b)^2}{2a^2}}}{m!n!} \cdot H_{m, \varphi_n}(I), \quad (3)$$

$$H_{m, \varphi_n}(t) = \sum_{k=0}^{n/2} \left\{ \lambda_k^n \cdot \left(\frac{2}{\gamma}\right)^{n-2k} \cdot \sum_{i=0}^{n-2k} \left\{ (-1)^i \cdot C_{n-2k}^i \cdot \gamma^{2i} \cdot p^i \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sum_{j=0}^{m/2} \left[ \lambda_j^m \left(\frac{1}{a}\right)^{m-2j} \left(\frac{1}{2}\right)^j \sum_{l=0}^{m-2j} \left( C_{m-2j}^l \cdot t^h \cdot a^{2l} \cdot p^l \right) \right] \right\} \right\}. \quad (4)$$

где  $h = n - 2k - i + m - 2j - l$ .

Базис (3) получен путем интегрирования произведения  $n$ -й базисной функции и вейвлета  $m$  порядка:

$$W_{m, \varphi_n}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_n\left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right) \cdot g_m\left(\frac{x-b}{a}\right) dx. \quad (5)$$

Нетрудно заметить, что расчет (4) при высоких порядках  $m$  и  $n$  затруднителен в силу большого количества математических операций. Следовательно, и сам базис перехода к вейвлет-преобразованию (3) будет требовать все больше времени при увеличении числа используемых базисных функций, либо с увеличением порядка вейвлета. Следовательно, для эффективного применения базиса требуется сократить количество вычислительных процедур.

### Формирование рекуррентного представления базиса перехода от коэффициентов разложения по функциям Чебышева-Эрмита к вейвлет-преобразованию

Одним из очевидных способов упростить расчет полинома (4) является его преобразование к рекуррентной форме, что априори возможно, поскольку известны рекуррентные формулы для составляющих данное выражение многочленов Эрмита [9]:

$$H_n\left(\frac{1}{\gamma}[t-\gamma^2 p]\right)=\frac{2}{\gamma}(t-\gamma^2 p)\cdot H_{n-1}\left(\frac{1}{\gamma}[t-\gamma^2 p]\right)-$$

$$-2(n-1)H_{n-2}\left(\frac{1}{\gamma}[t-\gamma^2 p]\right), \quad (6)$$

$$He_m\left(\frac{1}{a}[t+a^2 p]\right)=\frac{1}{a}(t+a^2 p)\cdot H_{m-1}\left(\frac{1}{a}[t+a^2 p]\right)-$$

$$-2(m-1)H_{m-2}\left(\frac{1}{a}[t+a^2 p]\right), \quad (7)$$

где

$$\frac{x-b}{a}=\frac{1}{a}(t+a^2 p), \quad \frac{x-x_0}{\gamma}=\frac{1}{\gamma}(t-\gamma^2 p), \quad p=\frac{x_0-b}{a^2+\gamma^2}=\frac{x_0-b}{d^2},$$

$$d=\sqrt{a^2+\gamma^2}, \quad t=x-\frac{a^2 x_0+\gamma^2 b}{a^2+\gamma^2},$$

- замены, введенные в [4] для упрощения интегрирования.

Для перехода (3) к рекуррентному представлению следует найти произведение (6) и (7). Обозначив данное произведение  $Hr_{m,\varphi_n}(t)$ , а также, для упрощения записи, введя обозначения  $H_n(t) \stackrel{def}{=} H_n\left(\frac{1}{\gamma}[t-\gamma^2 p]\right)$  и  $He_m(t) \stackrel{def}{=} He_m\left(\frac{1}{a}[t+a^2 p]\right)$  получим, после раскрытия скобок и приведения подобных членов:

$$Hr_{m,\varphi_n}(t)=\frac{2}{a\gamma}t^2 He_{m-1}(t)H_{n-1}(t)+\frac{2p(a^2-\gamma^2)}{a\gamma}t\cdot He_{m-1}(t)H_{n-1}(t)-$$

$$-2a\gamma p^2 He_{m-1}(t)H_{n-1}(t)-\frac{2(m-1)}{\gamma}t\cdot He_{m-2}(t)H_{n-1}(t)+$$

$$+2\gamma p(m-1)He_{m-2}(t)H_{n-1}(t)-\frac{2(n-1)}{a}t\cdot He_{m-1}(t)H_{n-2}(t)-$$

$$-2ap(n-1)He_{m-1}(t)H_{n-2}(t)+2(n-1)(m-1)He_{m-2}(t)H_{n-2}(t). \quad (8)$$

Поскольку каждый член (8) представляет собой, равно как и само выражение (8), произведение  $He_m(t)H_n(t)$ , допускается ввести также для каждого члена (8) обозначение

$$Hr_{m,\varphi_n}(t)=He_m(t)H_n(t).$$

Поскольку полином (8) находится под знаком интеграла при расчете вейвлет-преобразования (5), для упрощения интегрирования, за счет дистрибутивности суммы, следует внести множитель  $t$  под знак суммы и привести все множители  $t$  с различными степенями к одному основанию. Выполнив данные преобразования возможно совершить в выражении выше замену  $I_n \stackrel{def}{=} t^n$ , которой соответствует табличный интеграл [10]:

$$I_n=\int_{-\infty}^{\infty} t^n \cdot e^{-t^2\left(\frac{d}{\sqrt{2a\gamma}}\right)^2} dt=\begin{cases} \frac{\sqrt{2\pi}(a\gamma)^{n+1}\cdot(n-1)!!}{d^{n+1}}, n \bmod 2=0, \\ 0, n \bmod 2=1. \end{cases} \quad (9)$$

Данная замена необходима [4] для интегрирования в (5).

Чтобы упростить дальнейшую запись выражений, введем следующее обозначение для полинома с внесенным под знак суммы множителем  $t$ :

$$\begin{aligned}
Hr_{m,\varphi_n}(t \cdot t^{\Delta h}) &= t^{\Delta h} Hr_{m,\varphi_n}(t) = m!n! \sum_{k=0}^{n/2} \left\langle \lambda_k^n \cdot \left(\frac{2}{\gamma}\right)^{n-2k} \cdot \sum_{i=0}^{n-2k} \{(-1)^i \times \right. \\
&\times C_{n-2k}^i \cdot \gamma^{2i} \cdot p^i \sum_{j=0}^{m/2} \left[ \lambda_j^m \left(\frac{1}{a}\right)^{m-2j} \left(\frac{1}{2}\right)^j \sum_{l=0}^{m-2j} (C_{m-2j}^l \cdot t^{h+\Delta h} \cdot a^{2l} \cdot p^l) \right] \Bigg\rangle.
\end{aligned} \quad (10)$$

Очевидно, правая часть (10) представляет собой  $m!n!H_{m,\varphi_n}(t)$  со степенью  $t$  под знаком суммы, соответствующей выбранным  $m, n$ , к которому добавляется степень множителя  $t^{\Delta h}$ . В соответствии с (10) можно выполнить замену в (8), получив при этом:

$$\begin{aligned}
Hr_{m,\varphi_n}(t) &= \frac{2}{a\gamma} Hr_{m-1,\varphi_{n-1}}(t \cdot t^2) + \frac{2p(a^2 - \gamma^2)}{a\gamma} Hr_{m-1,\varphi_{n-1}}(t \cdot t) - \\
&- 2a\gamma p^2 Hr_{m-1,\varphi_{n-1}}(t) - \frac{2(m-1)}{\gamma} Hr_{m-2,\varphi_{n-1}}(t \cdot t) + \\
&+ 2\gamma p(m-1) Hr_{m-2,\varphi_{n-1}}(t) - \frac{2(n-1)}{a} Hr_{m-1,\varphi_{n-2}}(t \cdot t) - \\
&- 2ap(n-1) Hr_{m-1,\varphi_{n-2}}(t) + 2(n-1)(m-1) Hr_{m-2,\varphi_{n-2}}(t).
\end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя  $Hr_{m,\varphi_n}(t)$  в (3) вместо  $m!n!H_{m,\varphi_n}(I)$  с соответствующей заменой  $I_n = t^n$  получим:

$$W_{m,\varphi_n}(a,b) = \frac{-e^{-\frac{(x_0-b)^2}{2d^2}}}{\alpha_n \sqrt{a}} \cdot Hr_{m,\varphi_n}(I), \quad (12)$$

при этом, следуя терминологии, введенной в (11), в дальнейшем можно обозначать  $Hr_{m,\varphi_n}(t \cdot t^{\Delta h}) \stackrel{I_n=t^n}{=} Hr_{m,\varphi_n}(I \cdot I_{\Delta h})$ , при этом, аналогично (10), в явном виде такое обозначение будет иметь следующий смысл:

$$\begin{aligned}
Hr_{m,\varphi_n}(I \cdot I_{\Delta h}) &= m!n! \sum_{k=0}^{n/2} \left\langle \lambda_k^n \cdot \left(\frac{2}{\gamma}\right)^{n-2k} \cdot \sum_{i=0}^{n-2k} \{(-1)^i \cdot C_{n-2k}^i \cdot \gamma^{2i} \cdot p^i \times \right. \\
&\times \sum_{j=0}^{m/2} \left[ \lambda_j^m \left(\frac{1}{a}\right)^{m-2j} \left(\frac{1}{2}\right)^j \sum_{l=0}^{m-2j} (C_{m-2j}^l \cdot I_{h+\Delta h} \cdot a^{2l} \cdot p^l) \right] \Bigg\rangle.
\end{aligned} \quad (13)$$

Сформировать из (12) рекуррентную формулу можно, если подставить в него выражение (11), раскрыть скобки и выделить в виде (12) все возможные отдельные  $W_{m,\varphi_n}(a,b)$ :

$$\begin{aligned}
W_{m,\varphi_n}(a,b) = & \left[ \frac{\sqrt{2}\gamma p(m-1)}{\sqrt{n}} W_{m-2,\varphi_{n-1}}(a,b) - \frac{\sqrt{2}a\gamma p^2}{\sqrt{n}} W_{m-1,\varphi_{n-1}}(a,b) - \right. \\
& \left. - \frac{ap(n-1)}{n} W_{m-1,\varphi_{n-2}}(a,b) + \frac{(n-1)(m-1)}{n} \frac{-e^{-\frac{(x_0-b)^2}{2d^2}}}{\alpha_{n-2}\sqrt{a}} W_{m-2,\varphi_{n-2}}(a,b) \right] + \\
& + \frac{-2e^{-\frac{(x_0-b)^2}{2d^2}}}{\alpha_n\sqrt{a}} \left[ \frac{1}{a\gamma} Hr_{m-1,\varphi_{n-1}}(I \cdot I_2) + \frac{p(a^2 - \gamma^2)}{a\gamma} Hr_{m-1,\varphi_{n-1}}(I \cdot I_1) - \right. \\
& \left. - \frac{(m-1)}{\gamma} Hr_{m-2,\varphi_{n-1}}(I \cdot I_1) - \frac{(n-1)}{a} Hr_{m-1,\varphi_{n-2}}(I \cdot I_1) \right].
\end{aligned} \tag{14}$$

где:

$$\alpha_n = \sqrt{2n} \cdot \alpha_{n-1} = 2n \cdot \alpha_{n-2}. \tag{15}$$

Полученное выражение (14) хоть и ссылается на собственные члены низших порядков, но содержит также четыре члена  $Hr_{m-1,\varphi_{n-1}}(I \cdot I_{\Delta h})$ , которые невозможно свести к виду (14), поэтому каждый из данных членов должен быть рассчитан отдельно, также рекуррентно, согласно выражению (11). За счет этого теряются преимущества в скорости вычислений, при этом запись базиса в виде (14) куда более громоздкая по сравнению с (12). Поскольку целью перехода к рекуррентной форме являлось упрощение вычислительного процесса, наиболее оптимальным способом формирования базиса перехода к вейвлет-преобразованию с вейвлетами-производными функции Гаусса, является предварительный расчет полиномов (11) рекуррентно с последующей подстановкой результата в (12).

### Заключение

Таким образом, в качестве *результата* работы выступают выражения (14) и (15) задающие искомые выражения рекуррентного вычисления без интегрирования множества вейвлет-преобразований сигнала, закодированного в базисе функций Чебышева-Эрмита. Полученные выражения основываются на рекуррентных свойствах полиномов Эрмита, из-за чего, при предварительном вычислении всех требуемых начальных членов выражения (14), становится возможным без интегрирования сформировать вейвлет-коэффициенты исследуемого сигнала по целому семейству вейвлетов, заданных производной функции Гаусса, к которым, в частности, относится и широко распространенный вейвлет «Мексиканская шляпа».

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта аспирантов ФГБОУ ВО «СамГТУ».

### Funding

The paper is carried out with financial support of SamSTU's postgraduate student grant.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Сайфуллин Р.Т. Выбор необходимого числа базисных функций в алгоритмах кодирования-декодирования сигналов аналитических приборов / Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев // Информационно-измерительные и управляющие системы: межвуз. сб. науч. статей. Выпуск 1(17). – 2019, с. 35-42
2. Сайфуллин Р.Т. Вычисление производных аналитического сигнала в базисе функций Чебышева-Эрмита. / Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев // Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (27–30 мая 2019 г., Самара, Россия). Том 2. – 2019, с. 137-139
3. Сайфуллин Р.Т. Вычисление непрерывного вейвлет-преобразования сигналов в базисе функций Чебышева-Эрмита. / Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки, № 2(62). – 2019, с. 99-113
4. Сайфуллин Р.Т. Алгоритм вычисления коэффициентов вейвлет-преобразования сигналов с использованием базиса функций Чебышева-Эрмита. / Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки, № 4(64). – 2019, с. 113-124
5. Xue Luo. Spectral viscosity method with generalized Hermite functions for nonlinear conservation laws / Xue Luo. // Applied Numerical Mathematics, Volume 123, 2018. P. 256-274.
6. Рогазинский С. В. Рандомизированный проекционный метод для решения нелинейного уравнения Больцмана в трехмерном случае / С. В. Рогазинский // Марчуковские научные чтения, №2020. – 2020, с. 51.
7. Rogasinsky S.V. Two variants of Monte Carlo projection method for numerical solution of nonlinear Boltzmann equation / S. V. Sergeev // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, Volume 34, Issue 3 (Jun 2019).

8. Балакин Д.А. Построение ортогонального банка фильтров на основе преобразований Эрмита для обработки сигналов. / Д.А. Балакин, В.В. Штыков // Журнал радиоэлектроники, №9, 2014, с. 1-15.
9. Shang W. Analysis and reduction of error caused by tested object using fringe projection technique with wavelet transform. / W. Shang, S. Liu, J. Wang, R. Shao. // Optik, Vol. 221, 2020.
10. Choi S.-Y. Industry volatility and economic uncertainty due to the COVID-19 pandemic: Evidence from wavelet coherence analysis / S.-Y. Choi // Finance Research Letters, Vol. 37, 2020.
11. Rabbani M. Compact operators for existence of solution and projection method with multi-wavelet bases to solve (F.IES) and error analysis in Sobolev space. / M. Rabbani // Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 382, 2021
12. Valizadeh M. The application of continuous wavelet transform based on spectrophotometric method and high-performance liquid chromatography for simultaneous determination of anti-glaucoma drugs in eye drop. / M. Valizadeh, M.R. Sohrabi, F. Motiee. // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, Vol. 242, 2020.
13. Szego G. Orthogonal Polynomials: 4<sup>th</sup> ed. / G. Szego, Rhode Island: American Mathematical Society, 2003, – 432 p.
14. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Физматгиз, 1963, – 1100 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Sajfullin R.T. Vybór neobhodimogo čisla bazisnyh funkcij v algoritmah kodirovanija-dekodirovanija signalov analitičeskix priborov. [The choice of the required number of basis functions in the algorithms for coding and decoding signals of analytical instruments] / R.T. Sajfullin, A.V. Bochkarev // Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy: mezhvuz. sb. nauch. statej. [Information-measuring and control systems: interuniversity collection of scientific papers] № 1(17). – 2019, p. 35-42 [in Russian]
2. Sajfullin R.T. Vychislenie proizvodnyh analitičeskogo signala v bazise funkcij Čebyševa-Jermita. [Calculation of the derivatives of the analytical signal in the basis of the Chebyshev-Hermite functions] / R.T. Sajfullin, A.V. Bochkarev // Materialy XI Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Matematičeskoe modelirovanie i kraevye zadachi» [Mathematical modeling and boundary value problems] (27–30 may 2019, Samara, Russia). Vol. 2. – 2019, p. 137-139 [in Russian]
3. Sajfullin R.T. Vychislenie nepreryvnogo vejvlet-preobrazovanija signalov v bazise funkcij Čebyševa-Jermita. [Calculation of continuous wavelet transform of signals in the basis of Chebyshev-Hermite functions] / R.T. Sajfullin, A.V. Bochkarev // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: tehničeskije nauki [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences], № 2(62). – 2019, pp. 99-113 [in Russian]
4. Sajfullin R.T. Algoritm vychislenija koeficientov vejvlet-preobrazovanija signalov s ispol'zovanijem bazisa funkcij Čebyševa-Jermita. [Calculation of continuous wavelet transform of signals in the basis of Chebyshev-Hermite functions] / R.T. Sajfullin, A.V. Bochkarev // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: tehničeskije nauki [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences], № 4(64). – 2019, pp. 113-124 [in Russian]
5. Xue Luo. Spectral viscosity method with generalized Hermite functions for nonlinear conservation laws / Xue Luo. // Applied Numerical Mathematics, Volume 123, 2018. P. 256-274.
6. Rogazinskij S.V. Randomizirovannyj proekcionnyj metod dlja reshenija nelinejnogo uravnenija Bol'cmana v trehmernom sluchae [A randomized projection method for solving the nonlinear Boltzmann equation in the three-dimensional case] / S.V. Rogazinskij // Marchukovskie nauchnye čtenija [Marchuk Scientific Readings], № 2020. – 2020, p. 51 [in Russian]
7. Rogazinskij S.V. Two variants of Monte Carlo projection method for numerical solution of nonlinear Boltzmann equation / S.V. Rogazinskij // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, Volume 34, Issue 3 (Jun 2019).
8. Balakin D.A. Postroenie ortogonal'nogo banka fil'trov na osnove preobrazovanij Jermita dlja obrabotki signalov. [Construction of an orthogonal filter bank based on Hermite transforms for signal processing] / D.A. Balakin, V.V. Shtykov // Zhurnal radioelektroniki [Radioelectronics Journal], №9, 2014, pp. 1-15 [in Russian]
9. Shang W. Analysis and reduction of error caused by tested object using fringe projection technique with wavelet transform. / W. Shang, S. Liu, J. Wang, R. Shao. // Optik, Vol. 221, 2020.
10. Choi S.-Y. Industry volatility and economic uncertainty due to the COVID-19 pandemic: Evidence from wavelet coherence analysis / S.-Y. Choi // Finance Research Letters, Vol. 37, 2020.
11. Rabbani M. Compact operators for existence of solution and projection method with multi-wavelet bases to solve (F.IES) and error analysis in Sobolev space. / M. Rabbani // Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 382, 2021
12. Valizadeh M. The application of continuous wavelet transform based on spectrophotometric method and high-performance liquid chromatography for simultaneous determination of anti-glaucoma drugs in eye drop. / M. Valizadeh, M.R. Sohrabi, F. Motiee. // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, Vol. 242, 2020.
13. Szego G. Orthogonal Polynomials: 4<sup>th</sup> ed. / G. Szego, Rhode Island: American Mathematical Society, 2003, – 432 p.
14. Gradshtejn I.S. Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij. [Integral, sums, series and multiplies tables] / I.S. Gradshtejn, I.M. Ryzhik. – М.: Физматгиз, 1963, – 1100 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.005>**КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И АГРЕГАТ ДЛЯ ПОЛОСОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

Научная статья

**Бойков В.М.<sup>1</sup>, Старцев С.В.<sup>2,\*</sup>, Воротников И.Л.<sup>3</sup>, Павлов А.В.<sup>4</sup>**<sup>1, 2, 3, 4</sup> Саратовский госагроуниверситет им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

\* Корреспондирующий автор (kingofscience[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Для производства пропашных культур, высеваемых по ширококрядной технологии, все большее распространение находит технология обработки почвы по полосам. В университете разработана технология и комбинированный агрегат ПБС-8х70П для полосовой обработки почвы с одновременным внесением минеральных удобрений для условий степного Поволжья. На раме агрегата установлены чизельные корпуса и гребнеобразователи. Ширина захвата агрегата составляет 5,6м; длина 1,9м; высота 1,7м; расстояние между чизельными корпусами в ряду 0,7м; расстояние между гребнеобразователями в ряду 0,35м; регулируемая величина глубины обработки почвы чизельными корпусами 0,15-0,4м. На скорости 2,6м/с, глубине 0,3м, эксплуатационная производительность К-9430+ПБС-8х70П составила 3,8га/ч.

**Ключевые слова:** почва, технология, агрегат, рабочий орган, глубина, производительность.**COMBINED TECHNOLOGY AND UNIT FOR STRIP-TILL**

Research article

**Boikov V.M.<sup>1</sup>, Startsev S.V.<sup>2,\*</sup>, Vorotnikov I.L.<sup>3</sup>, Pavlov A.V.<sup>4</sup>**<sup>1, 2, 3, 4</sup> Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov, Russia

\* Corresponding author (kingofscience[at]yandex.ru)

**Abstract**

Strip-till is becoming increasingly widespread in the production of row crops sown using wide row planting. The university has developed a technology and a combined unit "PBS-8x70p" for strip-till with simultaneous mineral fertilizing for the environment of the Volga Region steppe. The frame of the unit contains chisel plows and ridge formers. The width of the unit is 5.6 m; length is 1.9 m; height is 1.7 m; distance between chisel housings in a row is 0.7 m; distance between ridge formers in a row is 0.35 m; adjustable depth of tillage with chisel plows is 0.15-0.4 m. At a speed of 2.6 m / s, a depth of 0.3 m, the operational capacity of K-9430+PBS-8x70p amounted to 3.8 ha/h.

**Keywords:** soil, technology, aggregate, working attachment, depth, productivity.**Введение**

С целью снижения энергоёмкости основной обработки почвы, когда пахотный пласт рыхлится в сплошную, сегодня применяется технология частичного рыхления пласта - обработка по полосам. Такую обработку называют технологией Strip-till [1]. Технология Strip-till давно и широко используется в США, в странах Западной Европы при выращивании пропашных культур. Обработка почвы предусматривает рыхление только полосы шириной 15-25 см, с последующим высевом в неё культурных растений. Оставшаяся между полосами часть, не обрабатывается, что позволяет экономить энергоресурсы [1], [2].

Полосовая основная обработка почвы улучшает состояние почвы, дает возможность работать естественным почвенным процессам и восстанавливать плодородие почвы. Благодаря целенаправленному разрыхлению полосы почвы, именно в месте произрастания корневой системы, создается пространство для оптимального развития корневой системы растения [2], [3]. Вместе со снижением энергозатрат, такая технология защищает почву от ветровой и водной эрозии, позволяет накопить в зимний период больше снега, а пожнивные остатки между полосами предотвращают его выдувание с поля [4].

Технология полосовой обработки почвы во многом подходит для степного Поволжья, особенно в засушливые сезоны [4], [5], [6]. Хорошо развитая корневая система в разрыхленной полосе позволяет растениям получать влагу из более глубоких горизонтов почвы, не испаряясь из междурядий. Но широкое внедрение технологии сдерживается отсутствием производительной современной специализированной почвообрабатывающей техники [7], [8].

**Методы и условия исследований**

Исследования технологии и комбинированного почвообрабатывающего агрегата выполнялись по стандартным методикам эксплуатационно-технологической оценки пахотных агрегатов: ГОСТ 33736-2016. Техника сельскохозяйственная. Машины для глубокой обработки почвы. Методы испытаний и ГОСТ 24055-2016. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки.

Эксплуатационные показатели комбинированного агрегата в составе трактора К-9432 и почвообрабатывающего орудия ПБС-8х70П определялись на поле после уборки озимой пшеницы. На поверхности поля находились измельченная солома и пожнивные остатки в виде вертикально стоящей стерни высотой в среднем 18,5 см. Общая масса пожнивных остатков 410,0 г на одном квадратном метре. Предшествующая обработка почвы на поле проводилась лемешно-отвальными плугами общего назначения.

Поле было ровным со средневыраженным микрорельефом. Почва – чернозем обыкновенный среднесуглинистый, не засоренный плитняком и камнями. Влажность почвы по глубине 0-30см слоя составляла 18-23%, а твердость 3,2-3,5 МПа.

### Основные результаты

Анализ известных исследований [9], [10], [11] позволил разработать комбинированную технологию полосой обработки почвы (рис. 1).

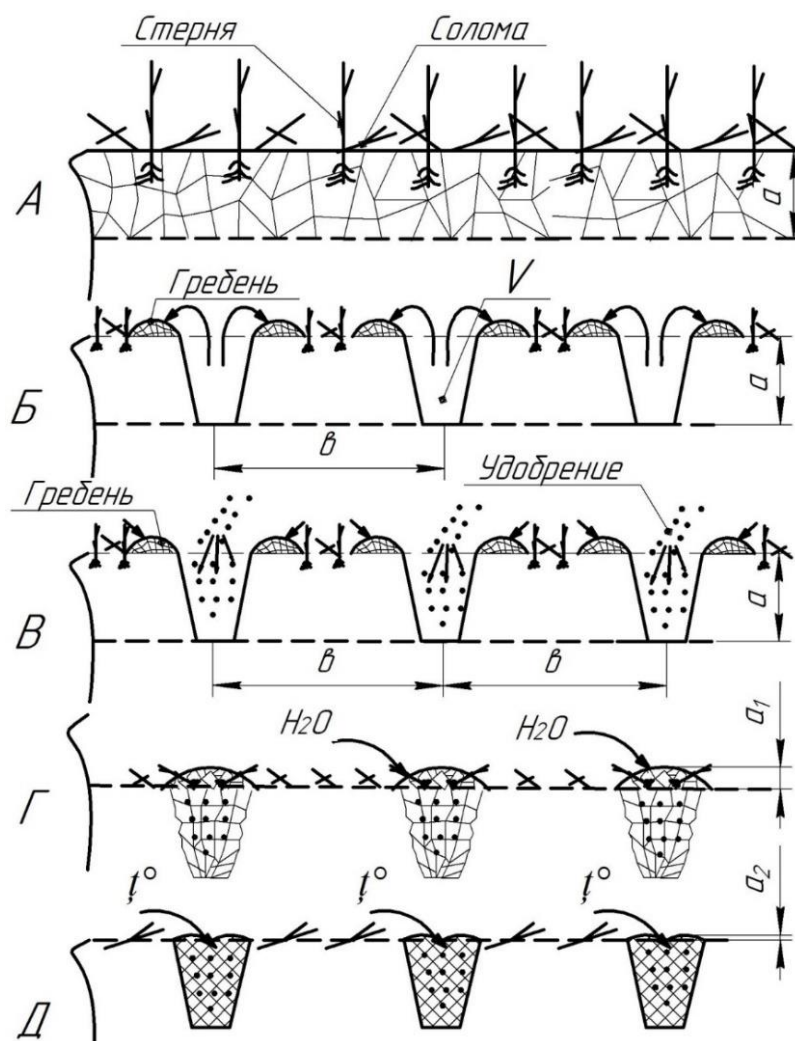


Рис. 1 – Схема комбинированного технологического процесса полосовой обработки почвы

На поле после уборки урожая предшественника, предназначенное для посева пропашных культур (рис. 1,а), первоначально производится отрыв объема почвы  $V$  трапециевидного сечения на глубину  $a$ , при этом почва крошится и далее перемещается на дневную поверхность поля, располагаясь в виде гребней с каждого края полосы (рис. 1,б). Затем гребни раскрошенной почвы перемещаются в профиль открытой полосы (рис. 1,в) и заполняют полосу. На этом этапе в полосу могут вноситься минеральные удобрения. Раскрошенная почва, заполняя открытую полосу образует вспушенный бугор высотой  $a_2$  (рис. 1,г). В летне-осенний период, комья почвы в профиле полосы впитывают атмосферную влагу, поступающую в виде атмосферных дождей (рис. 1,г). В зимний период, вследствие низких температур, вода в комьях почвы замерзает, превращается в лед, разрывая комки почвы. При этом комки почвы крошатся на структурные отдельные размеры от 2-х до 10-ти мм. Также, в зимне-весенний период под действием атмосферного давления, происходит усадка структурной почвы, находящейся в профиле полосы. Весной, в результате снеготаяния, с поверхности поля часть воды дополнительно поступает в подпахотный слой и аккумулируется в полосах.

На основании этой технологии разработана конструктивно-технологическая схема комбинированного почвообрабатывающего агрегата ПБС-8х70П (рис. 2). На основании схемы изготовлен опытный образец: ширина захвата составила 5,6м; длина агрегата 1,9м; высота агрегата 1,7м; расстояние между чизельными рабочими органами в ряду 0,7м; расстояние между гребнеобразователями в ряду 0,35м; расстояние между опорными колесами 6,0м; регулируемая величина глубины обработки чизельных рабочих органов 0,15-0,4м.



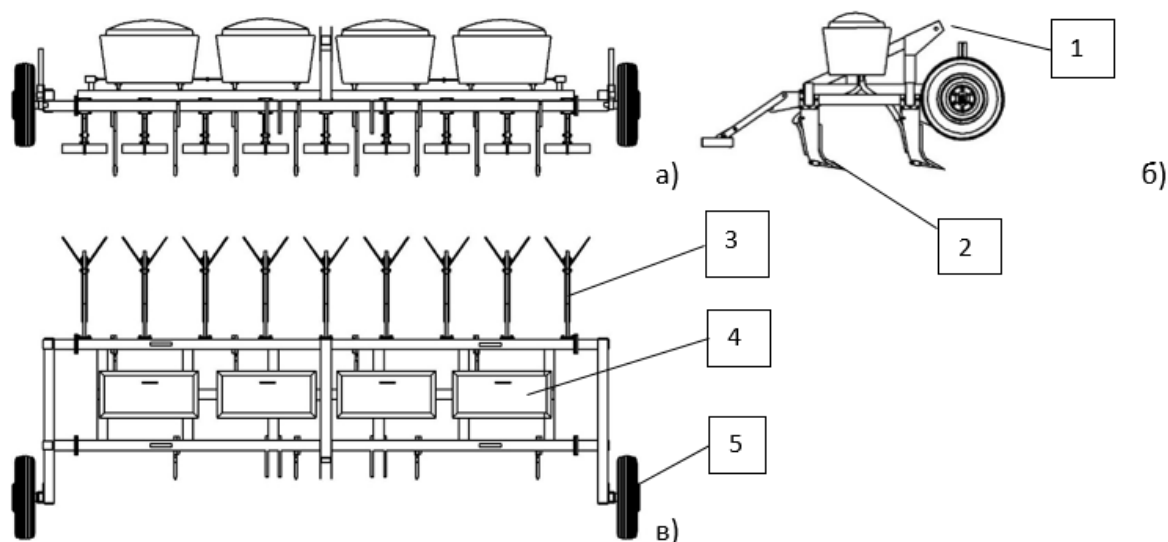


Рис. 2 – Конструктивно-технологическая схема комбинированного почвообрабатывающего агрегата ПБС-8х70П:  
1- рама; 2 – чизельный рабочий орган; 3 – гребнеобразователь; 4 – бункер для удобрений; 5- опорное колесо с механизмом регулировки глубины; а)- вид спереди; б)- вид с боку; в) - вид сверху

Основное назначение комбинированного агрегата ПБС-8х70П включает полосовое рыхление почвы с одновременным внесением минеральных удобрений при производстве яровых пропашных культур по системе Strip-till. На поле не допускается скопление куч соломы и растительных остатков.

Комбинированный почвообрабатывающий агрегат является навесной машиной и используется с тракторами мощностью свыше 220 кВт тягового класса 5-6 (рис. 3).



Рис. 3 – Почвообрабатывающий агрегат ПБС-8х70П

Техническая характеристика комбинированного почвообрабатывающего агрегата ПБС-8х70П приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Техническая характеристика почвообрабатывающего агрегата

Показатель	Значение
Тип изделия	Навесной
Агрегатирование, тяговый класс трактора	5-6
Рабочие скорости, м/с	2-3
Ширина захвата, м	5,6
Транспортная скорость, км/ч, не более	25
Производительность в час, га:	4,8-5,5
Габаритные размеры машины, мм, не более:	
- длина	1895
- ширина	5440
- высота	1740
Масса машины, кг:	1360
Количество корпусов	8
Количество гребнеобразователей	9
Расстояние между стойками смежных рабочих органов, мм	700
Ширина захвата долота рыхлителя, мм	30

Оценка применения комбинированного почвообрабатывающего агрегата ПБС-8х70П в полевых условиях проводилась с использованием трактора тягового класса 6 К-9430 в УНПО «Поволжье» (п. Степное) Советского района Саратовской области. В результате проведения исследований при обработке поля по озимой пшенице при установочной глубине чизельных рабочих органов 30 см и скорости движения агрегата от 1,6 до 2,7 км/ч была получена следующая поверхность пашни (рис. 4). Обработанная по полосам поверхность поля была ровной без нарушения требований агротехники. Агрегат ПБС-8х70П работал челночным способом без образования свальных и развальных борозд, что значительно повышало производительность пахотного агрегата. Чизельными рабочими органами разрушена плужная подошва, значительно раскрошена почва и углублен пахотный горизонт. Гребнеобразователи замульчировали пожнивными остатками верхнюю часть обработанной полосы. Высота вспушенных гребней составляла не более 5,0 см. Между раскрошенными полосами структура почвы осталась сохраненной, а на поверхности стерня уложена в горизонтальном положении. В результате на поверхности поля сформировался обработанный слой с нарезанными полосами на расстоянии 0,30м, края полосы закрыты стерней. Глубина разрыхленной почвы в полосах составила 30см.



Рис. 4 – Поверхность поля после полосовой обработки почв с мульчированием взрыхленной полосы гребнеобразователем

Производительность комбинированного почвообрабатывающего орудия на основании конструктивно-технологической схемы рис. 2:

$$W_q = 0,36 (8b_q + 9b_z - \Delta b) \cdot v \cdot \tau, \quad (1)$$

где,  $b_q$  - ширина полосы обрабатываемой чизельным рабочим органом, м;  $b_z$  - ширина захвата гребнеобразователя, м;  $\Delta b$  - расстояние перекрытия смежных проходов агрегата, м;  $v$  - скорость движения агрегата, м/с;  $\tau$  - коэффициент использования времени.

Расчетная и экспериментальная зависимости производительности агрегата в функции скорости движения представлены на рисунке 5. Полученные зависимости имеют нелинейную закономерность. Величина часовой производительности (2) в полевых исследованиях К-9430+ПБС-8х70П меньше расчетной часовой производительности (1). На скорости 2,6 м/с эксплуатационная производительность составила 3,8 га/ч, теоретическая 4,2 га/ч.

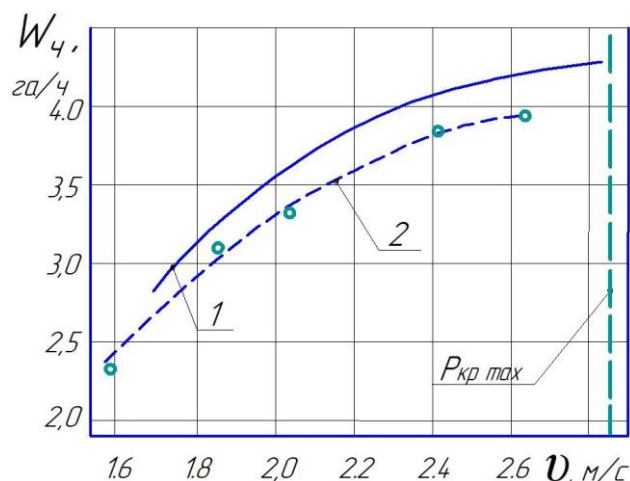


Рис. 5 – Зависимость часовой производительности  $W_q$  от скорости движения  $v$  агрегата К-9430+ПБС-8х70П:  
1 – теоретическая зависимость; 2 – экспериментальная зависимость;  $P_{kp}$  – максимальное тяговое усилие трактора

#### Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований применения технологии полосовой обработки почвы (Strip-till) предложена комбинированная технология и почвообрабатывающий агрегат для условий недостаточного

увлажнения возделывания пропашных культур. Полученные результаты экспериментальных исследований эксплуатационно-технологических показателей агрегата ПБС-8х70П, реализующего технологию комбинированной обработки почвы в регионе сухого земледелия, показали, что основная масса пожнивных и растительных остатков располагается на поверхности поля между полосами. При работе пахотного агрегата К-9430+ПБС-8х70П происходит крошение почвы в полосе шириной 30см на глубину до 0,3м, с производительностью 2,4-4,0га/ч в диапазоне скоростей 1,6-2,6м/с.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Практика внедрения технологии Strip-till в России. [Электронный ресурс]. URL: <http://agropost.ru/rastenievodstvo/zemledelie/praktika-vnedreniya-tehnologii-strip-till-v-rossii.html>. (дата обращения: 14.11.2020)
2. Что такое strip-till? Плюсы и минусы щадящей обработки почвы. [Электронный ресурс]. URL: <https://aggeek.net/ru-blog/chto-takoe-strip-till-plyusy-i-minusy-schadyaschej-obrabotki-pochvy>. (дата обращения: 14.11.2020)
3. Технология Стрип Тилл Strip Till. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.striptill.ru/catalog/tehnologiya-strip-till-strip-till.html>. (дата обращения: 14.11.2020)
4. Шабаев, А.И. Адаптивно-экологические системы земледелия в агроландшафтах Поволжья / А.И. Шабаев. – Саратов, 2003. – 320 с.
5. Несмиян, А.Ю. Машинно-технологическое обоснование процессов обработки почвы и посева пропашных культур в условиях дефицита влаги / А.Ю. Несмиян: дисс. ...д-ра техн.наук. -Зерноград, 2017. -424с.
6. Борисенко, И.Б. Совершенствование ресурсосберегающих и почвозащитных технологий и технических средств обработки почвы в острозасушливых условиях Нижнего Поволжья / И.Б. Борисенко: автореф. дис. ...д-ра техн. наук. – Чебоксары, 2006. – 42 с.
7. Машины для стрип – тилл. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.agrocounsel.ru/mashiny-dlya-strip-till>. (дата обращения: 14.11.2020)
8. Бойков, В.М. Классификация машин для полосовой технологии обработки почвы / Бойков В.М., Старцев С.В., Воронников И.Л., Нарусhev В.Б.// Аграрный научный журнал. № 5. 2020. С. 72-76.
9. Борисенко, И.Б. Технологическая схема рабочего органа для полосной глубокой обработки почвы / И.Б. Борисенко, М.В. Соколова // Нива Поволжья. - 2014. - №3. - С.44-48.
10. Милюткин, В.А. Совершенствование технических средств для технологии "Strip-Till" / Милюткин В.А., Бородулин И.В., Антонова З.П., Стребков Н.Ф. – [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23280852> (дата обращения: 14.11.2020)
11. Сафиуллин, М.Р. STRIP-TILL в России / М.Р. Сафиуллин // Ресурсосберегающее земледелие. –2012. -№4. – С. 13 –16.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Praktika vnedreniya tehnologii Strip-till v Rossii [The practice of implementing Strip-till technology in Russia]. [Electronic resource] URL: <http://agropost.ru/rastenievodstvo/zemledelie/praktika-vnedreniya-tehnologii-strip-till-v-rossii.html>. (accessed: 14.11.2020) [in Russian]
2. Chto takoe strip-till? Pljusy i minusy shhadjashhej obrabotki pochvy [What is strip-till? Pros and cons of gentle tillage]. [Electronic resource] URL: <https://aggeek.net/ru-blog/chto-takoe-strip-till-plyusy-i-minusy-schadyaschej-obrabotki-pochvy>. (accessed: 14.11.2020) [in Russian]
3. Tehnologija Strip Till Strip Till [Technology Strip Till Strip Till]. [Electronic resource] URL: <http://www.striptill.ru/catalog/tehnologiya-strip-till-strip-till.html>. (accessed: 14.11.2020) [in Russian]
4. Shabaev, A. I. Adaptivno-jekologicheskie sistemy zemledelija v agrolandshtah Povolzh'ja [Adaptive-ecological systems of agriculture in agricultural landscapes of the Volga region] / A. I. Shabaev. - Saratov, 2003. - 320 p. [in Russian]
5. Nesmian, A. Y. Mashinno-tehnologicheskoe obosnovanie processov obrabotki pochvy i poseva propashnyh kul'tur v uslovijah deficita vlagi [Machine-technological substantiation of the processes of tillage and sowing of row crops in conditions of moisture deficiency] / A.Yu. Nesmijan diss. ... doctor of technical sciences. - Zernograd, 2017. – 424 p. [in Russian]
6. Borisenko, I. B. Sovershenstvovanie resursoberegajushhih i pochvozashhitnyh tehnologij i tehicheskikh sredstv obrabotki pochvy v ostrozasushlivykh uslovijah Nizhnego Povolzh'ja [Improvement of resource-saving and soil protection technologies and technical means of soil treatment in the acute arid conditions of the Lower Volga region] / I.B. Borisenko: autoref. dis. ... doctor of technical sciences. Cheboksary, 2006, 42 p. [in Russian]
7. Mashiny dlja strip – till [Machines for strip till]. [Electronic resource] URL: <http://www.agrocounsel.ru/mashiny-dlya-strip-till>. (accessed: 14.11.2020) [in Russian]
8. Boikov, V. M. Klassifikacija mashin dlja polosovoj tehnologii obrabotki pochvy [Classification of machines for strip technology of soil treatment] / Boikov V. M., Startsev S. V., Voronnikov I. L., Narushev V. B. // Agrarnyj nauchnyj zhurnal [Agrarian Scientific Journal]. No. 5. 2020.- p. 72-76. [in Russian]
9. Borisenko, I. B. Tehnologicheskaja shema rabocheho organa dlja polosnoj glubokoj obrabotki pochvy [Technological scheme of the working body for strip deep tillage] / I. B. Borisenko, M. V. Sokolova // Niva Povolzh'ja. No. 3. 2014. - p. 44-48. [in Russian]
10. Milyutkin, V.A. Sovershenstvovanie tehicheskikh sredstv dlja tehnologij "Strip-Till" [Improvement of technical means for the "Strip-Till" technology] / Milyutkin V. A., Borodulin I. V., Antonova Z. P., Strebkov N. F. – [Electronic resource] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23280852> (accessed: 14.11.2020) [in Russian]
11. Safiullin, M. R. STRIP-TILL v Rossii [STRIP-TILL in Russia] / M. R. Safiullin // Resursoberegajushhee zemledelie [Resource-saving agriculture]. No.4. 2012. - p.13 -16. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.006>

## СВЕРТОЧНАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МЕТОДОМ К-СРЕДНИХ

Научная статья

Воробжанский Н.Н.\*

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

\* Корреспондирующий автор (vorobzh[at]gmail.com)

## Аннотация

Задача маркировки данных для обучения глубоких нейронных сетей представляет собой сложный и утомительный процесс, требующий получения миллионов пометок для достижения необходимых результатов. Такая зависимость от большого объема размеченных данных может быть снижена за счет использования иерархических признаков, полученных посредством методик обучения без учителя. В этой работе предлагается обучить глубокую сверточную нейронную сеть, построенную на улучшенной версии метода кластеризации k-средних, который сокращает число коррелируемых параметров в виде похожих фильтров, и таким образом увеличивает точность категоризации на тестовой выборке. Подобный метод можно назвать кластеризацией сверточных k-средних. В дальнейшем будет показано, что обучение соединениям между слоями глубокой сверточной нейронной сети улучшает ее способности обучаться на меньшем числе размеченных данных. Эксперименты показывают, что предложенный алгоритм существенно превосходит другие методики, которые обучаются фильтрам без учителя. Так, на STL-10 была получена точность на тестовой выборке в 70.5%.

**Ключевые слова:** алгоритм кластеризации k-средних, сверточная нейронная сеть (CNN), обучение без учителя.

## CONVOLUTIONAL K-MEANS CLUSTERING

Research article

Vorobzhansky N.N.\*

Voronezh State University, Voronezh, Russia

\* Corresponding author (vorobzh[at]gmail.com)

## Abstract

The task of marking data for deep neural network training is a complex and tedious process that requires millions of marks to achieve the necessary results. This dependence on a large amount of labeled data can be reduced by using hierarchical features obtained through unsupervised learning techniques. In this study, the authors propose a deep convolutional neural network training based on an improved version of the k-means clustering method, which reduces the number of correlated parameters in the form of similar filters, and thus increases the accuracy of categorization on test samples. Such a method can be called convolutional k-means clustering. Further into the article, the study demonstrates that learning connections between layers of a deep convolutional neural network improves its ability to learn on a smaller number of labeled data. Experiments show that the proposed algorithm is significantly superior to other methods that learn filters without supervision. Therefore, on the STL-10, the test sample demonstrated an accuracy of 70.5%.

**Keywords:** k-means clustering algorithm, convolutional neural network (CNN), unsupervised learning.

## Введение

Для обучения глубоких нейронных сетей требуется большое количество данных. В крупных наборах данных методы обучения с учителем прекрасно себя зарекомендовали в последние годы благодаря достижениям в параллельных вычислениях [1]. Популярны наборы данных, такие как ImageNet [2], содержат более чем один миллион размеченных образцов, но даже этого недостаточно, и исследователи нуждаются в еще более крупных наборах данных в этой области. Расширяясь, наборы видеоданных становятся все более важными в контексте применения сверточных нейронных сетей для задач распознавания событий. Во всех таких сценариях, маркировка данных необходима, чтобы алгоритм обучения с учителем мог быть использован. Однако задача маркировки данных – довольно сложное занятие, которое занимает много времени. К примеру, несколько сотен часов были потрачены на создание ImageNet и тысячи часов могут понадобиться для аннотирования самого простого набора видеоданных [3]. Исследовательское сообщество искало способы обойти эту проблему и пришло к мнению, что серьезного прорыва можно достичь за счет использования неразмеченных данных, которые широко доступны в общем доступе в больших количествах. За последние десятилетия многочисленные исследования были посвящены обучению иерархических признаков для глубокого обучения в контексте распознавания изображений. Примеры включают в себя контролируемое, неконтролируемое, полу-контролируемое обучение. Такие методики глубокого обучения используют иерархию слоев, которые задействуют фильтры для извлечения многочисленных входных признаков и соединения для объединения извлеченных признаков вместе в качестве входных данных для следующего слоя. В более ранних исследованиях в этой области предварительное обучение без учителя было обязательным для обучения глубоких нейронных сетей посредством методик обучения с учителем. Недавние достижения в области сверточных нейронных сетей (CNN) в сочетании с большими объемами размеченных данных хорошо проявили себя в задачах распознавания образов для исправления этой проблемы [4].

С другой стороны, алгоритмы обучения без учителя, такие как кластеризация методом k-средних, также увеличили количество параметров в сети и достигли передовых результатов, в случаях, когда количество размеченных данных ограничено. Хотя методики обучения без учителя, использующие алгоритм k-средних, были, в основном, использованы для обучения фильтров в нескольких исследованиях [5], [6], полученная структура имела много сходств с CNN (сверточной нейронной сетью), такие как использование свертки и субдискретизации в каждом слое. Главное различие между CNN и методиками обучения без учителя на основе k-средних применительно к распознаванию изображений



заключается в количестве слоев (глубине), количестве фильтров (ширине) в каждом слое и соединениях между слоями. CNN повышают точность с помощью увеличения глубины и ширины сети. Недавние исследования показали, что на производительность значительное влияние оказала увеличенная глубина. И напротив, методики обучения без учителя для глубоких сетей не смогли масштабироваться до такой же глубины как обычные CNN. Таким образом, недавние исследования в области обучения без учителя используют большую ширину сети и 2-3 слоя с сужающимися выходными данными. В этой работе будет продемонстрировано, что изучение соединений между слоями глубокой нейронной сети играет ключевую роль в повышении производительности методик обучения без учителя.

Несмотря на то, что в ранних работах по CNN зачастую было принято полагаться на неполную схему соединений [7] для поддержания числа соединений в разумных пределах, в последнее время тренд изменился в сторону полносвязности слоев с целью использования всех возможностей, предоставляемых параллельными вычислениями. Полносвязные слои выполняют множество потенциально ненужных операций, поскольку они соединяют все объекты предыдущего слоя с каждым объектом следующего. В этом исследовании представлена улучшенная версия алгоритма кластеризации с обучением без учителя, позволяющая фильтрам обучаться различным признакам. Это достигается за счет предотвращения обучения алгоритмом излишних фильтров. Также к научной новизне этой работы можно отнести то, что изучение разреженных матриц соединений между слоями происходит посредством проецирования разреженных групп признаков в объект для следующего слоя. Было показано, что алгоритм сверточной кластеризации  $k$ -средних способен обеспечить сопоставимые иерархии признаков среднего уровня для контролируемых сетей с улучшенным обучением соединений.

### Методы и принципы исследования

Метод обучения фильтрам основан на алгоритме  $k$ -средних. Классический алгоритм  $k$ -средних находит центры масс кластеров, которые минимизируют расстояние между точками в евклидовом пространстве. В этом случае, точки являются случайным образом извлеченными фрагментами изображения, а центры масс – фильтрами, используемыми для кодирования изображений. С этой точки зрения, алгоритм  $k$ -средних обучается словарию  $D \in R^{n \times k}$  из вектора данных  $w^{(i)} \in R^n$  для  $i = 1, 2, \dots, m$ . Алгоритм обучается словарю следующим образом:

$$s_j^{(i)} = \begin{cases} D^{(j)T} w^{(i)}, & j = \arg \max_l \left| D^{(l)T} w^{(i)} \right| \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

$$D = WS^T + D$$

$$D^{(j)} = \frac{D^{(j)}}{\|D^{(j)}\|_2}$$

где  $s^{(i)} \in R^k$  — это кодовый вектор, ассоциированный с входом  $w^{(i)}$  и  $D^{(j)}$  -  $j$ -ая колонка  $D$ . Матрицы  $W \in R^{n \times m}$  и  $S \in R^{k \times m}$  имеют колонки  $w^{(i)}$  и  $s^{(i)}$  соответственно.  $w^{(i)}$  - выбранные случайным образом участки входных изображений, имеющие такую же размерность как векторы словаря  $D^{(j)}$ .

Описанная схема обучения обучает центры масс каждого кластера на уровне фрагмента, в то время как в CNN фильтры применяются к изображениям сверточным способом. Как можно увидеть из рис. 1, множество центров масс из обучения  $k$ -средними имеют практически такую же ориентацию и являются смещенными версиями друг друга в пространстве. Таким образом, после операции свертки они приведут к образованию излишних карт признаков на соседних областях. В следующем подразделе будут рассмотрена предлагаемая модификация алгоритма  $k$ -средних, которая сводит эту проблему к минимуму.

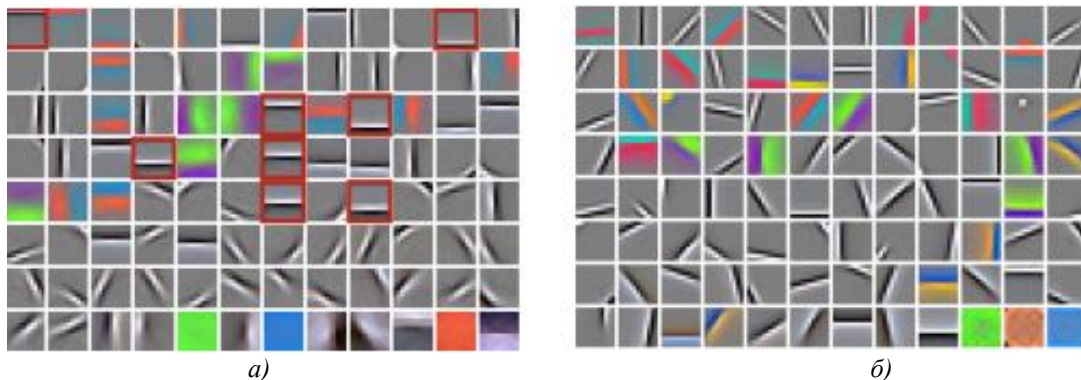


Рис. 1 – Фильтры обученные на STL-10 с помощью  $k$ -средних и сверточных  $k$ -средних: а) метод  $k$ -средних; б) сверточный метод  $k$ -средних

Для того чтобы снизить избыточность между фильтрами на соседних областях, был предложен новый метод извлечения фрагментов из изображений. Этот метод существенно снижает избыточность в центрах масс, получившихся в результате выполнения алгоритма k-средних, и оставляет только необходимый базис. Стандартный алгоритм k-средних извлекает случайные участки из входных изображений, чьи размеры соответствуют размерам центров масс. Напротив, предложенный метод использует более широкие окна в качестве входов для того, чтобы решить какой фрагмент извлечь для кластеризации.

Окна выбираются таким образом, чтобы быть в два раза больше, чем размер фильтра и извлекаются случайным образом из входных изображений. Центры масс алгоритма k-средних сворачивают окно целиком для вычисления меры сходства на каждом участке извлеченной области. Участок, соответствующий наибольшей активации из окна, считается наиболее похожим на центр масс. И наконец, участок на этой области (наибольшая активация) извлекается из окна и присваивается соответствующему центру масс. Измененный процесс обучения словаря можно записать следующим образом:

$$s_j^{(i)} = \begin{cases} D^{(j)^T} w_{(x,y)}^{(i)}, & (j, x, y) = \arg \max_{(l,m,n)} |D^{(l)^T} w_{(m,n)}^{(i)}| \\ 0 & \end{cases}$$

$$D = W_{(x,y)} S^T + D$$

$$D^{(j)} = \frac{D^{(j)}}{\|D^{(j)}\|_2}$$
(2)

где  $D^{(j)}$  -  $j$ -ая колонка словаря, которая соответствует  $c \times s \times s$  ядру 3D-фильтра и  $W^{(i)}$  - окно размером  $c \times 2s \times 2s$ .  $x$  и  $y$  - индекс входного участка,  $W_{(x,y)}^{(i)}$  - извлеченный участок из области  $(x, y)$  размером  $c \times s \times s$ .

После того, как скоррелированные фильтры удалены, у новых фильтров появляется больше возможностей для обучения дополнительным признакам. Фильтры, которые обучаются с помощью k-средних и сверточных k-средних представлены на рис. 1. Как можно увидеть, фильтры, которые обучались на уровне участков с помощью алгоритма k-средних имеют похожие признаки, но на разных областях внутри участка.

В работе также изучаются способы обучения соединениям от одного слоя сети к следующему. В то время как полносвязные слои используют все признаки предыдущего слоя при переходе к следующему слою, в работе используются неполные соединения, которые более эффективны при вычислениях. Эти неполные соединения используют несколько групп, каждая из которых включает ограниченную порцию признаков предыдущих слоев. Используется матрица разреженных соединений, которая ограничивает локальное рецептивное поле. Следовательно, становится возможным избежать низкой эффективности алгоритма k-средних, когда входные данные обладают большой размерностью.

Метод использует обучение с учителем на ограниченном наборе данных во время обучения весам соединений между слоями. Соединения описываются полносвязной матрицей весов, агрегирующей карты признаков. Таким образом, одно значение в матрице весов отражает то, насколько этот признак важен для соответствующей группы. Для обучения взаимосвязям между картами и организации их в группы добавляется сверточный слой с заранее заданным неполным соединением. Добавляется линейный классификатор после сверточного слоя и обучается система посредством обратного распространения ошибки. Интуиция этой настройки заключается в том, что, так как новым фильтрам обучаются из групп признаков и каждая матрица весов агрегирует признаки, чей выход находится в заранее определенной группе, матрица весов в действительности вынуждена обучаться правильным соединениям между входными картами признаков и предопределенными группами в процессе обучения. Таким образом, даже несмотря на то, что соединения сверточного слоя были предопределены, матрица весов обеспечила достаточную гибкость для определения соединений на практике.

Необходимо заметить, что матрица весов, агрегирующая карты признаков, может быть рассмотрена как одномерный полносвязный сверточный слой с активированным смещением. Такой подход позволяет ограничить локальное рецептивное поле для алгоритма k-средних. После того как завершится контролируемое обучение соединениям, выученные фильтры удаляются из сети и остается только матрица соединений. Затем алгоритм сверточных k-средних применяется вновь к предварительно обученной матрице соединений для обучения фильтрам для следующего слоя. Детали и экспериментальные результаты представлены в следующем разделе.

### Основные результаты

Эксперименты были проведены, сочетая

- 1) выученные с учителем и без учителя фильтры
- 2) выученные с учителем фильтры и случайные соединения между слоями.

Эксперименты призваны продемонстрировать важность обучения соединениям. Пусть имеется двухслойная нейронная сеть. Первый слой имеет 96 фильтров размерами  $13 \times 13$ . Сверточный слой применяется с шагом 4 и формируемый результат корректируется ReLU. Между извлечением признаков первого и второго слоев предварительно определяются группы как 4 последовательных карты признаков, что в итоге дает результат в виде 24 групп. Из каждой группы можно обучиться 64 фильтрам, размер фильтра второго слоя выбран  $4 \times 5 \times 5$ , это исходит из выбора

предопределенной неполной схемы соединений. После свертки с фильтрами применяется операция субдискретизации  $6 \times 6$  для снижения размерности. Функция активации ReLU следует за операцией подвыборки. Используется линейный классификатор с 2 слоями с 512 скрытыми нейронами и дропаут регуляризацией.

Для обучения фильтрам без учителя применяется сверточный алгоритм k-средних к немаркированным данным. Случайное соединение относится к случаю, когда фильтры первого слоя соединены со вторым по предопределенной схеме соединения. Контролируемое соединение относится к случаю, когда обучается матрица контролируемых соединений  $96 \times 96$  перед заранее определенной схемой соединения. Фильтры второго слоя и матрица соединений обучаются вместе, это заставляет матрицу соединений организовать карты признаков таким образом, чтобы каждая группа содержала объекты, которые необходимо объединить вместе. Чтобы обучиться фильтрам второго слоя неконтролируемым способом с контролируемыми соединениями, необходимо исправить обученную с учителем матрицу соединений и обучить локальные фильтры для каждой группы методом сверточных k-средних.

В таблице 1 представлены результаты этих экспериментов.

Таблица 1 – Точность классификации на тестовой выборке STL-10 и 2 слоев сети

Первый слой	Соединение	Второй слой	Точность, %
С учителем	С учителем	С учителем	60.5
Без учителя	Случайное	С учителем	63.8
Без учителя	Случайное	Без учителя	64.3
Без учителя	С учителем	С учителем	65.9
Без учителя	С учителем	Без учителя	66.7

Во-первых, обучение всей сети с помощью обучения с учителем дает более низкую точность, как и ожидалось, так как имеет место быть переобучение на ограниченном наборе размеченных данных. Обучение без учителя для первого слоя обеспечило значительное повышение производительности по сравнению с сетью, обученной полностью с учителем. В экспериментах контролируемое обучение соединениям повышает производительность для каждого случая, хотя обучение без учителя все же дает более высокую производительность. Алгоритм обучения K-средних требует увеличения количества фильтров для получения сопоставимых результатов в сравнении с контролируемым алгоритмом обратного распространения ошибки. Несмотря на то, что контролируемый алгоритм может более эффективно представлять данные с меньшим количеством фильтров, он теряет точность и переобучается на обучающем наборе при увеличении количества фильтров. Напротив, неконтролируемый алгоритм (сверточный k-средних) плохо работает с небольшим количеством фильтров. Эта разница может быть из-за того, что контролируемый алгоритм обучается отличительным признакам, тогда как k-средних обучается любым часто встречающимся признакам.

Наконец, сравним метод с опубликованными современными методами на наборе данных STL-10. В рамках сравнения, в основном, обратим внимание на алгоритмы, которые обучаются фильтрам без учителя. Подход с использованием нескольких словарей (Coates & Ng, 2011b [6]; Lin & Kung, 2014 [8]) – это объединение представлений, которые вычисляются в разных слоях (т. е. выходных значений), в виде вектора признаков изображения. Используются те же параметры обучения и предварительная обработка, которые использовались в других экспериментах.

Для анализа результатов классификации используются двухслойные сети. Однако, увеличивается размер сети, шаг в первом слое заменяется на операцию подвыборки  $2 \times 2$ , которая увеличивает точность. Дополнительно увеличивается точность за счет подхода с несколькими словарями. Так, для двух слоев с мультисловарной сетью используется аналогичная сеть из эксперимента с двумя слоями, в котором были получены 64 фильтра из каждых 24 групп на выходе из первого слоя. Эта сеть объединяется с однослойной сетью с 512 фильтрами. Однослойная сеть также включает активацию ReLU и операцию подвыборки для уменьшения размера вывода до  $512 \times 4 \times 4$ . Как видно из табл. 2 [9], [10], [11], двухуровневая сеть с несколькими словарями обеспечивает точность 70,5%. Необходимо обратить внимание, что это значение значительно выше, чем у всех ранее представленных неконтролируемых методов обучения. При этом сеть на порядок меньше (по количеству параметров) чем сети, использованные в (Coates & Ng, 2011b; Lin & Kung, 2014). В табл. 3 приведены для сравнения методики контролируемого и частично контролируемого обучения, как можно увидеть, предложенный алгоритм обладает достаточно высокой точностью и находится с ними примерно на одном уровне по точности.

Таблица 2 – Точность классификации на STL-10 и 2 слоях сети (обучение фильтрам без учителя)

Алгоритм	Точность, %
Coates & Ng (2011) (1 слой)	61.5
Hui (2013) (3 слоя)	65.8
Lin & Kung (2014) (3 слоя и мультисловарь)	66.4
Предложенный метод	70.5

Таблица 3 – Точность классификации на STL-10 и 2 слоях сети (обучение фильтрам с учителем и с частичным привлечением)

Алгоритм	Точность, %
Swersky (2013)	69.5
Zhao (2015) (автокодировщик с частичным контролем)	73.7
Dosovitskiy (2014)	71.9

Предложенный алгоритм был реализован на языке Python с использованием фреймворка TensorFlow и выполнен на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-4770, 16 GB RAM и графическим процессором NVIDIA Titan X GPU с 12 GB RAM, время выполнения составило около 9 часов, что является приемлемым значением, учитывая размер выборки STL-10 (более ста тысяч изображений). Алгоритм возможно запустить на процессорах серии Intel Core i5, 8 GB RAM и видеокартах с 2 GB памяти, однако время выполнения вырастет в несколько раз.

### Заключение

Был разработан новый алгоритм, который сочетает в себе сильные стороны кластеризации без учителя, метода k-средних и сверточных нейронных сетей, для условий, когда лишь очень малая часть входных данных является размеченной. Алгоритм модифицирует стандартный метод кластеризации k-средних, так что при использовании с CNN он не обучается избыточным фильтрам на соседних областях. Также была предложена настройка обучения с учителем для обучения подходящим соединениям между слоями. Эксперименты показали, что предложенный алгоритм имеет наибольшую эффективность в сравнении с актуальными методиками, которые обучаются фильтрам в нейронной сети без учителя.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Szegedy C. Going deeper with convolutions / C. Szegedy et al. // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. P. 1-9.
2. Deng J. Imagenet: A large-scale hierarchical image database / J. Deng et al. // In CVPR. 2009. P. 248–255.
3. Russakovsky O. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge / O. Russakovsky et al. // International Journal of Computer Vision (IJCV). April 2015. P. 1–42.
4. Krizhevsky A. Imagenet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. Hinton // In Advances in neural information processing systems. 2012. P. 1097–1105.
5. Coates A. The importance of encoding versus training with sparse coding and vector quantization / A. Coates, A. Ng // In ICML. 2011. P. 921–928.
6. Coates A. Selecting receptive fields in deep networks / A. Coates, A. Ng // In Advances in Neural Information Processing Systems. 2011. P. 2528–2536
7. LeCun Y. Gradient-based learning applied to document recognition / LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. // Proceedings of the IEEE. 1998. Vol. 86, № 11. P. 2278–2324.
8. Lin T. Stable and efficient representation learning with nonnegativity constraints / T. Lin, H. Kung // In ICML. 2014. P. 1323–1331.
9. Hui K. Direct modeling of complex invariances for visual object features / K. Hui // In Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning (ICML-13). 2013. P. 352–360.
10. Swersky K. Multi-task bayesian optimization / K. Swersky, J. Snoek, R. Adams // In Advances in Neural Information Processing Systems. 2013. P. 2004–2012.
11. Dosovitskiy A. Discriminative unsupervised feature learning with convolutional neural networks / A. Dosovitskiy et al. // In Advances in Neural Information Processing Systems. 2014. P. 766–774.



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.007>**ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА СЛУЖЕБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

Научная статья

**Верховский А.Е.<sup>1</sup>, Гаджиев К.Г.<sup>2</sup>, Уртенов Д.С.<sup>3</sup>, Гаджиев Д.К.<sup>4</sup>\***<sup>1, 2, 4</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия;<sup>1, 3</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (vokrugsveta18[at]gmail.com)

**Аннотация**

На судовых атомных паропроизводящих установках свыше трех десятилетий эксплуатируются парогенераторы из титановых сплавов. Надежная эксплуатация этих парогенераторов работающих с высокими тепловыми нагрузками поверхностей связана с высокой чистотой поверхностей и отсутствием коррозионных разрушений. Особое внимание необходимо уделять узлам сварки коллекторных труб, а также участкам наибольших напряжений.

Целью данной работы является анализ результатов испытаний по влиянию водорода на конструкционную устойчивость титановых сплавов и определение наиболее уязвимых участков титановых труб парогенераторов после эксплуатации с использованием импульсно-спектрального метода с учетом анализа результатов механических испытаний опытных образцов.

**Ключевые слова:** водород, охрупчивание, коррозия, сплав, цикл.

**INFLUENCE OF HYDROGENATION AND TEMPERATURE ON THE SERVICE CHARACTERISTICS  
OF TITANIUM ALLOY**

Research article

**Verkhovsky A.E.<sup>1</sup>, Gadzhiev K.G.<sup>2</sup>, Urtenov D.S.<sup>3</sup>, Gadzhiev D.K.<sup>4</sup>\***<sup>1, 2, 4</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia;<sup>1, 3</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

\* Corresponding author (vokrugsveta18[at]gmail.com)

**Abstract**

The nuclear marine steam generating systems have been using steam generators made of titanium alloys for more than three decades. A reliable operation of these steam generators that work with high thermal loads of surfaces can be attributed to the high cleanliness of the surfaces and the absence of corrosion damage. The welding sites of collector pipes, as well as the areas of the highest stresses, require particular attention.

The aim of the study is to analyze the results of tests on the effect of hydrogen on the structural stability of titanium alloys and to determine the most vulnerable areas of titanium pipes of steam generators after operation via the pulse spectral method while taking into account the analysis of the results of mechanical tests of prototypes.

**Keywords:** hydrogen, embrittlement, corrosion, alloy, cycle.

**Введение**

В активных зонах с дисперсионной топливной композицией коррозия оболочек твэлов сопровождалась в некоторых случаях разгерметизацией оболочек твэлов. Этому предшествовало значительное увеличение содержания аммиака в теплоносителе первого контура, вызванное очаговой коррозией циркониевого сплава Э110. Накапливающийся вследствие коррозии по реакции  $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$  водород в воде первого контура взаимодействует с азотом, поступающим из компенсатора объема, и образует аммиак по реакции  $3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$ .

В стационарном состоянии в воде контура между аммиаком, водородом и азотом существует зависимость, описываемая полуэмпирической формулой

$$[NH_3] = 1,8 \cdot \sqrt{[N_2]} \cdot [H_2], \quad (1)$$

где  $[NH_3]$  – молярная концентрация аммиака, моль/дм<sup>3</sup>;

$[N_2]$  – молярная концентрация азота, моль/дм<sup>3</sup>;

$[H_2]$  – молярная концентрация водорода, моль/дм<sup>3</sup>.

При этом концентрации 1 мг/л аммиака, как правило, соответствует концентрация  $\sim 2$  нмл/л водорода в воде контура.

Теплоноситель первого контура, содержащий водород, поступает в межтрубное пространство парогенераторов, трубчатка которых изготовлена из титанового сплава ПТ-7М.

Водород диффундирует в титановый сплав и приводит к его водородному охрупчиванию. Скорость наводороживания зависит от ряда факторов.

В первую очередь она зависит от содержания водорода в теплоносителе и продолжительности нахождения в нем. Факторы, влияющие на наводороживание, изложены в работе [7].

Согласно [7] вблизи сварных швов наблюдается повышенное содержание водорода. Это влияет на их высокое водородное охрупчивание. Кроме того, повышенное наводороживание наблюдается в случае поверхностного загрязнения титана железо-окисными соединениями. Железо играет роль катализатора наводороживания за счет образования активных центров абсорбции водорода [7]. Механические свойства титановых сплавов зависят от содержания водорода и времени работы на мощности.

Существенное влияние наводороживание оказывает на такую важную характеристику, как ударная вязкость в условиях виброударных нагрузок. Такие условия реализуются в трубчатке ПГ атомных судов при работе в тяжелых льдах.

### Методы и принципы

В работе [9] исследована зависимость ударной вязкости титанового сплава ПТ-7М трубчатки ПГ от содержания в ней водорода при температуре испытания 20°C. Исследования проводились для сплава, проработавшего на атомном судне в течении ~ 65 тыс. часов при температуре ~ 250°C. В табл. 1 приводится зависимость ударной вязкости от содержания водорода в титане [11].

Таблица 1 – Зависимость ударной вязкости от содержания водорода в титане

№ п/п	Содержание водорода, % масс	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
1	0,003	1,30
2	0,010	0,30
3	0,025	0,15

Наблюдается резкое снижение ударной вязкости сплава при увеличении содержания водорода, т.е. практически полностью деградирует его ударная вязкость при температуре 20°C.

В работе [9] исследовано интегральное содержание водорода (в составе гидридов и в твердом растворе) коллекторных труб трубчатки ПГ-28, отработавших на а/л «Вайгач».

Измерения проводились импульсно-спектральным методом на разных участках по длине труб, включая участок вблизи сварного шва, у резьбопаяного соединения. Результаты измерений даны в табл. 2 (табл.2 из указанной работы).

Обнаружено аномально высокое содержание водорода вблизи сварного шва, особенно с внутренней стороны трубы, которая в рабочих условиях имеет более низкую температуру, чем внешняя, и куда мигрирует водород. Средний же уровень содержания водорода в трубной системе из титана, выработавшей свой проектный ресурс, на а/л «Вайгач» (~ 68 тыс. часов) составил 0,025%.

Таблица 2 – Содержание водорода в коллекторной трубе Ø 22×2,5 мм

Поверхность трубки	Расстояние от края сварного шва, мм	Содержание водорода, %
Внешняя	7	0,120
	40	0,077
	70	0,040
Внутренняя	7	0,150

Разница между максимальным и средним содержанием водорода достигла шести раз.

Эксплуатация АППУ на а/л «Вайгач» проводилась при низком содержании аммиака в теплоносителе первого контура. Она перед отказами шести секций ПГ не превышало 60 мг/л, т.е. ~ 120 нмл/л по водороду.

Таким образом, диффузия водорода происходила за ~67 тыс. час. в локальном участке коллекторной трубы при низком содержании аммиака (водорода) в теплоносителе первого контура. Этот участок расположен на входе питательной воды второго контура в парогенератор. Температура ее 104°C.

Температура же титанового сплава на этом участке, по мнению исследователей коллекторных труб, была близка к этой температуре.

Это объясняется образованием застойной зоны на этом участке и захлаживанием в ней температуры воды первого контура.

Следствием этого является низкая растворимость водорода в титане и образование гидридных включений в нем. Они расположены по линиям наибольших напряжений и приводят к охрупчиванию сплава. Об этом свидетельствуют результаты испытаний коллекторных трубок с а/л «Вайгач» на сплющивание, представленные в табл. 3.

Испытания проводились при комнатной температуре.

Таблица 3 – Результаты испытаний на сплющивание фрагментов коллекторных труб из сплава ПТ-7М

Расстояние от края сварного шва до середины образца, мм	Усилие сплющивания, кг	Поведение образца при сплющивании
7	100	Хрупкое разрушение
40	550	
70	700	Без разрушений

Проведены испытания также при циклической изгибающей нагрузке образцов коллекторных труб, отработавших на а/л «Вайгач» ~ 67 тыс. час. и имеющих внутренние трещины глубиной до 0,5 мм. Одновременно проводились испытания образцов коллекторных труб в исходном состоянии. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний на усталость образцов узлов «втулка РПС/коллекторная труба Ø22×2,5 мм»

№ п/п	Испытуемые образцы	Содержание водорода, % масс	Максимальная амплитуда напряжений, МПа	Число циклов до разрушения	Положение трещины
1	Модельные образцы (исходное состояние)	≤0,003	475	8,2×104	По краю сварного шва №62 со стороны коллекторной трубы Ø22×2,5 мм
		"-	550	4,05×104	
		"-	630	1,52×104	
2	Натурные образцы после холодного хранения	от 0,12 до 0,15	230	1	По коллекторной трубке Ø22×2,5 мм на расстоянии 2...3 мм от сварного шва №62
			280	1	
3	Натурные образцы (фрагменты трубной системы ПГ-28 после холодного хранения и восстановительной термообработки при 400°С, 2 часа)	"-	150	1,23×103	По коллекторной трубке Ø22×2,5 мм на расстоянии 2...3 мм от сварного шва №62
			194	1,10×103	
			200	1,21×104	

В исходном состоянии фрагменты труб обладали высоким уровнем усталостной прочности, которая резко снизилась за время эксплуатации из-за значительного водородного охрупчивания. Испытания проводились после холодного хранения.

Разрушения образцов произошло на расстоянии от 2 до 3 мм от сварного шва после одного цикла испытаний. Отжиг при 400°С позволил снизить эффект водородного охрупчивания. Результаты изложенных испытаний позволили установить картину постепенного повреждения коллекторных труб в процессе эксплуатации.

Она состояла из:

- локального повышенного внедрения водорода в титановый сплав, сопровождающегося образованием гидридных включений на внутренней стороне труб и трещин на ней глубиной до 0,5 мм различной направленности.
- снижения циклической прочности труб на указанном участке вблизи сварного шва.
- повышенной концентрации циклических напряжений в локальном участке трубы из-за конструктивных особенностей узла приварки коллекторной трубы к втулке РПС.

### Вывод

Из анализируемых данных следует:

1. Значительный вклад в снижение ресурсных характеристик трубчатки ПГ-28 был внесен повышенным внедрением водорода из среды первого контура в локальный участок коллекторной трубы Ø22×2,5 мм. Располагался он в верхней части ПГ на входе питательной воды во второй контур. На этом участке созданы условия для низкой растворимости водорода в воде первого контура и в титановом сплаве с образованием гидридных включений в нем. Граница раздела "вода – газовая среда" эпизодически смещается вниз и указанный узел контактирует с азотно-водородной средой.

2. Образуются участки коллекторных труб, чувствительные к содержанию водорода в теплоносителе первого контура и в газовой среде, что в свою очередь в сочетании с эксплуатационными факторами (виброударными нагрузками) определяют ресурсные характеристики трубчатки ПГ-28 из титанового сплава.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Бахметьев А.М. Анализ возможных причин и механизмов отказов трубных систем парогенераторов атомных судов / А.М. Бахметьев, Н.Г. Сандлер, И.А. Былов, А.В. Бакланов, М.М. Кашка, С.В. Филимошкин// Арктика: экология и экономика. – 2013. - № 3 (11).
2. Бухримов В.В. Тепломассообмен: учебное пособие / В.В. Бухримов. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2014. – 360 с.
3. Верховский А.Е Расчет водно-химических режимов ТЭС: учебное пособие / А.Е. Верховский – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 48 с.
4. Воронов В.Н. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС: учебное пособие / В.Н. Воронов, Т.И. Петрова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 240 с.
5. Галин Н.М. Тепломассообмен (в ядерной энергетике) / Н.М. Галин, Л.П. Кириллов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.
6. Голубцов В.А. Обработка воды на ТЭС / В.А. Голубцов. - Л.: Энергия, 1974. - 360 с.
7. Руског Ю.С. Титановые конструкционные сплавы в химических производствах: справочник / Ю.С. Руског. – М: Химия, 2009. – 285 с.

8. Исследование титановых сплавов 48Т7М и 48-ОТ3В после испытаний в водных петлях реактора "МР" и в колоннах реактора, а/л "Л. Брежнев" / отчет ИАЭ и ЦНИИ "Прометей", 1984.

9. Полунатурные ресурсные испытания фрагментов трубной системы парогенератора ПГ-28 а/л «Вайгач» / отчет ФГУП «Прометей», 2004

10. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Bakhmetyev A.M. Analiz vozmozhnyh prichin i mehanizmov otkazov trubnyh sistem parogeneratorov atomnyh sudov [Analysis of Possible Causes and Mechanisms of Failures of Pipe Systems of Steam Generators of Nuclear Vessels] / A.M. Bakhmetyev, N.G. Sandler, I.A. Bylov, A.V. Baklanov, M.M. Kashka, S.V. Filimoshkin // Arktika: jekologija i jekonomika [Arctic: ecology and economics]. - 2013. - N. 3 (11).

2. Bukhrimov V.V. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]: a tutorial / V.V. Bukhrimov. - Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin ", 2014. P – 360.

3. Verkhovsky A.E. Raschet vodno-himicheskikh rezhimov TJeS [Calculation of water-chemical regimes of thermal power plants]: a tutorial / A.E. Verkhovsky - Moscow: MPEI Publishing House, 2011 .P–48.

4. Voronov V.N. Vodno-himicheskie rezhimy TJeS i AJeS [Water-chemical regimes of TPP and NPP]: textbook / V.N. Voronov, T.I. Petrova. - M.: Publishing house MEI, 2009 .P–240.

5. Galin N.M. Teplomassoobmen (v jadernoj jenergetike) [Heat and mass transfer (in nuclear power)] / N.M. Galin, L.P. Kirillov. - M.: Energoatomizdat, 1987 . P– 376.

6. Golubtsov V.A. Obrabotka vody na TJeS [Water Treatment at TPPs] / V.A. Golubtsov. - L.: Energy, 1974 . P–360.

7. Ruskog Yu.S. Titanovye konstrukcionnye splavy v himicheskikh proizvodstvakh [Titanium structural alloys in chemical industries]: a reference book / Yu.S. Ruskog. - M: Chemistry, 2009 . P –285 .

8. Issledovanie titanovyh splavov 48Т7М i 48-ОТ3В после ispytaniy v vodnyh petljah reaktora "MR" i v kolonah reactor [Study of titanium alloys 48Т7М and 48-ОТ3В after testing in water loops of the "MR" reactor and in the columns of the reactor], a /1 "L. Brezhnev" / report of the IAE and Central Research Institute "Prometey", 1984.

9. Polunaturnye resursnye ispytaniya fragmentov trubnoj sistemy parogeneratora PG-28 a/l «Vajgach» [Semi-natural life tests of fragments of the pipe system of the steam generator PG-28 of a /1 "Vaigach"] / report of FSUE "Prometey", 2004.

10. Isachenko V.P. Teploperedacha [Heat transfer]: textbook for universities / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. - M.: Energoizdat, 1981 .P– 416 .

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.008>**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ РАЙОНОВ ТАДЖИКИСТАНА**

Научная статья

**Гулов Д.Ю.<sup>1,\*</sup>, Давлатов А.М.<sup>2</sup>, Горт М.В.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6254-579X;<sup>1, 2, 3</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

\* Корреспондирующий автор (gdy\_02[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье представлен краткий анализ существующих проблем энергоснабжения удалённых и горных районов Таджикистана. В результате анализа проблем, усложняющих энергообеспечение удалённых районов отмечены вопросы, связанные с экономической эффективностью проектов внедрения мини-ГЭС и рисками их реализации. Предлагается для реализации проектов энергоснабжения проводить сравнительный анализ их экономической эффективности, учитывающий как чисто экономические показатели, так и надёжность работы гидроэлектростанции. При этом, появляется возможность снизить затраты на эксплуатацию за счёт диагностической системы, основанной на новом типе генераторов. В качестве источника энергии предлагается использовать малые водотоки. В статье показаны также проблемы, возникающие при реализации предлагаемой структуры, касающиеся в основном экономической эффективности и окупаемости проектов внедрения мини-ГЭС, а также пути их решения.

**Ключевые слова:** мини-ГЭС, инвестиции, чистая приведенная стоимость, окупаемость проекта, алгоритм оценки эффективности.

**EFFICIENCY OF ELECTRICITY SUPPLY IN MOUNTAINOUS REGIONS OF TAJIKISTAN**

Research article

**Gulov D.Yu.<sup>1,\*</sup>, Davlatov A.M.<sup>2</sup>, Gort M.V.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6254-579X;<sup>1, 2, 3</sup> South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

\* Corresponding author (gdy\_02[at]mail.ru)

**Abstract**

The article presents a brief analysis of the existing problems of electricity supply in remote and mountainous regions of Tajikistan. As a result of the analysis of problems that complicate the electricity supply of remote areas, the study explores the issues related to the economic efficiency of small-scale hydropower plant implementation projects and the risks of their implementation. The study proposes to carry out a comparative analysis of their economic efficiency for the implementation of power supply projects, taking into account both purely economic indicators and the reliability of the hydropower station. At the same time, it is possible to reduce operating costs due to a diagnostic system that is based on a new type of generator. As an energy source, the study proposes to use small watercourses. The article also demonstrates the problems that arise in the implementation of the proposed structure that are mainly related to the economic efficiency and payback of small-scale hydropower plant implementation projects as well as the ways to solve them.

**Keywords:** small-scale hydropower plant, investment, net present value, project payback, efficiency evaluation algorithm.

Мировое потребление энергии, по прогнозам на 2030 год, возрастет на 55% по сравнению с сегодняшним днём из-за экономического роста, урбанизации и роста населения. Удельный вес этого роста, в большей степени, придётся на развивающиеся страны. При этом, по прогнозам, большая часть требуемой энергии будет поступать за счёт ископаемого топлива. Существующие в настоящее время технологии использования возобновляемых источников энергии позволяют существенно повысить ресурсосбережение при производстве электроэнергии и имеют потенциал для удовлетворения мирового спроса на энергию [1]. Особенно, это касается труднодоступных и горных районов.

Для устранения проблем, связанных с энергообеспечением различных объектов и обусловленных изменением климата, рынком нефти, энергетической безопасностью и т.д., всё больше стран начинает усиленно развивать направления использования возобновляемых источников энергии.

В настоящее время указанные источники (в том числе крупной гидроэнергетики), по данным Global Status Report, составляют 19 процентов производства энергии в мире. При этом, около 6 процентов мирового объема электрической мощности составляют возобновляемые источники энергии, за исключением крупномасштабной гидроэнергетики и источников, использующих традиционную биомассу. Эта доля возрастает с каждым годом.

Доминирующим источником энергии, в настоящее время, является нефть, добыча которой достигнет максимума в ближайшие 10-20 лет. Наибольшее беспокойство вызывает не только факт снижения запасов углеводородов, но и слабое использование других, не углеводородных источников энергии.

Одной из самых существенных проблем, связанных с использованием углеводородов является глобальное изменение климата. По прогнозам на ближайшие 5 лет, экономические потери от стихийных бедствий, возникших от, предположительно, глобального потепления, оцениваются в 150 млрд. долларов в год.

В международном сообществе растёт осознание, что изменение климата, связанное с сжиганием ископаемого топлива, может представлять собой по масштабам большую угрозу, чем терроризм. Переход, хотя бы в области малой энергетики, на возобновляемые источники энергии может стать значительным шагом в области энергоэффективности и, как следствие, привести к сокращению выбросов в атмосферу. Это, по существу, в ближайшие десятилетия единственный путь, обусловленный общим развитием технологий во всех областях жизнедеятельности, который может препятствовать глобальному изменению климата.

Успешное функционирование экономики будущего невозможно без развития всех технологий, связанных с возобновляемой энергией вообще, и, в частности с гидроэнергетикой. При широком использовании последней снижаются риски, связанные с колебаниями рыночных цен на ископаемое топливо и проблемами его доставки и утилизации.

Развитие местной экономики, обусловленное ростом генерирующих мощностей за счёт возобновляемых источников энергии, вызовет рост количества рабочих мест и привлечённых инвестиций. По общим оценкам около 1,6 миллиарда человек, живущих в развивающихся странах, не имеют доступа к электроэнергии.

Строительство длинных линий электропередач от крупного производителя электроэнергии к малому и среднему потребителю весьма затратно. Также как строительство и дальнейшее обслуживание новых электростанций на ископаемом топливе. Малые и средние гидроэлектростанции могут стать наиболее приемлемыми источниками энергии для населения и экономического развития удалённых районов.

В настоящее время, например, энергетика такой горной страны как Таджикистан и её развитие в будущем тесно связано со значительными запасами гидроресурсов и ростом их использования для производства электроэнергии.

Детальное исследование энергетического потенциала водотоков республики было проведено Академией наук Таджикской ССР в 1955-1959 гг. Результаты исследования нашли отражение в фундаментальной коллективной работе 14-ти авторов «Гидроэнергетические ресурсы» (1965 г.) по руководством А.Н. Вознесенского [2], [3]. В этом труде собраны и проанализированы все материалы по исследованию энергетического потенциала водотоков республики до 1965 г. включительно.

За последние 50 лет, после выхода этой работы в Таджикистане не производились никакие исследования и расчёты по количественному и качественному уточнению гидроэнергетических ресурсов. При этом, по данным госстатистики, за прошедший период производство и потребление электроэнергии увеличилось в 11 раз и в 2011 г и достигло 17 млрд. кВт·ч [4]. На долю гидроэлектростанций приходится 99% вырабатываемой электроэнергии.

Согласно исследованиям [3], [5] в настоящее время общий энергетический потенциал водотоков Таджикистана оценивается, в среднем, мощностью в 51,8 млн. кВт. В том числе 511 исследованных рек имеют мощность 32,6 млн. кВт., а реки, длиной менее 10 км имеют мощность 19,5 млн. кВт.

Потенциальные гидроэнергетические ресурсы Таджикистана занимают второе место в СНГ, после России.

Гидротехнические ресурсы республики составляют 2100 тыс. [кВт·ч / км<sup>2</sup>].

Как показал анализ изыскательских и научно-исследовательских работ в различные временные периоды развития Таджикистана гидроэнергетические ресурсы республики, возможные к использованию составляют: по мощности - 19,3 млн. кВт, а по выработке - 143,6 млрд. кВт·ч.

Это указывает на существенные потенциальные возможности использования возобновляемых гидроэнергетических ресурсов Таджикской Республики.

Однако, кроме водотоков крупной и средней мощности республика обладает большим количеством рек малой мощности [6], [7]. Это гидроэнергетические ресурсы малых водотоков. В этом случае производство электроэнергии обеспечивается за счёт малых ГЭС. К этой группе относят гидроэлектростанции со следующими техническими характеристиками: общая мощность до 30 МВт, мощность единичного агрегата до 10 МВт, диаметр рабочего колеса турбины до 3 м. По мнению некоторых авторов [7], [8], валовый энергетический потенциал малой гидроэнергетики проблематично рассчитать по подобной классификации. Так как такие расчёты не связаны с техническими параметрами гидроэлектростанции. По существу, валовый потенциал - это полезная мощность, выделяемая при полном преобразовании в энергию среднегодового объёма данного ресурса.

Эта проблема имеет существенное значение, поскольку эффективность использования каждого энергоресурса в конкретных условиях обусловлена точностью всех технико-экономических расчётов. При этом, все расчёты потенциала энергоресурсов проводятся по различным методикам, основанных на разных моделях.

В настоящее время существенное значение имеет не только техническое, но и экономическое обоснование выбираемого типа мини-ГЭС.

Гидроэнергетические ресурсы, оцененные в 1967 году [9], показали, что гидроэлектростанции, относимые к категории малых, имеют параметры: на равнинных реках - до 2.0 МВт; на горных реках - до 1.7 МВт. Данные классификационные признаки оптимальны для условий республики.

Горные реки Таджикистана, к которым относятся практически все реки республики, имеют высокую скорость течения и длительный период не замерзания.

Это обстоятельство указывает на возможность построения мини-ГЭС бесплотинной конструкции в труднодоступных и удалённых местах.

Мини-ГЭС, как правило предполагается, устанавливаются на водотоках малых рек [8], [12], [13]. При этом, нет единого подхода к определению малых рек, которые являются одними из самых распространённых водных объектов в республике.

Критерии при определении понятий «малая река» и «малый водоток» могут быть весьма различны. Количественные критерии используются в соответствии с ГОСТ 17.1.1.02-77: площадь водосбора у малой реки не должна превышать 2000 км<sup>2</sup>, а средний многолетний сток в период минимального уровня воды не должен превышать 5 м<sup>3</sup>/с.

В то же время по другой классификации, длина малой реки не должна превышать 100 км, а площадь водосбора не более 200 км<sup>2</sup>.

Есть примеры классификаций, учитывающих использование малых рек для хозяйственных нужд. Однако, в Таджикистане отсутствует общепринятый подход к определению понятия «малая река». По официальным данным [9], использование гидроэнергетических ресурсов малых рек Средней Азии возможно в объёмах 3,1 млн. кВт или 27,2 млрд. кВт·ч. Распределение указанной мощности по государствам Средней Азии:

- Таджикистан 1,6 млн. кВт и 14 млрд. кВт·ч;
- Узбекистан 0,5 млн. кВт и 4,4 млрд. кВт·ч;

- Киргизистан-0,8 млн. кВт и 7,0 млрд. кВт·ч;
- Туркменистан 0,2 млн. кВт и 1,8 млрд. кВт·ч.

Таким образом, в Таджикистане сосредоточены 51,4% гидроэнергетических ресурсов малых рек Средней Азии.

В принятой Долгосрочной Программе строительства малых электростанций на период 2009–2020 гг, разработанной для освоения энергетических ресурсов малых рек, предусмотрено строительство 189 малых ГЭС общей полезной мощностью 26,8 МВт.

В настоящее время более 265 малых ГЭС введены в эксплуатацию. Они предназначены для электроснабжения труднодоступных горных районов. Мощность малых ГЭС варьируется от 5 до 2500 кВт.

На освоение гидроэнергетических ресурсов направлены значительные усилия правительства Республики Таджикистан. Это направление рассматривается как основное в развитии экономики республики не только для удовлетворения внутренних потребностей, но и увеличения экспорта электроэнергии. При этом, повышение надёжности мини-ГЭС и сокращение эксплуатационных расходов непосредственно связаны с задачей совершенствования элементного состава станции. Решение этой задачи заключается в отказе от традиционных способах регулирования основных выходных параметров мини-ГЭС и заменой их способами, основанными на современной элементной базе [14].

При принятии проекта к реализации необходимо учитывать многие факторы, влияющие на устойчивую работу объекта. Так в случае мини-ГЭС это тип источника питания (генератора) и другие элементы мини-ГЭС, позволяющие сделать её действительно автономным необслуживаемым объектом.

Эффективность проектных решений по внедрению проектов энергоснабжения определяется многими факторами, которые могут быть классифицированы в соответствии с общепринятой системой оценки экономической эффективности проектных решений. В систему оценки входят:

- сумма инвестиций, которая включает в себя сумму затрат на разработку инвестиционного проекта (на документацию), на оборудование, его установку и ввод в эксплуатацию;
- источники финансирования инвестиционного проекта: внутренние и (или) внешние, которые включают в себе затраты на оплату процентов по кредиту;
- риски реализации проекта;
- инфляция;
- доходы от реализации проектных решений;
- текущие расходы на содержание оборудования в рабочем состоянии.

Критериями эффективности инвестиционного проекта являются

- чистая приведенная стоимость (NPV);
- внутренняя норма доходности (IRR);
- период окупаемости ( $T_{ок}$ ) и другие критерии.

Для инвестиционного проекта энергоснабжения расходы на разработку инвестиционного проекта включают в себя:

- затраты на исследование гидроресурсов в данном районе, как правило, удалённом и расположенном в горной местности;
- исследование потребностей потребителей в электроэнергии;
- расчёт технических параметров передающих устройств (силовые преобразователи, кабельные линии, устройства управления генератором и другое оборудование, необходимое для устойчивой работы генератора) с учётом их установки в горной местности;
- расчёт затрат на установку устройств и их ввода в эксплуатацию.

После определения суммы необходимых инвестиций определяются источники финансирования проекта, которые можно разделить на две основные категории: внутренние и внешние. К внутренним источникам относятся все источники, не имеющие процентов по их займу. К внешним источникам финансирования проекта относят все источники, привлечение которых связано с текущими процентами по кредиту (займу). Как правило, используется смешанное финансирование: часть средств за счёт организации занимающейся установкой оборудования и вводом в эксплуатацию и часть средств за счёт займов и кредитов.

Рассмотрим основные показатели, входящие в оценку экономической эффективности и окупаемости проекта

Чистая приведенная стоимость (net present value NPV) - сумма приведенной стоимости будущих доходов от проекта и первоначальных инвестиций (вложений) в проект

$$NPV = CF_0 + \sum_{t=1}^n CF_t / (1 + d)^t \quad (1)$$

Здесь

- $CF_0$  – денежный поток (Cash Flow) нулевого периода (первоначальные инвестиции). В стандартном случае это отрицательная величина;
- $CF_t$  – денежный поток периода  $t$  ( $t=1, 2, 3 \dots n$ );
- $n$  – срок действия проекта (количество периодов);
- $d$  – ставка дисконтирования.

NPV — это основной показатель, учитывающий изменение во времени стоимости денег вследствие применения показателя дисконтирования. Используется наиболее часто и позволяет выявить проекты, приносящие прибыль инвестору

Ставка дисконтирования, уравнивающая стоимость настоящих вложений в проект и всех будущих доходов от его реализации представляет собой внутреннюю норму доходности (internal rate of return, IRR). То есть — это максимальная ставка дисконтирования, при которой проект остается безубыточным.

$$0 = CF_0 + \sum_{t=0}^n CF_t / (1 + IRR) \quad (2)$$

Этот показатель является важным инструментом оценки доходности проекта.

Инвестору важно знать: через какой промежуток времени доходы от реализации проекта сравняются с вложенными в него инвестициями. Этот период называется сроком окупаемости инвестиционного проекта ( $T_{ок}$ ). Естественно, что минимальный срок окупаемости определяет надёжность проекта и минимум рисков.

Срок окупаемости весьма эффективный показатель, позволяющий определить успешность запланированных инвестиций. Наряду с такими показателями чистая приведенная стоимость (NPV) и внутренняя норма доходности (IRR), срок окупаемости ( $T_{ок}$ ) используется для закрепления решения об инвестировании.

Алгоритм внедрения проектов энергоснабжения по методике NPV, представленный на рис.1 показывает последовательность реализации отдельных этапов оценки экономической эффективности с учётом сроков окупаемости.

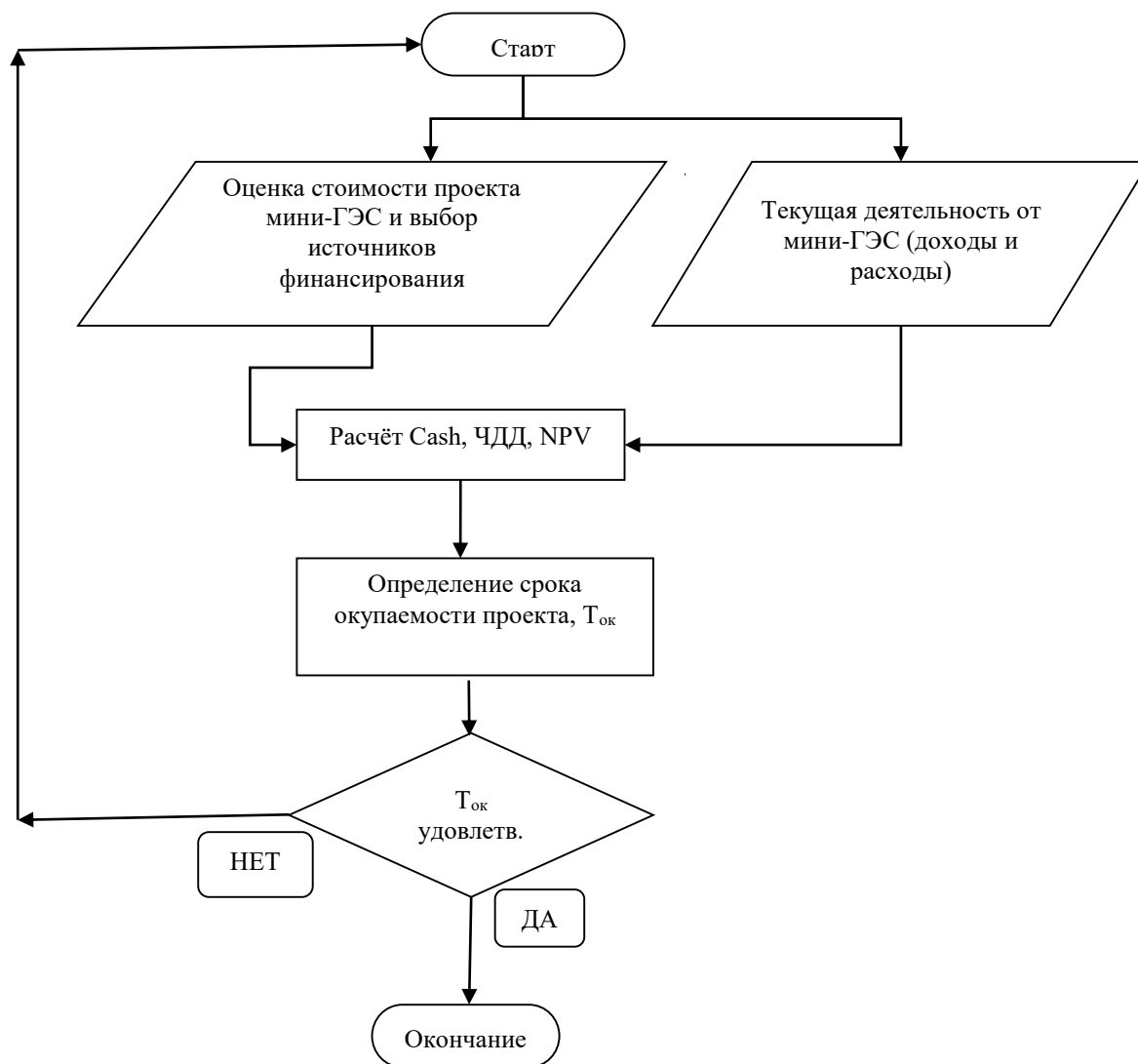


Рис. 1 – Алгоритм оценки эффективности реализации проекта мини-ГЭС

Для оценки экономической эффективности проекта по указанному алгоритму потребуются единовременные расходы, которые входят в состав стоимости проекта энергоснабжения. В соответствии с требованиями законодательства РФ [ПБУ, НК РФ] эти расходы группируются по статьям:

- амортизация оборудования мини-ГЭС (Ам);
- фонд заработной платы (ФЗП);
- налоги во внебюджетные фонды (ВнФ);
- расходы на услуги сторонних организаций (УСО);
- расходы на оборудование мини-ГЭС и материал на ввод в эксплуатацию (СМ);
- прочие расходы при реализации проекта внедрения мини-ГЭС (Пр).



Наличие различных факторов, влияющих на срок окупаемости проектных инвестиций, обуславливают существование различных формул для определения ставки дисконтирования [15], [16], [17].

Как правило, ставка дисконтирования ( $d$ ) включает коэффициенты, учитывающие инфляцию ( $b$ ) и степень риска реализации проекта ( $a$ )

$$d = a + b \quad (3)$$

Источниками финансирования проекта внедрения мини-ГЭС могут быть как внешние инвесторы, с учётом банковского процента, так и внутренние источники. Погашение кредитных сумм учитывается при расчёте чистой приведенной стоимости (NPV) и влияет на срок окупаемости проекта.

Реализация производимой и поставляемой электроэнергии является источником окупаемости проекта внедрения мини-ГЭС. При мгновенной полезной мощности  $P_2$  [кВт], поставляемой источником энергоснабжения потребителям за время  $t$  [ч] выручка от реализации (объём реализации) электроэнергии будет равна

$$V_{pz} = P_2 \cdot t \cdot C_{pz} \quad (4)$$

где « $C_{pz}$ » - цена реализации электроэнергии, [руб / (кВт\*ч)].

Под затратами (расходами) от текущей проектной деятельности понимаются затраты связанные с получением выручки только от реализации проекта. Структура текущих расходов аналогична группировке по статьям, представленным выше.

Поток денег (Cash Flow) от реализации электроэнергии мини-ГЭС в каждом расчётном периоде определяется по формуле:

$$CF_g = V_{pz} - OE + Am \quad (5)$$

Здесь «OE» (operating expense) – текущие расходы, связанные с получением выручки только от реализации проекта. В данном случае от реализации электроэнергии.

В расчётах *Cash Flow* проекта энергоснабжения принято: « $CF_0$ » - инвестиции в проект, направленные на ввод в эксплуатацию электростанции до момента производства электроэнергии;  $V_{pz}$  – годовая выручка от реализации производимой электроэнергии.

Показатель OE «текущие расходы» объединяет все текущие затраты, связанные с производством энергии, включая все налоги и проценты за кредит и платежи по основному кредиту.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century [Electronic resource]. – URL: [www.ren21.net](http://www.ren21.net). (accessed: 12.12.2020)
2. Тресман А.Г. Режимы внутригодового распределения стока рек Таджикистана: отчет о НИР / А.Г. Тресман // – Душанбе: Отдел энергетики АН Таджикской ССР. – 1959. – С. 103.
3. Авакян А.Б. Энергетические ресурсы СССР. Гидроэнергетические ресурсы / А.Б. Авакян // под ред. А.Н. Вознесенского – М.: Наука, –1967. – С. 599.
4. Фортов В.Е. Энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Попель // – Издательский Дом «Интеллект». – Долгопрудный, –2011. – С. 168.
5. Petrov, G.N. Tajikistan's Hydropower Resources. Central Asia and Caucasus / G.N. Petrov // Center for Social and Political Studies. Sweden. – 2003. – №33 (21), – pp. 153–161.
6. Тресман А.Г. Кривые обеспеченности и естественная зарегулированность стока рек Таджикистана / А.Г. Тресман. – Душанбе: Дониш. –1969. – С. 168.
7. Киргизов А.К. Методика определения расхода воды при проектировании малых ГЭС на горных водотоках Таджикистана / А. К. Киргизов, С. Р. Расулов // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: материалы девятнадцатой Всеросс. Науч.-техн. конф. / Томский политехнический университет. Т.1.– Томск: «СПБ Графика», – 2013. – С. 82–84.
8. Киргизов А.К. Потенциал нетрадиционных источников энергии в Таджикистане / А.К. Киргизов, С. Р. Расулов, У.У. Косимов // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: материалы восемнадцатой Всеросс. науч.-техн. конф. / Томский политехнический университет. – Томск: «СПБ Графика», – 2012. – С. 99–101.
9. Абдуллаева Ф.С. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР / Ф.С. Абдуллоева, Г.Б. Баканин, С.М. Гордон // – Л.: Недра, –1965. – С. 658.
10. Главтаджикгидромет. Гидрографический экспедиционный отдел. Схемные проработки. «Использование гидроэнергетических ресурсов малых и средних водотоков ГБАО средствами малой гидроэнергетики». Книга 1. Климата - Гидрологическое обоснование. Душанбе 1995. – С. 132.
11. Тресман А. Г. Определение годового стока на неизученных створах рек Памира /А. Г. Тресман // Доклад АН Тадж. ССР. – № 4. т. 11, Душанбе – 1959. –С. 98.

12. Безруких П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г.А. Борисов, В. И. Виссарионов, В. М. Евдокимов и др // СПб.: Наука, 2002. – С. 314.
13. Киргизов А.К. Водно-энергетический потенциал малых рек Памира / А.К. Киргизов, Дж. С. Ахъеев, Дж. Х. Худжасайдов // 8-я Межд. конф. По проблемам горной промышленности, строительства и энергетики —Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики // ТулГУ. Тула-Донецк-Минск. – 2012. – С. 480-485.
14. Воронин С.Г. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана / С.Г. Воронин, А.М. Давлатов, О.О. Султонов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 100–107. DOI: 10.14529/power190311
15. Грей Клиффорд Ф. Управление проектами: Практическое руководство / Грей Клиффорд Ф., Ларсон Эрик У // Пер. с англ. – М.: Издательство «Дело и Сервис». –2003. – С 528.
16. Бланк И.А. Основы инвестиционного менеджмента. / И.А. Бланк // – Киев: Эльга-Н, Ника-Центр, 2001. – в 2-х томах.
17. Бригхем, Ю. Финансовый менеджмент: Полный курс: В 2-х т. / Ю.Бригхем, Л. Гапенски // Пер. с англ. под ред. В.В. Ковалева. – СПб.: Экономическая школа, 1998.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century [Electronic resource]. – URL: [www.ren21.net](http://www.ren21.net). (accessed: 12.12.2020)
2. Tresman A.G. Rezhimy vnutrigodovogo raspredelenija stoka rek Tadjikistana: otchet o NIR [Modes of intra-annual distribution of river runoff in Tajikistan: research report] / A.G. Tresman // – Dushanbe: Otdel jenergetiki AN Tadjikskoj SSR. – 1959. – P. 103. [in Russian]
3. Avakjan A.B. Jenergeticheskie resursy SSSR. Hidrojenergeticheskie resursy [Energy resources of the USSR. Hydropower resources] / A.B. Avakjan // ed. by A.N. Voznesenskogo – М.: Nauka, –1967. – P. 599.
4. Fortov V.E. Jenergetika v sovremennom mire [Energy in the modern world] / V.E. Fortov, O.S. Popel' // – Publishing house «Intellekt»: Dolgoprudnyj, –2011. – P. 168. [in Russian]
5. Petrov G.N. Tajikistan's Hydropower Resources. Central Asia and Caucasus / G.N. Petrov // Center for Social and Political Studies. Sweden. – 2003. – №33 (21), – pp. 153–161.
6. Tresman A.G. Krivye obespechennosti i estestvennaja zaregulirovannost' stoka rek Tadjikistana [Security curves and natural regulation of river flow in Tajikistan] / A.G. Tresman. – Dushanbe: Donish. –1969. – P. 168.
7. Kirgizov A.K. Metodika opredelenija rashoda vody pri proektirovanii malyh GJeS na gornyh vodotokah Tadjikistana [Method for determining water consumption at design of small hydroelectric power plants on mountain watercourses in Tajikistan] / A. K. Kirgizov, S. R. Rasulov // Jenergetika: Jekologija, Nadezhnost', Bezopasnost': materialy devjattjadcatoj Vseross. Nauch.-tehn. konf. / Tomskij politehnicheskij universitet. Vol.1.– Tomsk: «SPB Grafiks», – 2013. – P. 82-84. [in Russian]
8. Kirgizov A.K. Potencial netradicionnyh istochnikov jenerгии v Tadjikistane [Potential of unconventional energy sources in Tajikistan] / A.K. Kirgizov, S. R. Rasulov, U.U. Kosimov // Jenergetika: Jekologija, Nadezhnost', Bezopasnost': materialy vosemnadcatoj Vseross. nauch.-tehn. konf. / Tomskij politehnicheskij universitet. – Tomsk: «SPB Grafiks», – 2012. – P. 99-101. [in Russian]
9. Abdullaeva F.S. Hidrojenergeticheskie resursy Tadjikskoj SSR [Hydropower resources of the Tajik SSR] / F.S. Abdullaeva, G.B. Bakanin, S.M. Gordon // – L.: Nedra, –1965. – P. 658.
10. Glavtadjikgidromet. Hidrograficheskij jekspedicionnyj otdel. Shemnye prorabotki. «Ispol'zovanie gidrojenergeticheskix resursov malyh i srednix vodotokov GBAO sredstvami maloj gidrojenergetiki». [ Use of hydropower resources of small and medium watercourses in GBAO by means of small hydropower] Book 1. Klimata - Hidrologicheskoe obosnovanie. Dushanbe 1995. – P. 132.
11. Tresman A. G. Opredelenie godovogo stoka na neizuchennyh stvorah rek Pamira [Determination of the annual runoff at unexplored sections Pamir rivers] / A. G. Tresman // Doklad AN Tadjh. SSR. – № 4. Vol. 11, Dushanbe – 1959. –P. 98.
12. Bezrukih P.P. Resursy i jeffektivnost' ispol'zovaniya vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии v Rossii [Resources and efficiency of use renewable energy sources in Russia] / P. P. Bezrukih, Ju. D. Arbuzov, G.A. Borisov, V. I. Vissarionov, V. M. Evdokimov i dr // SPb.: Nauka, 2002. – P. 314. [in Russian]
13. Kirgizov A.K. Vodno-jenergeticheskij potencial malyh rek Pamira / A.K. Kirgizov, Dzh. S. Aheev, Dzh. H. Hudzhasaidov // 8-ja Mezhd. konf. Po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stvo i jenergetiki —Social'no-jekonomicheskie i jekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i jenergetiki [Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy] // TulGU. Tula-Doneck-Minsk. – 2012. – P. 480-485. [in Russian]
14. Voronin S.G. Avtomatizirovannaja mini-GJeS kak osnova sistemy jelektrosnabzhenija gornyh rajonov Tadjikistana [Automated mini-hydroelectric power station as the basis of the power supply system for mountainous regions of Tajikistan] / S.G. Voronin, A.M. Davlatov, O.O. Sultonov et al. // Vestnik JuUrGU. Serija «Jenergetika». – 2019. – Vol. 19, № 3. – P. 100–107. DOI: 10.14529/power190311. [in Russian]
15. Grej Klifford F. Upravlenie proektami: Prakticheskoe rukovodstvo [Project Management: A Practical Guide] / Grej Klifford F., Larson Jerik U. – М.: Publishing house «Дело и Сервис». –2003. – P 528.
16. Blank I.A. Osnovy investicionnogo menedzhmenta. [Fundamentals of Investment Management] / I.A. Blank // – Киев: Jel'ga-N, Nika-Centr, 2001. – in 2 vols.
17. Brigham, Ju. Finansovyy menedzhment: Polnyj kurs: V 2-h t. [Financial management: Complete course: In 2 volumes.] / Ju.Brigham, L. Gapenski // ed. by V.V. Kovaleva. – SPb.: Jekonomicheskaja shkola, 1998.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.009>

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГПС

Научная статья

Евгеньев Г.Б.\*

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (g.evgenyev[at]mail.ru)

### Аннотация

В настоящее время в мире происходит четвертая промышленная революция, получившая наименование «Индустрия 4.0». Целью этой революции является создание цифровых производств, которые обеспечивали бы кардинальное повышение производительности и качества производства. Низкий уровень этих показателей является вызовом для нашего государства.

В проекте «Индустрия 4.0» используются технологии Интернета промышленных вещей (IIoT). В IIoT применяются сложные информационные технологии больших данных и облачных вычислений, недоступные для разработки систем малыми и средними машиностроительными предприятиями. Методы искусственного интеллекта при создании систем IIoT до сих пор не применялись.

Системы оперативного управления производством (MES) и системы автоматизированного программирования для оборудования с ЧПУ (CAM) разрабатываются вне связи с IIoT.

В данной статье представлен прототип интеллектуальной системы полуавтоматического управления ГПС. Ядром является семантическая База Знаний для IIoT, которая использует Модули Инженерных Знаний в виде строительных блоков. Опорой при проектировании используется методология, основанная на многоагентных методах.

Разработаны структуры базы данных и базы знаний.

Информационные технологии, описанные в статье, доступны для использования непрограммирующими пользователями и могут быть использованы малыми и средними машиностроительными предприятиями.

**Ключевые слова:** Индустрия 4.0, цифровые производства, промышленный интернет вещей, искусственный интеллект, база знаний.

## AN INTELLIGENT FMS CONTROL SYSTEM

Research article

Evgenyev G.B.\*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

\* Corresponding author (g.evgenyev[at]mail.ru)

### Abstract

Currently, the world is undergoing the fourth industrial revolution, called "Industry 4.0". This revolution is set to create digital production works that would cause a dramatic increase in productivity and quality of production. The low level of these indicators is a challenge for our state.

The Industry 4.0 project uses the technologies of the Industrial Internet of Things (IIoT). IIoT uses complex information technologies of big data and cloud computing, which are not available for the development of systems by small and medium-sized engineering enterprises. Artificial intelligence methods have not yet been used in the process of creating IIoT systems.

Operational Production Management Systems (MES) and computer-aided manufacturing systems for CNC equipment (CAD) are developed outside of IIoT.

The current article presents a prototype of an intelligent semi-automatic GPS control system. The core is a semantic knowledge base for IIoT that uses Engineering Knowledge Modules as building blocks. A methodology based on multi-agent methods serves as a backbone in the design.

The study demonstrates the developed database and knowledge base structures.

The information technologies described in the article are available for use for non-programming users and can be used by small and medium-sized machine-building enterprises.

**Keywords:** Industry 4.0, digital production, Industrial Internet of Things, artificial intelligence, knowledge base.

### Введение

В настоящее время по всеобщему признанию в мире происходит четвертая промышленная революция (4ПР) [1], [2], [3]. Цифровизация промышленности основывается на методологии искусственного интеллекта (ИИ) [4], [5], [6]. К 2025 прогнозируется его четырехкратный рост внедрения ИИ. Применение искусственного интеллекта станет повсеместным стандартом, так как во многих случаях это – единственный способ сохранить конкурентоспособность.

В настоящее время для создания интеллектуальных систем управления производством используются сложные технологии, связанные с обработкой больших данных и облачными технологиями, у которых есть проблемы с безопасностью. Для этого нужно привлекать ИТ-компании. Для малых и средних производств это затруднительно. Необходимы простые инструментальные средства, доступные для таких производств. Данные не должны быть ни большими, ни малыми, а необходимыми и достаточными и основанными на существующих стандартах, а в данном случае – ЕСТД.

Что касается знаний, то они должны содержаться в базах знаний производств. При этом необходима простейшая технология сознания таких баз знаний, основанная на языке «деловой прозы», максимально приближенном к естественному языку и быть доступным для разработки непрограммирующими пользователями.

Именно такие методы описываются в настоящей статье.

Цифровизация машиностроения должна основываться на новейших технологиях промышленного интернета вещей ПоТ (рис.1).

Отличительной особенностью ПоТ, является конвергенция информационных технологий (ИТ) и операционных технологий (ОТ). В ИТ операции представляют модули базы знаний, описанные ниже. Операции ОТ в данном случае целесообразно разбить на два класса: собственно операции ОТ, представляющие собой технологические операции, связанные с изменением свойств обрабатываемого объекта, и операции ОЛ – логистические операции, связанные с изменением расположения объектов. ОТ проектируются предварительно в системах автоматизации технологического проектирования и загружаются в базу данных применительно к тем предметам, которые подлежат обработке в данное время. Логистические операции генерируются динамически системой оперативного управления производством по мере необходимости.

Конвергенция ИТ и ОТ обеспечивает большую системную интеграцию в отраслях с точки зрения автоматизации и оптимизации, а также лучшую видимость цепочки поставок и логистики.

В контексте четвертой промышленной революции, получившей название Индустрия 4.0, ПоТ является неотъемлемой частью того, как киберфизические системы и производственные процессы должны трансформироваться с помощью систем оперативного управления. Машины получают возможность брать на себя и автоматизировать задачи, с которыми предыдущие промышленные революции не могли справиться. В более широком контексте ПоТ имеет решающее значение для вариантов использования связанных с созданиями умных заводов.

Интеграция ПоТ может дать промышленным предприятиям более точное представление о том, как продвигаются их операции, и помочь им принимать обоснованные бизнес-решения.



Рис. 1 – Общая схема создания интеллектуальных производств

Технической основой создания интеллектуальных производств являются гибкие производственные системы (ГПС).

Эффективность ГПС обеспечивается за счет функционирования автоматизированных систем: проектирования, технологической подготовки производства, оперативного планирования производства и ряда других

Вся совокупность этих систем обеспечивает создание гибкого автоматизированного производства, а его основу обеспечивают гибкие производственные системы (ГПС).

#### **Гибкая производственная система**

В настоящее время с использованием программных средств российской компании «Центр СПРТ-Т» разработана интеллектуальная система полуавтоматического проектирования изделий машиностроения [7]. Для создания сквозных цифровых технологий необходимо разработать интеллектуальную систему управления гибкой производственной системы (ГПС), способной изготавливать спроектированные объекты.

В качестве такой ГПС может быть использована учебная мини ГПС, созданная в Англии на фирме «Denford» и установленная в МГТУ им. Баумана (рис.2).

ГПС «Denford» включает два станочных модуля токарный 1 и фрезерный 2. Помимо этого имеется средство контроля изделий 3. Транспортно-складская система ГПС включает ленточный конвейер 4 и автоматизированный склад 5.

Интеллектуальная АСУ ГПС должна обеспечивать выполнение следующих функций:

1. Выбор объекта производства
2. Выбор технологического процесса производства
3. Выбор ТО производства и оборудования
4. Доставка технологической оснастки
5. Наладка технологической операции
6. Доставка объекта обработки
7. Производство обработки
8. Контроль результатов обработки
9. Складирование обработанного объекта
10. Выполнение заключительных операций и складирование оснастки

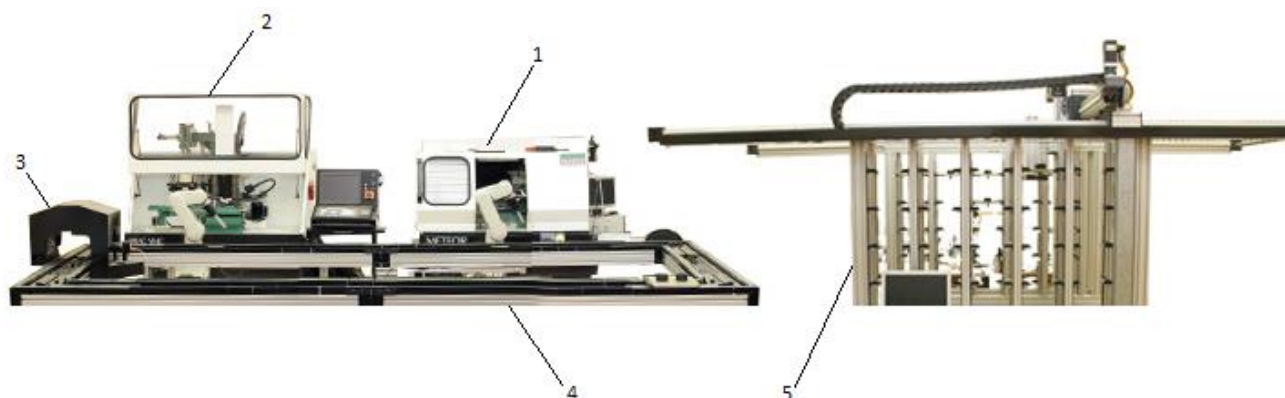


Рис. 2 – Мини ГПС «Denford»: 1-модуль токарный; 2-модуль сверлильно-фрезерный; 3-модуль контроля изделий; 4 -ленточный конвейер; 5-склад

### Функциональная модель производственной системы

Технологические процессы реализуются в машиностроительных производствах в виде целенаправленных действий по изготовлению изделий с привлечением необходимых людских, материальных, энергетических и информационных ресурсов. Для существующих производств эти действия необходимо спланировать и проводить на основе планов оперативного управления производственными процессами.

При описании систем целесообразно разделить все переменные на три группы:

- 1) входные переменные и воздействия, представляющие собой внешнюю по отношению к рассматриваемой системе информацию;
- 2) выходные переменные, характеризующие некоторые стороны функционирования системы и являющиеся ее реакцией на вход;
- 3) переменные состояния, характеризующие динамическое поведение системы.

На рис. 3 представлена функциональная модель производственной системы. Создание баз знаний для такой системы заключается в декомпозиции этого функционального объекта до элементарных объект-функций (агентов), семантическая сеть которых позволяет выполнить эту функцию.

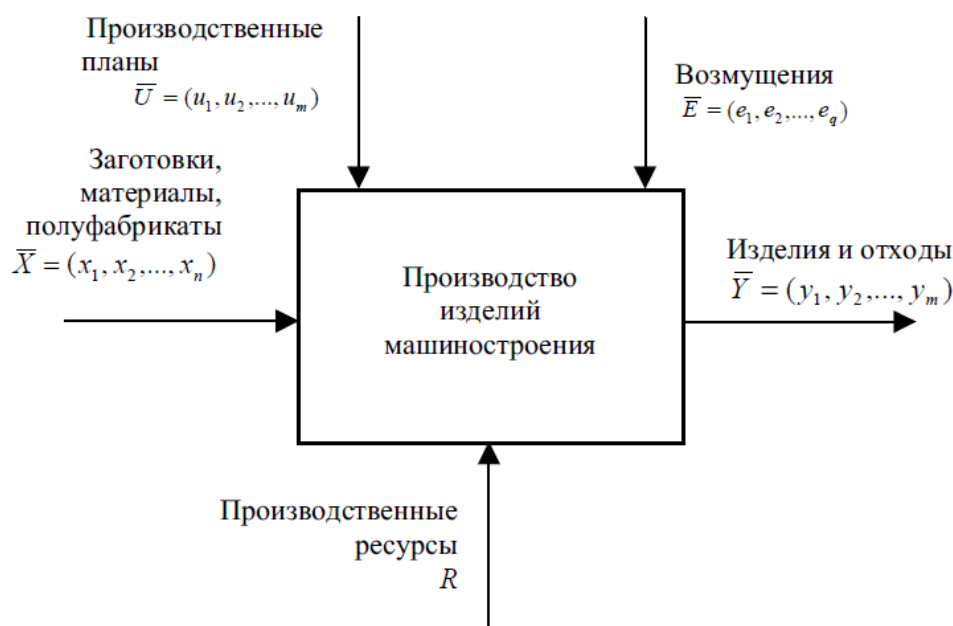


Рис. 3 – Модель производственной системы

Входами  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  модели дискретной производственной системы являются заготовки, материалы и полуфабрикаты, необходимые для изготовления изделий.

На рис. 4 представлена диаграмма классов объектов цифрового производства. Из числа входных объектов на ней отображены заготовки, материалы и комплектующие.

Выход этой системы  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  представляет собой изделия и отходы производства. На рис. 4 объектом выхода является объект номенклатурный, включенный в состав производственной программы. Разновидности здесь включают подлежащие изготовлению детали и сборочные единицы.

Упомянутые выше материалы и заготовки связаны с изготавливаемыми деталями, а комплектующие и материалы – со сборочными единицами.

Производственный процесс управляется производственными планами  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ , составленными на основе технологических процессов и требующими для своей реализации ресурсы  $R$  в виде персонала и средств технологического оснащения (оборудование, приспособления, инструменты).

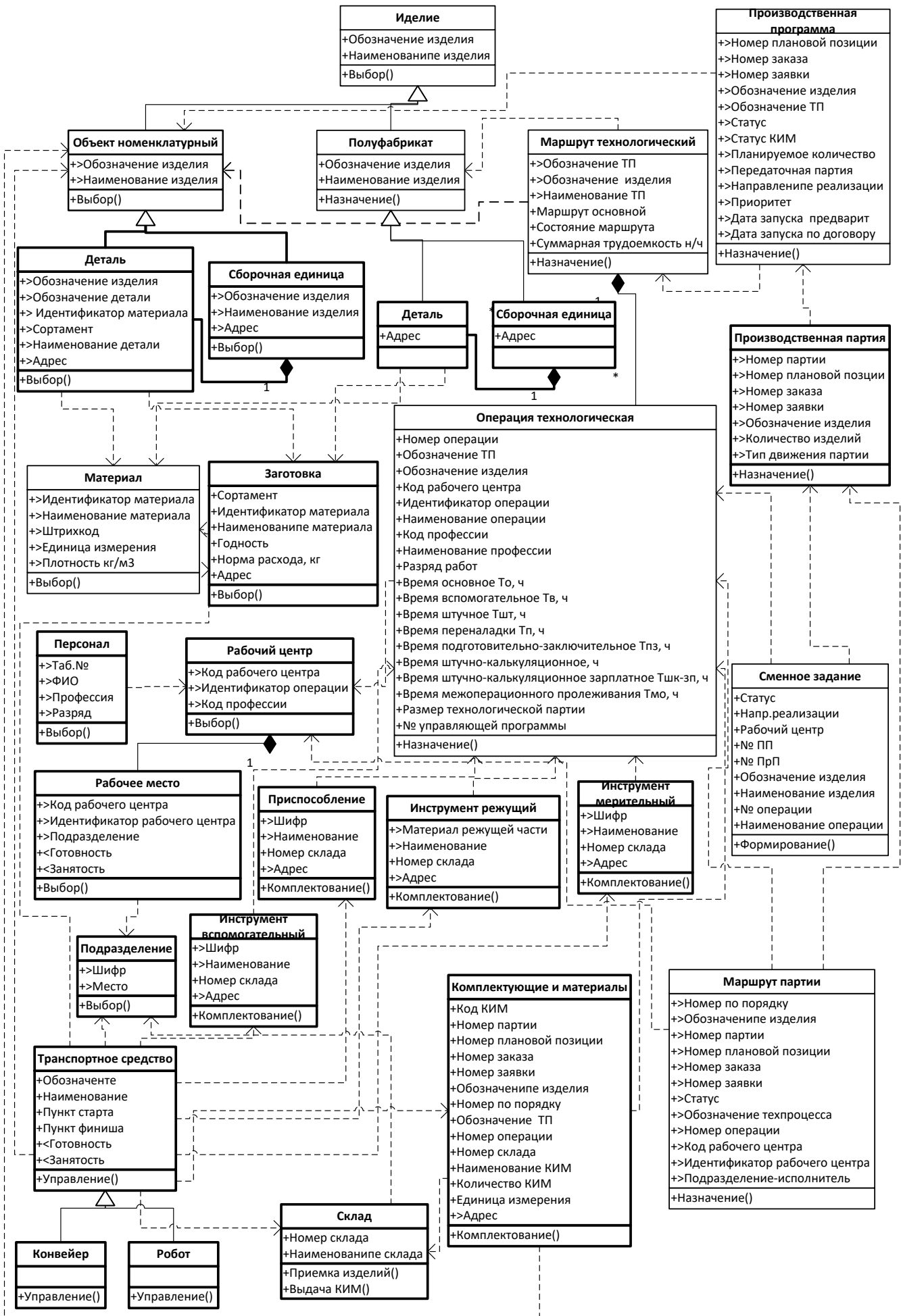


Рис. 4 – Диаграмма классов объектов цифрового производства

Производственный план на рис.5 представлен объектом «Производственная программа», который реализуется в форме изготовления производственных партий, каждая из которых имеет свой маршрут.

Атрибуты производственной программы включают данные, имеющие организационный характер: номера плановой позиции, заказа и заявки. Далее заносится инженерная информация: обозначение изделия и технологических процессов.

На концептуальном уровне производственная система представляет собой множество некоторых ресурсов  $R$ , взаимодействующих между собой. Ресурсы могут быть двух видов: постоянные и временные. *Постоянные ресурсы* всегда присутствуют в системе, а *временные ресурсы* поступают в систему и покидают ее. К числу постоянных ресурсов производственной системы относится оборудование, а к числу временных может относиться оснастка.

Ресурсы  $R$  для реализации производства на рис. 4 выделены жирным контуром и представляют собой вещи, имеющие место в производстве: рабочий центр, который может включать несколько рабочих мест и который размещается в определенном помещении, транспортные средства, склады, а также технологическая оснастка: приспособления, инструменты режущие, мерительные и вспомогательные.

Для постоянных ресурсов характерными являются параметры, идентифицирующие их по работоспособности и надежности на выполнение определенных операций. Для временных ресурсов важными являются параметры, описывающие их местоположение, участие в некоторых действиях и т.п.

Применительно к рассматриваемой ГПС (рис. 2) постоянные ресурсы включают два рабочих центра: токарный и фрезерный, в каждый из которых входит соответствующее рабочее место в виде станка с ЧПУ и вспомогательного робота. Каждый рабочий центр обслуживается персоналом соответствующей квалификации и разряда.

Обработка осуществляется производственными партиями. Маршрут партии представляет собой виртуальный объект, формируемый на основе технологических данных.

Параметрами оборудования для целей управления интеллектуальным производством являются *занятость* и *загруженность*.

Производственные ресурсы взаимодействуют друг с другом в соответствии с оперативным планом, выполняя различные действия, реализующие технологические операции. Каждое действие связано с изменением состояния производственной системы. Изменение состояния системы называют *событием*. Например, событиями являются начало и конец обработки детали на станке. Все события должны быть определены и зафиксированы в модели системы.

Производственный процесс управляется производственными планами  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ , составленными на основе технологических процессов и требующими для своей реализации ресурсы  $R$  в виде персонала и средств технологического оснащения (оборудование, приспособления, инструменты).

Как показано на рис. 3 оснастка включает приспособление и инструменты: режущий, мерительный и вспомогательный.

В реальном производстве имеют место возмущения  $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ , связанные со штатными и такими нештатными событиями, как сбой и отказы оборудования и оснастки. В интеллектуальных производствах возмущения  $E$  генерируются с помощью датчиков и интернета вещей.

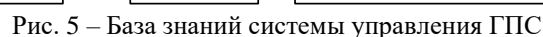
Параметрами оборудования (рабочее место, транспортное средство) для целей интеллектуального производства являются *готовность* и *занятость*. Готовность может принимать значения «готов» и «не готов». Объект готов, когда он может выполнять свое функциональное назначение. Рабочее место готово, когда выполнены подготовительные работы по наладке на технологическую операцию и успешно обработаны пробные детали. Готовность обеспечивается персоналом, выполняющим подготовительно-заключительные операции.

Занятость может принимать значения «занят» и «свободен». Объект занят во время выполнения технологической операции. В противном случае он свободен.

Параметры могут принимать значения из некоторого непустого множества  $S$  (счетного или несчетного). Часть параметров ресурса, например *занятость*, изменяют свои значения в процессе моделирования, а другие остаются постоянными (например, расстояние между станками).

*Нерегулярные* события происходят либо при нештатной работе ресурсов (поломки, отказы), либо из-за внешних по отношению к системе причин (приход в систему нового временного ресурса). В отличие от регулярных событий, нерегулярные носят ярко выраженный стохастический характер и заранее не планируются системой управления. Их возникновение может нарушать синхронизацию регулярных событий и приводить к невозможности их начала или нормального завершения [8], [9].

Ресурсы в процессе функционирования производственной системы выполняют определенные *действия*, представляющие собой операции технологических процессов, развернутые во времени. С каждым действием связано два события — его начало и конец. Примерами действий производственного участка являются: транспортирование заготовки, обработка детали, переналадка станка и т.п.



72



Действия в ГПС относятся к двум категориям: основные и вспомогательные. Основные соответствуют операциям технологическим, с помощью которых производится преобразование формы и свойств объектов изготовления. Вспомогательные связаны с изменениями положения предметов и обеспечиваются операциями транспортными. Средствами их реализации являются транспортные средства. Применительно к рассматриваемой ГПС (рис.2) они включают склад, обеспечивающий хранение и перемещение грузов, ленточный конвейер и обслуживающие роботы.

### База знаний системы управления ГПС

База знаний интеллектуальной системы управления ГПС представляет собой семантическую сеть агентов (рис.5). Она обеспечивает автоматизированное функционирование ГПС, необходимое для решения поставленных производственных задач.

Вначале производится выбор плановой позиции, которая содержит обозначение и наименование номенклатурного объекта, подлежащего изготовлению. Изготавливаемые объекты объединяются в производственные партии.

По обозначению изделия устанавливается маршрут обработки, содержащийся в маршрутной карте (МК). МК содержит данные о заготовке (код, профиль и размеры, количество на деталь, масса), а также последовательность операций с указанием цеха, участка и рабочего места, номера операции, кода и наименования операции, кода и наименования оборудования, профессии и разряда рабочего, Тпз и Тшт. Помимо этого для каждой операции указывается необходимая оснастка.

Для сборочных операций указываются комплектующие материалы, а для операций, выполняемых на оборудовании с ЧПУ, номер управляющей программы.

Из подмножества операций МК формируется сменное задание (рис.6).

Во время изготовления деталей на станках с ЧПУ на панелях ГПС отображается процесс обработки (рис. 6). Здесь под номером 1 показан процесс обработки на токарном станке 1, а под номером 2 – процесс обработки на сверлильно-фрезерном станке 2.



Рис. 6 – Контроль обработки деталей на станках с ЧПУ: 1 – процесс обработки на токарном станке; 2 – процесс обработки на сверлильно-фрезерном станке

В рассматриваемой ГПС возможна организация единичного и поточного производства. В данном случае поточное производство является многопредметным со свободным ритмом. Состав основных операций определяет МК, а к вспомогательным относятся транспортные операции, выполняемые складом, конвейером и обслуживающими роботами (табл.1).

В случае единичного производства результаты выполнения промежуточных операций представляют собой полуфабрикаты (рис.4), отправляемые на склад, а в случае поточного производства они передаются на следующее рабочее место.

Таблица 1 – Транспортные операции ГПС

Объект	Производство единичное	Производство поточное
Заготовка	Склад Конвейер Робот 1 Рабочее место 1	Склад Конвейер Робот 1 Рабочее место 1
Полуфабрикат	Робот 1 Конвейер Склад	Робот 1 Конвейер Робот 2 Рабочее место 2
Полуфабрикат	Склад Конвейер Робот 2 Рабочее место 2	
Изделие	Робот 2 Конвейер Склад	Робот 2 Конвейер Склад

Транспортные операции относятся к сфере логистики.

В технологических операциях обработки на входе имеется заготовка или полуфабрикат, а на выходе полуфабрикат или готовое изделие. В случае транспортных операций на входе имеем исходный адрес перемещаемого объекта, а на выходе – конечный его адрес.

Транспортные адреса:

- Обозначение склада
- Обозначение сектора склада;
- Номер стеллажа склада;
- Сторона стеллажа склада;
- Номер по вертикали;
- Номер по горизонтали;
- Номер рабочего центра;
- Номер рабочего места.

### Заключение

Разработан метод создания интеллектуальных систем управления гибкими производственными системами в машиностроении.

Как показывает опыт эксплуатации интеллектуальных систем, основанных на базах знаний, производительность труда технологов повышается в 2-3 раза, за счет автоматической генерации технологических процессов. Одновременно с этим происходит улучшение качества результатов проектирования в связи с использованием лучших апробированных решений.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Industry 4.0 – The future is smart – [Electronic resource]. – URL: [www.baslerweb.com/Industry](http://www.baslerweb.com/Industry) (accessed: 12.12.2020)
2. Nerve for Industry 4.0 Fog Computing Platform – [tttech.com](http://tttech.com) – [Electronic resource]. – URL: [www.tttech.com/fog-computing/nerve](http://www.tttech.com/fog-computing/nerve) (accessed: 12.12.2020)
3. Siemens - Industrie4.0. – [Electronic resource]. – URL: [www.siemens.com](http://www.siemens.com) (accessed: 12.12.2020)
4. Haenlein, M. A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence / Haenlein, Michael; Kaplan, Andreas // California Management Review. 61 (4): 5–14. doi:10.1177/0008125619864925. ISSN 0008-1256. S2CID 199866730.
5. Hutter M. Universal Artificial Intelligence / Hutter, Marcus. – Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-22139-5.
6. Russell S. J. Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd ed.) / Russell, Stuart J.; Norvig, Peter. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. ISBN 978-0-13-604259-44.
7. Евгеньев Г.Б. Интеллектуальная САПР как полуавтоматическая система конструкторско-технологического проектирования червячных редукторов / Г.Б. Евгеньев, А.Н. Кириак // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума наука и инновации- современные концепции (г. Москва, 2 февраля 2020 г.). / отв. ред. Д.Р. Хисматуллин. – Москва: Издательство Инфинити, 2020, с.120-125
8. Евгеньев Г.Б. Основы автоматизации технологических процессов и производств: учебное пособие: в 2 т. Т.1 / Г.Б. Евгеньев: Информационные модели. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 441с.
9. Евгеньев Г.Б. Российские технологии создания систем класса «Industry 4.0» Часть 1 / Г.Б. Евгеньев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. №8, 2018, с.50-63

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Industry 4.0 – The future is smart – [Electronic resource]. – URL: [www.baslerweb.com/Industry](http://www.baslerweb.com/Industry) (accessed: 12.12.2020)
2. Nerve for Industry 4.0 Fog Computing Platform – [tttech.com](http://tttech.com) – [Electronic resource]. – URL: [www.tttech.com/fog-computing/nerve](http://www.tttech.com/fog-computing/nerve) (accessed: 12.12.2020)
3. Siemens - Industrie4.0. – [Electronic resource]. – URL: [www.siemens.com](http://www.siemens.com) (accessed: 12.12.2020)
4. Haenlein, M. A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence / Haenlein, Michael; Kaplan, Andreas // California Management Review. 61 (4): 5–14. doi:10.1177/0008125619864925. ISSN 0008-1256. S2CID 199866730.
5. Hutter M. Universal Artificial Intelligence / Hutter, Marcus. – Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-22139-5.
6. Russell S. J. Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd ed.) / Russell, Stuart J.; Norvig, Peter. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. ISBN 978-0-13-604259-44.
7. Evgenyev G.B. Intellektual'naja SAPR kak poluavtomaticheskaja sistema konstruktorsko-tehnologicheskogo proektirovaniya chervjachnyh reduktorov [Intelligent CAD as a semi-automatic system for the design and technological design of worm gearboxes] / G.B. Evgenyev, A.N. Kirijak // Sbornik nauchnyh statej po itogam raboty Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma nauka i innovacii-sovremennye koncepcii (g. Moskva, 2 fevralja 2020 g.) [Collection of scientific articles based on the results of the work of the International Scientific Forum science and innovations - modern concepts (Moscow, February 2, 2020)]. / ed. D.R. Khismatullin. - Moscow: Infinity Publishing House, 2020, p. 120-125 [in Russian]
8. Evgenyev G.B. Osnovy avtomatizacii tehnologicheskix processov i proizvodstv [Basics of automation of technological processes and production: a tutorial]: in 2 volumes. Vol. 1 / G.B. Evgenyev: Information models. Publishing house MSTU im. N.E. Bauman, 2015, 441p. [in Russian]
9. Evgenyev G.B. Rossijskie tehnologii sozdanija sistem klassa «Industry 4.0» Chast' 1 [Russian technologies for creating systems of the class "Industry 4.0" Part 1] / G.B. Evgenyev // Izvestija vysshix uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie [Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering]. No. 8, 2018, pp.50-63 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.010>**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СУШИЛЬНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ УСТАНОВОК**

Научная статья

**Зыков А.В.<sup>1</sup>, Юнин В.А.<sup>2,\*</sup>, Захаров А.М.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3435-7468;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8111-1727;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-3501-0543;<sup>1, 2, 3</sup> Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (vim\_iaep[at]mail.ru)

**Аннотация**

В последнее время для получения сбалансированных кормов предпринимаются попытки восстановления технологий высокотемпературной сушки травы. С этой задачей справляются сушильные камеры с инфракрасным обогревом. Главным достоинством процесса сушки продуктов инфракрасными лучами является более высокая скорость удаления влаги в сравнении с конвективной или кондуктивной (контактной) сушкой. В отличие от других методов консервации инфракрасная сушка позволяет получить конечный продукт, сохраняющий все биологически ценные свойства и практически все витаминные элементы. Затраты на процесс сушки в инфракрасной сушилке до 20% ниже, чем в устройствах конвейерного типа и составляют 0,9-1,4 кВт/час на 1 кг испаренной влаги. Общая цель работы – разработка и совершенствование прогрессивных технологических процессов и экспериментальных технических средств для интенсификации сушки растительных материалов в барабанной сушильной установке, позволяющей значительно ускорить темпы заготовки высококачественных кормовых добавок, улучшить его качество и сократить энерго- и металлоемкость процесса сушки. Научная новизна работы заключается в разработке обобщенного расчета для сушильных установок с инфракрасным источником тепла.

**Ключевые слова:** сушка, влажность, температура, интенсивность сушки, ИК-излучение.**ASPECTS OF INFRARED DRYER DESIGN**

Research article

**Zykov A.V.<sup>1</sup>, Yunin V.A.<sup>2,\*</sup>, Zakharov A.M.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3435-7468;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8111-1727;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-3501-0543;<sup>1, 2, 3</sup> Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, the Branch of Federal Research Center of Agriculture All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization, Saint-Petersburg, Russia

\* Corresponding author (vim\_iaep[at]mail.ru)

**Abstract**

Recently, attempts have been made to restore the technologies for high-temperature drying of grass with the goal of obtaining balanced feeds. Infrared drying chambers are fit to accomplish this task. The main advantage of the process of drying products with infrared rays is a higher rate of moisture removal in comparison with convective or conductive (contact) drying. Unlike other methods of preservation, infrared drying allows obtaining a final product that retains all the biologically valuable properties and almost all the vitamin elements. The cost of the drying process with an infrared dryer is up to 20% lower than in conveyor-type devices and amounts to 0.9-1.4 kW / h per 1 kg of evaporated moisture. The overall aim of the study is to develop and improve advanced technological processes and experimental technical means for intensifying the drying of plant materials in a cylinder drier, which allows for a significantly accelerated pace of producing high-quality feed additives, improve its quality and reduce the energy and metal consumption of the drying process. The scientific novelty of the work lies in the development of a generalized calculation for drying plants with an infrared heat source.

**Keywords:** drying, humidity, temperature, drying intensity, IR radiation.**Введение**

На основе анализа базовых технологий консервации кормов, выявлено, что наибольшие потери питательных веществ и витаминных ингредиентов происходят при сушке. В тоже время сухие грубые корма являются физиологически необходимыми для жвачных животных. При производстве сена потери питательных веществ составляют от 30 до 50%, в зависимости от способа заготовки и погодных условий [1].

В 1980-1990 годах нашла применение высокотемпературная сушка травы с целью получения высококачественного витаминного корма в виде травяной муки, гранул, брикетов. Из-за высоких энергозатрат и загрязнений готового корма продуктами горения топлива данные технологии последнее время не используются, но в ряде хозяйств Ленинградской области для получения сбалансированных кормов для высокопродуктивного стада предпринимаются попытки восстановления технологий высокотемпературной сушки травы для получения витаминных травяных добавок. Предлагаемая нами технология приготовления витаминных добавок на основе инфракрасной сушки трав обеспечит получение экологически чистого корма с меньшими удельными затратами на сушку.

Имеется опыт применения инфракрасной сушки пищевых продуктов, с сохранением полезных веществ и витаминов [4], [5]. С этой задачей справляются сушильные камеры с инфракрасным обогревом. Температура в них не превышает 40...60 градусов, сохраняя тем самым полезные вещества.

Главным достоинством процесса сушки продуктов инфракрасными лучами является более высокая скорость удаления влаги в сравнении с конвективной или кондуктивной (контактной) сушкой [2]. Такое преимущество

обеспечивается действием потока излучаемой тепловой энергии, которая проникает на некоторую глубину в капиллярно-пористые продукты (около 0,1...2,0 мм). Одновременно с этим происходит уничтожение нежелательной микрофлоры с поверхности продуктов, позволяя продлить срок хранения. При этом не нарушается структура продуктов, не изменяются вкусовые качества продуктов, не уничтожаются витамины и полезные микроэлементы.

Благодаря большому числу отражений от стенок капилляров, лучи инфракрасного излучения могут поглощаться практически полностью. В данном случае коэффициент теплообмена получается значительно большим. Таким образом, на единицу поверхности высушиваемого продукта за единицу времени передается значительное количество тепла. Данное преимущество позволяет значительно ускорить процесс сушки.

В отличие от других методов консервации инфракрасная сушка (ИКС) позволяет получить конечный продукт, сохраняющий все биологически ценные свойства и практически все витаминные элементы. Затраты на процесс сушки в инфракрасной сушилке до 20% ниже, чем в устройствах конвейерного типа и составляют 0,9-1,4 кВт/час на 1 кг испаренной влаги [3].

Сушка влажного сырья или материалов инфракрасным излучением обычно протекает в два периода, охарактеризованных различным изменением влажности сырья [4].

- в первом периоде влажность сырья уменьшается во времени линейно;
- во втором периоде процесс изменения влажности от времени приобретает характер нелинейного переходного процесса.

Скорость удаления пара с поверхности испарения во всем объеме сушильного агента лимитирует в первом периоде скорость сушки и определяется входными возмущающими внешними воздействиями: скоростью нагрева сырья, температурой и длиной волны инфракрасного излучателя, и удаленностью излучателя от поверхности испарения.

Второй период сушки часто называют периодом падающей скорости сушки. Данный период обезвоживания сырья характеризуется ростом температуры его нагрева, однако температура на поверхности сырья растет быстрее, чем внутри, что приводит к возникновению в сырье градиента температуры, направленного в сторону наружной поверхности, вызывающий явление термовлагопроводности тормозящей в этом случае процесс внутреннего массопереноса [5].

Для инженерных расчётов сушильных установок на практике используются кривые переходного процесса сушки, отображающие изменение скорости и температуры. Получают кривые сушки экспериментально, так как вычисление постоянной времени нагрева невозможно без знания геометрических показателей сырья, объёма и площади внешней поверхности обрабатываемого растительного сырья, что в некоторых случаях затруднено мелкой фракцией обрабатываемого объекта или сложной геометрической структурой как, например, у клевера.

Однако оценка кинетики сушки конкретного сырья позволяет перейти к следующему этапу проектирования радиационных сушильных установок, которым является тепловой расчет. Перед тепловым расчетом ИК установки стоит задача определения мощности генераторов лучистой энергии, его геометрических размеров и расположения в сушильной установке относительно обрабатываемого сырья [6], [7].

Для решения задачи создания эффективных установок для сушки растительного сырья, Лебедевым П. Д. предложено дифференциальное уравнение теплового баланса, которое действительно для расчета технологического регламента сушки сырья и тел любой конфигурации [8].

Уравнение теплового баланса для условий равномерного прогрева по толщине облучаемого тела, в котором энергия, поглощаемая облучаемым сырьем за время  $dt$  будет затрачиваться на его нагрев, отдачу тепла нагреваемым телом в окружающее пространство конвекцией и излучением, и на испарение из него влаги [9] имеет вид:

$$0.86AES_0 d = Gcdt + \alpha_k(t - t_B)Sd\tau + 4.9\varepsilon_{gh} \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \cdot Sd\tau + q'rl^{-x} d\tau \quad (1)$$

где:  $A$  – коэффициент поглощения излучения облучаемым сырьем;

$E$  – плотность облучения, Вт/м;

$S_0$  и  $S$  – площадь облучаемой и полной поверхностей сырья, м;

$H$  – время от начала облучения, ч;

$G$  – вес облучаемого растительного сырья, кг;

$t$  и  $t_B$  – температуры сырья и окружающего воздуха, °C;

$c$  – теплоемкость облучаемого сырья, ккал/кг·град;

$\varepsilon_{gh}$  – приведенная степень черноты облучаемого сырья и внутренних ограждений сушильной установки;

$\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;

$T$  и  $T_0$  – температура сырья и окружающих поверхностей, °C;

$q'$  – скорость испарения вещества (начальная интенсивность), кг/м<sup>2</sup>·ч;

$x$  – показатель поглощения излучения растительным сырьем, 1/м;

$L$  – глубина проницаемости сырья инфракрасным потоком от его наружной поверхности, м.

Отношение общей теплоотдачи (конвекцией и излучением) к потере конвекцией принимают постоянным из-за минимальной величины потерь тепла благодаря малым значениям температуры нагрева облучаемого сырья:

$$\frac{dQ_k + dQ_u}{dQ_k} = \xi \quad (2)$$

При этом значение потерь тепла теплоотдачей за время  $dn$  приближенно определится как:

$$dQ_k + dQ_u = \alpha_k \xi (t - t_B) S d\tau \quad (3)$$

где:  $\alpha_k \xi = \alpha$  – суммарный коэффициент теплообмена, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град.

В практических условиях значение суммарного коэффициента,  $\alpha$  изменяется в пределах от 16 до 20 ккал/м<sup>2</sup> ч·град [9].

С приближением определяют и тепловой баланс облучаемого сырья, так как скорость испарения влаги считают постоянной и равной средней интенсивности  $q'$ . Уравнение можно представить в виде:

$$0.86AE d\tau = \frac{c\gamma}{\sigma} \bar{S} dt + \alpha \bar{S} (t - t_B) d\tau + q' \bar{S} d\tau \quad (4)$$

где:  $S$  – отношение площадей полной поверхности и облучаемой ее части;

$\xi = S/V$  – отношение площади полной поверхности облучаемого сырья к его объему м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – удельный вес облучаемого сырья, кг/м.

Разделив переменные в полученном дифференциальном уравнении и заменив в нем:

$$B = \frac{(0.86AE - q'r\bar{S})\sigma}{c\gamma\bar{S}} \quad (5)$$

$$D = -\frac{\alpha\sigma}{c\gamma} \quad (6)$$

Окончательный вид уравнения теплового баланса облучаемого сырья приобретает вид:

$$d\tau = \frac{dt}{B + D(t - t_B)} \quad (7)$$

Интегрирование полученных выражений по  $\eta$  от  $\eta = 0$  до  $\eta = \eta_i$  и по  $t$  от значений заданной начальной температуры  $t_H$  до конечной температуры  $t_i$ , дает возможность получения выражения соответствующего времени нагрева  $\eta_i$  [3]:

$$\int_0^{\eta_i} d\tau = \int_{t_H}^{t_i} \frac{dt}{B + D(t - t_B)} \quad (8)$$

Из полученного уравнения теплового баланса можно получить уравнение и для кинетики нагрева облучаемого тела:

$$\tau_i = \frac{1}{D} \ln \frac{B + D(t_i - t_B)}{B + D(t_H - t_B)} \quad (9)$$

Ранее проведенные исследования [3], [9] Лебедевым П.Д. свидетельствуют о том, что для интенсификации процесса сушки растительного сырья необходимо нагревать воздух выше конечной температуры объекта сушки, как показано пунктирной линией на рисунке 1, иначе на участке  $bc$  он, охлаждая высушиваемое сырье, начнет играть отрицательную роль.

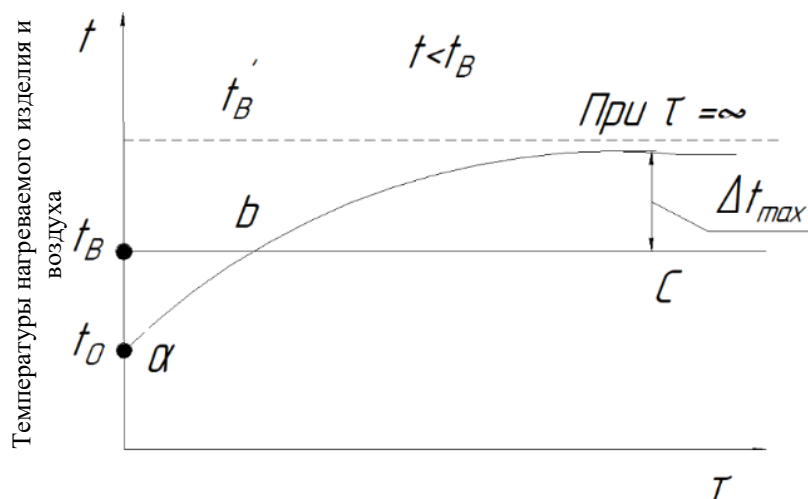


Рис. 1 – Графики изменения температуры нагреваемого продукта и воздуха при инфракрасной сушке

Определение по данным зависимостям основных характеристик поможет при расчете расхода электроэнергии, который зависит от плотности облучения и расположения генератора инфракрасного излучения в установке:

$$E = \frac{Pua}{l^2} \quad (10)$$

где:  $E$  – энергетическая освещенность или плотность облучения, Вт/м;

$P$  – мощность излучателей, Вт;

$L$  – расстояние между инфракрасными излучателями, м;

$u$  – коэффициент эффективности источника, зависящий от степени заполнения облучаемым сырьем пространства и от отношения длины камеры  $L$  к  $h$  – расстоянию от излучателя до облучаемой поверхности сырья. В практических условиях изменяется в пределах 0,7...0,85 [10];

$a$  – коэффициент многократных отражений:

$$a = \frac{1}{1 - q_k q_n \Psi'} \quad (11)$$

где:  $q_k$  – коэффициент отражения камеры;

$q_n$  – коэффициент отражения поверхности облучения изделий;

$\Psi'$  – доля потока, отраженного камерой.

Расход энергии на сушку тогда выразится уравнением:

$$\Theta = \frac{ES_0}{\eta ua} \quad (12)$$

где:  $\eta$  – энергетический КПД излучателя.

Данный расчет позволяет дать оценку установкам для сушки сельскохозяйственного сырья при разработке и проектировании сушильных ИК – установок, так как правильно спроектированная сушильная установка должна обеспечивать точное поддержание режимных параметров сушки для равномерного высыхания сырья во всем объеме камеры. К режимным параметрам сушки относятся наиболее выгодные условия значений температуры, длины волны излучения, влажности, скорости движения.

Таким образом, правильно обоснованные и спроектированные параметры инфракрасной сушильной установки должны обеспечить точное поддержание режимных параметров сушки для равномерного высыхания сырья во всем объеме барабана.

В дальнейшем целесообразно получить математические модели скорости сушки травы в зависимости от влияния управляемых и не управляемых факторов на процесс сушки. Математические модели позволят разработать систему автоматического управления процессом сушки травы инфракрасными лучами.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

1. Попов В.Д. Основы управления технологиями низкотемпературной сушки растительной стебельчатой массы: монография / В.Д. Попов, М.Ш. Ахмедов, А.И. Сухопаров и др., // Санкт-Петербург: ИАЭП, – 2017. – 142 с.
2. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П.Д. Лебедев // М.-Л.: Госэнергоиздат, – 1962. – 320 с.
3. Кузнецов Н.Н. Исследование процесса удаления влаги при приготовлении кормов из трав. / Н.Н. Кузнецов, А.М. Захаров, А.В. Зыков // Известия НВ АУК. 2019. 3(55). 380-388. DOI:10.32786/2071-9485-2019-03-47.
4. Назаров С.А. Комбинированные способы сушки зернистых материалов в виброкипящем слое / С.А. Назаров // Прогрессивные технологии и оборудование для пищевой промышленности: материалы II междунар. научн. техн. конф. – Воронеж: Изд. ВГТА, – ч. II, – 2004. – С. 225-226.
5. Марюшин Л.А. Терморadiационный обогрев и сушка термолабильных материалов / Л.А. Марюшин // Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М: 1997. – 148 с.
6. Яковлев Н.Н. Повышение эффективности процессов сушки и экстрагирования плодов рябины обыкновенной и черноплодной в псевдооживленном слое / Н.Н. Яковлев // Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Воронеж: ВГТА, – 2010. – 19 с.
7. Авроров Г.В. Анализ условий движения влаги под действием теплового потока при высушивании капиллярно-пористых пищевых продуктов / Г.В. Авроров, О.Д. Куканова // Вестник ДИТУД. – Димитровград: – 2007. – №4 (34). – С. 19-22.
8. Попова С.Б. Совершенствование процесса сушки тыквы в технологии плодоовощных концентратов / С.Б. Попова // Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М: МГУПП, – 2004. – 25 с.
9. Зыков А.В. Теоретические предпосылки к разработке и изготовлению высокотемпературной сушилки с инфракрасным излучением / А.В. Зыков // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2019. – № 15. – С. 126-129. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-15-126-129.
10. Юнин В.А. Инфракрасный способ сушки растительного сырья / Юнин В.А. // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. № 16. С. 107-110. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-16-107-110.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Popov V.D. Osnovy` upravleniya texnologiyami nizkotemperaturnoj sushki rastitel'noj stebel'chatoj massy`: monografiya [Fundamentals of technology management for low-temperature drying of plant stalks] / V.D. Popov, M.Sh. Axmedov, A.I. Suxoparov et. al // Sankt-Peterburg: IAE`P, – 2017. – 142 p. [in Russian]
2. Lebedev P.D. Raschet i proektirovanie sushil'ny`x ustanovok [Calculation and design of drying plants]// M.-L.: Gose`nergoizdat, – 1962. – 320 p. [in Russian]
3. Kuznecov N.N. Issledovanie processa udaleniya vlagi pri pri-gotovlenii kormov iz trav. [Fundamentals of technology management for low-temperature drying of plant stalks] / N.N. Kuznecov, A.M. Zaxarov, A.V. Zy`kov // Izvestiya NV AUK. 2019. 3(55). P. 380-388. [in Russian]
4. Nazarov S.A. Kombinirovanny`e sposoby` sushki zernisty`x mate-rialov v vibrokipyashhem sloe [Combined methods of drying granular materials in a vibro-boiling layer] / S.A. Nazarov // Progressivny`e texnologii i oborudova-nie dlya pishhevoj promy`shlennosti: materialy` II mezhdunar. nauchn. texn. Konf [Progressive technologies and equipment for the food industry: materials of the II International Scientific Journal. techn. Conf]. – Voronezh: VGTA Publ. house, – 2004. – P. 225-226. [in Russian]
5. Maryushin L.A. Termoradiacionny`j obogrev i sushka termola-bil'ny`x materialov [Thermoradiation heating and drying of thermolabile materials] / L.A. Maryushin // Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. texn. nauk. – M: 1997. – 148 p. [in Russian]
6. Yakovlev N.N. Povy`shenie e`ffektivnosti processov sushki i e`ks-tragirovaniya plodov ryabiny` oby`knovennoj i chernoplodnoj v psevdoozhizhennom sloe [Improving the efficiency of drying and ex-trading the fruits of mountain ash and prunes in a pseudo-liquefied layer] // Avtoreferat diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. texn. nauk. Voronezh: VGTA, – 2010. – 19 p. [in Russian]
7. Avrorov G.V. Analiz uslovij dvizheniya vlagi pod dejstviem teplovogo potoka pri vy`sushivanii kapillyarno-poristy`x pi-shhevy`x produktov [Analysis of the conditions of moisture movement under the action of heat flow during drying of capillary-porous food products] / G.V. Avrorov, O.D. Kukanova // Vestnik DITUD. - Dimitrovgrad: – 2007. – №4 (34). – P. 19-22.
8. Popova S.B. Sovershenstvovanie processa sushki ty`kvy` v texno-logii plodoovoshhny`x koncentratov [Improvement of the pumpkin drying process in the technology of fruit and vegetable concentrates] / S.B. Popova // Avtoreferat diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. texn. nauk. - M: MGUPP, – 2004. – 25 p. [in Russian]
9. Zy`kov A.V. Teoreticheskie predposy`lki k razrabotke i izgotov-leniyu vy`sokotemperaturnoj sushilki s infrakrasny`m izlucheni-em [Theoretical prerequisites for the development and manufacture of high-temperature dryers with infrared radiation] / A.V. Zy`kov // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2019. – № 15. – P. 126-129. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-15-126-129. [in Russian]
10. Yunin V.A. Infrakrasny`j sposob sushki rastitel`nogo sy`r`ya / Yunin V.A., Zy`kov A.V., Zaxarov A.M. [Infrared method of drying plant raw materials] / V.A. Yunin // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. № 16. P. 107-110. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-16-107-110. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.011>**ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СМАРТ-КОНТРАКТОВ ETHEREUM**

Научная статья

**Команов П.А.<sup>1,\*</sup>, Ревазов Х.Ю.<sup>2</sup>, Тавасиев Д.А.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5640-2322;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3358-6197;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-7859-9461;<sup>1, 2, 3</sup> Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (pavel.komanov[at]yandex.ru)

**Аннотация**

В настоящее время технологии блокчейн находят высокий спрос в разных сферах. Широкое применение находят и смарт-контракты, которые записываются в блокчейн. Наибольшую популярность на данный момент имеют приложения, написанные с помощью смарт-контрактов на платформе Ethereum. Смарт-контракты, как и обычные программы, подвержены различным уязвимостям. В статье будут рассмотрены серьезные уязвимости, методы и инструменты, которые были менее освещены в сферах информационной безопасности и IT, но имеющие огромный потенциал в области обеспечения безопасности смарт-контрактов. Основная цель данной статьи заключается в том, чтобы дать представление об актуальных и серьезных уязвимостях в смарт-контрактах Ethereum и на основе актуальных угроз подобрать актуальные методы по обеспечению безопасности смарт-контрактов на платформе Ethereum.

**Ключевые слова:** смарт-контракт, уязвимости, блокчейн, Ethereum.**A SECURITY STUDY OF ETHEREUM SMART CONTRACTS**

Research article

**Komanov P.A.<sup>1,\*</sup>, Revazov H.Yu.<sup>2</sup>, Tavasiev D.A.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5640-2322;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3358-6197;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-7859-9461;<sup>1, 2, 3</sup> ITMO University, St. Petersburg, Russia

\* Corresponding author (pavel.komanov[at]yandex.ru)

**Abstract**

Currently, blockchain technologies are in high demand in various fields. Smart contracts that are stored in the blockchain are also widely used. The most popular applications at the moment are those made with the help of smart contracts on the Ethereum platform. Smart contracts, like ordinary programs, are subject to various vulnerabilities. This article discusses serious vulnerabilities, methods and tools that have been less covered in the areas of information security and IT, but have a huge potential in the field of smart contract security. The main purpose of this article is to give an idea of the current and major vulnerabilities of Ethereum smart contracts and, based on the threats, select relevant methods for ensuring the security of smart contracts on the Ethereum platform.

**Keywords:** smart contract, vulnerabilities, blockchain, Ethereum.**Введение**

Одной из самых популярных блокчейн платформ по состоянию на 6 апреля 2020 года, исходя из текущей капитализации рынка криптовалют, является Ethereum. Сеть Ethereum способна размещать алгоритмы, выраженные на языке программирования общего назначения. Это позволяет разработчикам создавать множество приложений, от простых кошельков до финансовых систем, новых криптовалют или систем торговли энергией. Вместо того, чтобы создавать отдельный блокчейн для каждого приложения, можно реализовать множество вариантов использования приложений с помощью технологии, известной как смарт-контракты.

Смарт-контракт представляет собой фрагмент кода, хранящийся в блокчейне. Он приводится в действие транзакциями и имеет возможность читать данные или писать их в блокчейн, а также позволяет создавать свои токены, которые работают на платформе Ethereum. Код контракта пишется на языке программирования Solidity [1].

Язык программирования общего назначения на платформе блокчейн дает возможность для реализации широкого спектра децентрализованных приложений. Однако, с другой стороны, такие приложения дают возможность злоумышленникам использовать их в своих корыстных целях. В этой работе исследуем известные и обновленные уязвимости в смарт-контрактах платформы Ethereum. Также в работе исследуем методы и инструменты анализа кода безопасности, используемые для выявления уязвимостей и ошибок в смарт-контрактах. Насколько известно, данная работа будет уникальным вкладом в данную область, поскольку анализ существующих инструментов не проводился.

**Уязвимости в смарт-контрактах Ethereum**

В данном разделе будет дано краткое объяснение каждой уязвимости системы безопасности. Было принято опустить небольшие очевидные проблемы в смарт-контрактах Ethereum и сделать основной упор на серьезные уязвимости в данной системе.

**Уязвимость повторного входа**

Повторный вход считается серьезной уязвимостью, так как была признана крупнейшей атакой из когда-либо совершенных (взлом от 18 июня 2016 года на The DAO) [2]. Принцип данной уязвимости заключается на



взаимодействии между двумя смарт-контрактами, один из которых является контрактом пользователя (X) и мошеннический контракт (Y). Контракт (X) отслеживает несколько внешних адресов для получения баланса и извлекает контрольную сумму. Контракт (Y) начинает взаимодействовать с контрактом (X), и тем самым контракт (X) передает управление контракту (Y). Контракт (X) выполняет функцию внешнего вызова, для отправки некоторого количества эфира в контракт (Y). При этом контракт (Y) может получить несколько возвратов и очистить баланс контракта (X).

Уязвимость повторного входа можно предотвратить, обеспечив фиксацию логики изменения состояния до того, как эфир будет отправлен из контракта посредством внешнего вызова. Еще одним отличным способом может служить, использование мьютекса путем добавления переменной состояния, которая блокирует контракт во время выполнения кода, предотвращая повторные вызовы функций.

### **Неверно обработанные исключения**

Существует много ситуаций, когда исключение может быть вызвано в Solidity, но сам способ обработки этих исключений не всегда одинаков. Обработка исключений основана на взаимодействии между контрактами [3]. Тем самым контракты уязвимы для атак со стороны злоумышленников, если эти исключения не будут обработаны должным образом, то транзакции будут отменены.

### **DoS, вызванная из-за уязвимости внешнего вызова**

Отказ в обслуживании включает в себя достижение предела газа или ограниченным лимитом газа [4]. Данная уязвимость имеет высокую оценку критичности по сравнению с остальными для платформы Ethereum, в то время как другие типы приложений могут восстановиться, смарт-контракты могут быть отключены навсегда всего лишь одной из этих атак.

DoS, вызванная из-за уязвимости внешнего вызова, обусловлена тем, что когда поток управления передается внешнему контракту, выполнение контракта вызывающего абонента может случайно или преднамеренно завершиться неудачей, что и вызывает DoS в контракте вызывающего абонента. Также отказ в обслуживании может быть вызван, когда вызываемый контракт намеренно вызывает откат транзакции, чтобы нарушить выполнение контракта вызывающего абонента.

### **Безгазовая отправка (Gasless send)**

Уязвимость типа «безгазовая отправка» приводит к сбою транзакции, если для конкретного вызова не хватает газа [2]. Газ – внутренняя валюта, которую пользователь должен заплатить для вызова смарт-контракта. Количество газа зависит от сложности вычислений в смарт-контракте, чем сложнее вычисления, тем больше газа придется заплатить. Максимальный лимит газа в сети может меняться со временем в зависимости от комиссии за транзакцию.

Для предотвращения данной уязвимости важно создать исключение, если произойдет сбой из-за расхода газа. Кроме того, важно разработать функции, которые не требуют слишком большого количества газа не только с целью предотвращения сбоя, но и с единственной целью снижения затрат на выполнение контракта.

### **Зависимость от временной метки**

Если контракт использует данную функцию для критической проверки, майнер может манипулировать меткой времени в течение нескольких секунд, при этом изменяя вывод средств в свою пользу [4]. Однако эта уязвимость является серьезной только в том случае, если она используется в критических проверках компонентов контракта.

### **Использование blockhash функции**

Использование blockhash функции аналогично зависимости временной метки, ее не рекомендуется использовать для важных компонентов по той же причине, что и с зависимостью от временной метки, потому что майнеры могут манипулировать данными функциями и изменять вывод средств в свою пользу. Особенно это заметно, когда blockhash используется как источник случайности.

### **Методы и инструменты по обеспечению безопасности смарт-контрактов**

Для того чтобы обнаружить уязвимости в коде приложения, большинство разработчиков приложений используют стандартные правила по их нахождению. При тестировании на выявление уязвимостей в приложениях используется различные методы, в основном это бывают статические и динамические анализаторы кода. В данной статье речь пойдет о фаззинг тестировании [5]. Самым популярным фаззингом считается метод полупрозрачного ящика или тестирование серого ящика. Яркими представителями таких фаззеров являются AFL и AFL Fast. Метод серого ящика предоставляет доступ к внутренней структуре и алгоритмам работы программного обеспечения для дальнейшего написания тест-кейсов [6]. Такое тестирование с точки зрения смарт-контрактов зачастую не эффективно.

ContractFuzzer – это новейший метод фаззинг тестирования черного ящика для смарт-контрактов [7]. Фаззер генерирует тестовые входные данные на основе двоичного интерфейса приложений (ABI) тестируемого смарт-контракта и формирует набор из семи тестовых оракулов (Тест Оракула) [8] для обнаружения следующих уязвимостей: безгазовая отправка, повторный вход, зависимость от временной метки, уязвимость внешнего вызова. Фаззер использует EVM [2] для регистрации и отслеживания поведения смарт-контрактов по случайным сгенерированным транзакциям, анализирует журналы для сообщения об уязвимостях безопасности [5]. Для поддержки некоторых тестовых оракулов фаззер генерирует дополнительные контракты при нечетком тестировании смарт-контрактов.

Если требуется провести анализ безопасности в области смарт-контрактов, в которых присутствуют уязвимости похожие или затрагивающие газ, такие как «безгазовая отправка» или «DDoS атака с ограниченным лимитом газа» [4], необходимо применять метод тестирования GasFuzzer [9]. Фаззер имеет несколько стратегий повышения эффективности обнаружения уязвимостей безопасности. Одна из стратегий GasFuzzer заключается в том, чтобы

отдавать приоритет транзакциям, которые потребляют больше газа, чем другие, для мутации входных параметров. Немного о стратегии тестирования GasFuzzer. GasFuzzer изначально генерирует транзакции случайным образом, подобно ContractFuzzer, и выполняет тестирование смарт-контрактов с этими транзакциями. Далее транзакции видоизменяются и отправляются в блокчейн. Если новые сгенерированные транзакции снова потребляют больше газа, они добавляются в очередь ввода для дальнейших возможных изменений или мутаций. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будет использовано все время тестирования. Далее журналы выполнения анализируются на предмет обнаружения уязвимостей.

Также в области аудита безопасности смарт-контрактов Ethereum необходимо использовать новый инструмент *Gasper*, разработанный Тинг Ченом и другими [10]. Данный инструмент ориентирован только на выявление дорогостоящих схем программирования газа в смарт-контракте через интерфейс командной строки. Он выполняет анализ только для байт-кода, используя алгоритм Дейкстры, который вычисляет расстояние между каждым блоком, соответственно между входным и выходным. *Gasper* также полагается на символическое выполнение, чтобы покрыть все достижимые блоки кода, дизассемблируя его байт-код с помощью дизассемблера. В настоящее время *Gasper* поддерживает обнаружение трех дорогостоящих операций, включая SLOAD, SSTORE и BALANCE. Как уверяет автор статьи, в дальнейшем список операций будет пополняться [10].

*Oyente*. *Oyente* известен как первый и самый популярный инструмент анализа безопасности. Он был разработан генеральным директором и соучредителем Kyber Network Лой Луу [11] и является одним из немногих инструментов, представленных на крупной конференции по безопасности Ethereum Devcon. *Oyente* использует символическое выполнение, чтобы найти потенциальные уязвимости безопасности, включая повторный вход, зависимость от временной метки, неверно обработанные исключения. На ранних стадиях данный инструмент можно было использовать только через интерфейс командной строки. В недавних обновлениях инструмент имеет более удобный веб-интерфейс. Также стоит отметить, что это единственный инструмент, описывающий метод проверки по устранению ложных срабатываний [11].

*Securify*. *Securify* – это веб-инструмент для анализа безопасности смарт-контрактов. Данный инструмент обеспечивает автоматизацию проверки смарт-контрактов, гарантию обнаружения конкретных уязвимостей и расширяемость для захвата любых недавно обнаруженных уязвимостей. *Securify* использует формальную проверку, но также использует статический анализ кода. *Securify* охватывает следующие проблемы безопасности смарт-контрактов: перераспределение транзакций, рекурсивные вызовы, небезопасные шаблоны кодирования, неожиданные потоки эфира и использование ненадежных входных данных. В недавнем обновлении от 13 апреля 2020 года *Securify* v2.0 пополнил базу уязвимостей и поддерживает 38 новых уязвимостей, реализует новый контекстно-зависимый статический анализ и анализирует контракты, написанные на Solidity версий 0.5.8 и выше.

*SolCover*. *SolCover* обеспечивает покрытие кода для тестирования смарт-контрактов платформы Ethereum. Опираясь на покрытие кода, *SolCover* измеряет и описывает степень общего тестирования смарт-контракта. Несмотря на то, что данный метод тестирования не является механизмом для выявления конкретных уязвимостей, можно утверждать, что он создает более безопасную среду с философией, согласной которой, чем больше проведено тестов, тем выше показатель найденных уязвимостей.

## Заключение

В результате исследования были рассмотрены основные серьезные уязвимости смарт-контрактов в блокчейне на платформе Ethereum. В данной статье были рассмотрены методы и инструменты по аудиту безопасности применительно к смарт-контрактам на платформе Ethereum. Была проведена обширная работа в поиске методов и инструментов, которые ранее не были освещены в области безопасности смарт-контрактов на платформе Ethereum.

В дальнейшем планируется дополнить список методов и инструментов по обеспечению безопасности смарт-контрактов и провести сравнительный анализ каждого из них.

## Конфликт интересов

Не указан.

## Conflict of Interest

None declared.

## Список литературы / References

1. Боровик В. К вопросу о безопасности смарт-контрактов / В. Боровик и др. // Вестник Чувашского университета. – 2018. – №. 1.
2. Алиев И. А. Уязвимости смарт-контрактов блокчейн-платформы ethereum / И. А. Алиев // Научные записки молодых исследователей. – 2019. – №. 3.
3. Atzei N. A survey of attacks on Ethereum smart contracts (SoK) / N. Atzei, M. Bartoletti, T. Cimoli // Proc. of Int. Conf. on Principles of Security and Trust. Berlin, Heidelberg, Springer, 2017, pp. 164–186.
4. Iuganov A. A calculation methodology of assess for software security / A. Iuganov, D. Zakoldaev. – 2017, no. 1(23), pp. 20–23.
5. Fu Y. EVMFuzzer: Detect EVM vulnerabilities via fuzz testing / Y. Fu, M. Ren, F. Ma, H. Shi, X. Yang, Y. Jiang, H. Li, and X. Shi // Proc. 27th ACM Joint Meeting Eur. Softw. Eng. Conf. Symp. Found. Softw. Eng. - ESEC/FSE, Tallinn, Estonia, Aug. 2019, pp. 1110–1114.
6. Böhme M. Coverage-based greybox fuzzing as Markov chain / M. Böhme, V.-T. Pham, and A. Roychoudhury, // Proc. ACM SIGSAC Conf. Comput. Commun. Secur., Vienna, Austria, Oct. 2016, pp. 1032–1043.
7. Jiang B. Contractfuzzer: Fuzzing smart contracts for vulnerability detection / Jiang B., Liu Y., Chan W. K. // 2018 33rd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). – IEEE, 2018. – P. 259–269.
8. Li N. Test oracle strategies for model-based testing / Li N., Offutt J. // IEEE Transactions on Software Engineering. – 2016. – Vol. 43. – №. 4. – P. 372–395.

9. Ashraf I. GasFuzzer: Fuzzing Ethereum Smart Contract Binaries to Expose Gas-Oriented Exception Security Vulnerabilities / Ashraf I. et al. // IEEE Access. – 2020.
10. Chen T. Under-optimized smart contracts devour your money / T. Chen, X. Li, X. Luo, and X. Zhang, // Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER), 2018 IEEE 24th International Conference on. IEEE, 2018, pp. 442–446.
11. Luu L. Making smart contracts smarter / Luu L. et al. // Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC conference on computer and communications security. – 2016. – С. 254-269.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Borovik V. K вопросу o bezopasnosti smart-kontraktov [To the question of the security of smart contracts] / V. Borovik et al. // Vestnik Chuvashskogo universiteta [Bulletin of the Chuvash University]. – 2018. – №. 1. [in Russian]
2. Aliev I. A. Uyazvimosti smart-kontraktov blokchejn-platformy ethereum [Vulnerabilities of smart contracts of the ethereum blockchain platform] / I. A. Aliev // Scientific notes of young researchers [Nauchnye zapiski molodyx issledovatelej]. – 2019. – №. 3. [in Russian]
3. Atzei N. A survey of attacks on Ethereum smart contracts (SoK) / N. Atzei, M. Bartoletti, T. Cimoli // Proc. of Int. Conf. on Principles of Security and Trust. Berlin, Heidelberg, Springer, 2017, pp. 164–186.
4. Iuganson A. A calculation methodology of assess for software tecurity / A. Iuganson, D. Zakoldaev. – 2017, no. 1(23), pp. 20–23.
5. Fu Y. EVMFuzzer: Detect EVM vulnerabilities via fuzz testing / Y. Fu, M. Ren, F. Ma, H. Shi, X. Yang, Y. Jiang, H. Li, and X. Shi // Proc. 27th ACM Joint Meeting Eur. Softw. Eng. Conf. Symp. Found. Softw. Eng. - ESEC/FSE, Tallinn, Estonia, Aug. 2019, pp. 1110–1114.
6. Böhme M. Coverage-based greybox fuzzing as Markov chain / M. Böhme, V.-T. Pham, and A. Roychoudhury, // Proc. ACM SIGSAC Conf. Comput. Commun. Secur., Vienna, Austria, Oct. 2016, pp. 1032–1043.
7. Jiang B. Contractfuzzer: Fuzzing smart contracts for vulnerability detection / Jiang B., Liu Y., Chan W. K. // 2018 33rd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). – IEEE, 2018. – P. 259-269.
8. Li N. Test oracle strategies for model-based testing / Li N., Offutt J. // IEEE Transactions on Software Engineering. – 2016. – Vol. 43. – №. 4. – P. 372-395.
9. Ashraf I. GasFuzzer: Fuzzing Ethereum Smart Contract Binaries to Expose Gas-Oriented Exception Security Vulnerabilities / Ashraf I. et al. // IEEE Access. – 2020.
10. Chen T. Under-optimized smart contracts devour your money / T. Chen, X. Li, X. Luo, and X. Zhang, // Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER), 2018 IEEE 24th International Conference on. IEEE, 2018, pp. 442–446.
11. Luu L. Making smart contracts smarter / Luu L. et al. // Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC conference on computer and communications security. – 2016. – С. 254-269.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.012>

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОФИСА УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОЕКТАМИ

Научная статья

Ксенз Н.С.<sup>1,\*</sup>, Пипченко М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4131-8766;

<sup>1, 2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

\* Корреспондирующий автор (nsksenz[at]sfedu.ru)

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы формирования структур, обеспечивающих отбор высокотехнологичных проектов, ориентированных на реализацию стратегии. Обсуждаются преимущества создания офиса управления проектами. Представлена организационная структура офиса управления проектами, полученная при помощи метода концептуального конструирования, обеспечивает поддержку целей. Представлены девятнадцать критериев по пяти категориями для отбора высокотехнологичных проектов. Предложен профиль высокотехнологичного проекта, как инструмент сравнительного анализа. Структура базы знаний офиса управления высокотехнологичными проектами и взаимодействие с ней сотрудников проектного офиса представлены в виде диаграммы классов UML.

**Ключевые слова:** проектный офис, высокотехнологичные проекты, критерии отбора проектов, структура проектного офиса, структура базы знаний.

## FORMING THE STRUCTURE OF A HIGH-TECH PROJECT MANAGEMENT OFFICE

Research article

Ksenz N.S.<sup>1,\*</sup>, Pipchenko M.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4131-8766;

<sup>1, 2</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

\* Corresponding author (nsksenz[at]sfedu.ru)

### Abstract

The article deals with the formation of structures that ensure the selection of high-tech projects centered on the strategy implementation. The study discusses the advantages of creating a project management office and presents its organizational structure obtained using the method of conceptual design provides support for goals. The article presents nineteen criteria in five categories for the selection of high-tech projects and proposes the profile of a high-tech project is proposed as a tool for comparative analysis. The study illustrates the structure of the knowledge base of the high-tech project management office and the interaction of the project office employees with it in the form of a UML class diagram.

**Keywords:** project office, high-tech projects, project selection criteria, project office structure, knowledge base structure.

### Введение

Каждый реализуемый проект должен соответствовать общей корпоративной стратегии предприятия [1], [2]. Здесь важное значение приобретает создание такой бизнес-единицы как проектный офис, благодаря которому формируется система отбора, планирования и повышения качества выполнения проектов [3], [4].

В отчете PMI HQ «Pulse of the Profession» за 2018 год [5] указано, что только 58 % опрошенных организаций осознают ценность методов управления проектами и 41% организаций осознают ориентацию проектов на достижения стратегических целей как основную функцию проектного офиса.

Именно офис управления проектами позволяет решить важнейшие задачи: отбор проектов, соответствующих долгосрочной программе развития организации, а также управление проектами в ходе реализации для контроля и регулирования временных ограничений и финансовых возможностей.

### Основная часть

Управление проектами в общем виде строится с помощью методов и принципов, применимых к проектам в разных отраслях, но каждая сфера деятельности имеет конкретные детали планирования, которые обязательно должны быть учтены и выполнены. Высокотехнологичные проекты обладают своей спецификой, поэтому для организаций, работающих с подобными задачами, важно создать организационную структуру – офис управления проектами, чтобы обеспечивать эффективную реализацию высокотехнологичных проектов в соответствии с корпоративной стратегией предприятия [6]. Целесообразно разработать структуру офиса управления высокотехнологичными проектами при помощи метода концептуального конструирования [7], [8] (см. рисунок 1). Повышение эффективности реализации стратегии предприятия – основная цель, на которой сосредоточены все усилия проектной команды. В зависимости от выбранной стратегии проектный офис определяет состав портфеля проектов и долгосрочные цели компании. Также определены цели, функции и реализующие классы, благодаря которым будет достигнута главная цель.

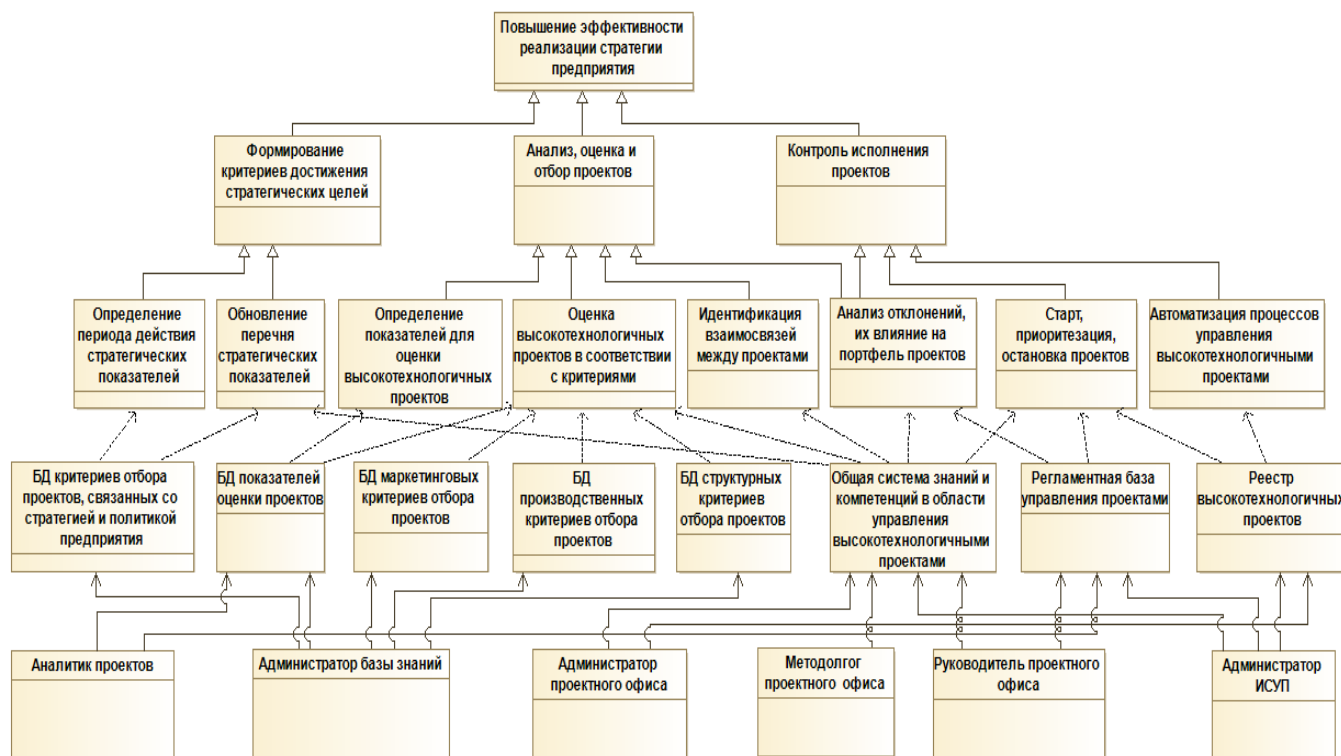


Рис. 1 – Структура офиса управления высокотехнологичными проектами

Взаимосвязь реализующих классов - сотрудников управления высокотехнологичными проектами целесообразно представлена в классическом виде организационной структуры на рисунке 2.

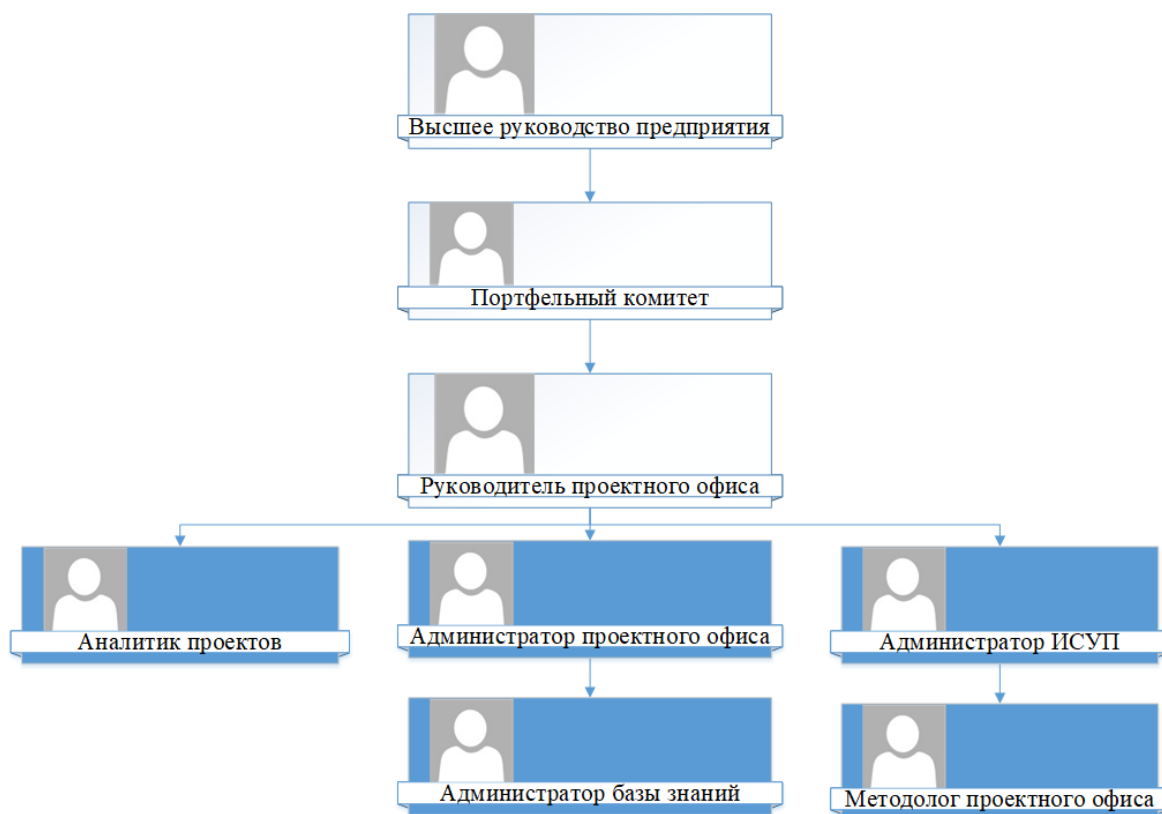


Рис. 2 – Организационная структура проектного офиса

Разработанная структура, в общем виде, соответствует функциональному разделению задач и объему полномочий сотрудников и может быть применима в организациях, ориентированных на выполнение высокотехнологичных проектов, что позволит повысить качество реализации проектов в долгосрочной перспективе.

Задачей проектного офиса верхнего уровня является отбор для реализации проектов, способствующих достижению стратегических целей кампании. Для оценки ориентации проекта на стратегию, сравнения их между собой и итогового отбора необходимо определить критерии по категориям традиционным для высокотехнологичных проектов: стратегия и политика предприятия; маркетинг; финансы; НИОКР; производство [9], [10], [11].

Высокотехнологичные проекты обладают своей спецификой, в данной работе определены критерии, которые позволяют отбирать проекты в соответствии с выбранной стратегией предприятия. Критерии отбора высокотехнологичных проектов по категориям и значения, которые они могут принимать представлены в таблице 1. В зависимости значений, которые принимают критерии, определяется уровень соответствия проекта стратегии и принимается решение о его включении в портфель. Построение профилей высокотехнологичных проектов облегчают процедуру сравнительного анализа для решения задачи отбора проектов, пример профиля представлен на рисунке 3.

Таблица 1 – Критерии отбора высокотехнологичных проектов для достижения стратегии

№	Категория	Раздел	Вопрос	Критерии
1	Критерии, ориентированные на стратегию и политику предприятия	Стратегия	Производится ли отбор проекта с учетом корпоративной стратегии предприятия?	Да=1... Частично=5... Нет=10
		Отношение к риску	Оцениваются ли частные риски проекта?	Да=1... Частично=5... Нет=10
		Отношение к нововведениям	Способствует ли руководство нововведениям?	Да=1... Частично=5... Нет=10
		Временной аспект	Цели предприятия ориентированы на долгосрочную перспективу?	Да=1... Частично=5... Нет=10
		Вероятность изменений	Каков процент требований, которые могут с определенной степенью вероятности измениться или возникнуть на протяжении проекта?	50%=1... 25%=5... 5%=10
2	Маркетинговые критерии	Выявление потребностей	Существует ли рыночная потребность в продукте/технологии?	Да=1... Вероятно=5... Нет=10
		Воздействие на существующие продукты	Концентрирует ли существующий продукт в себе инвестиции компании?	Да=1... Частично=5... Нет=10
		Уровень конкуренции	Имеются ли на рынке сильные конкуренты?	Да=1... Вероятно=5... Маловероятно=10
		Каналы распределения	Имеется ли необходимость в новых каналах распределения?	Да=1... Вероятно=5... Маловероятно=10
		Ценообразование	Надо ли изменять стратегию ценообразования?	Да=1... Вероятно=5... Маловероятно=10
		Стартовые затраты	Каков процент затрат на начальное продвижение продукта/технологии на рынок?	80%=1... 50%=5... 20%=10
3	Структурные критерии	Состав и количество исследовательских, разрабатывающих и других научно-технических структурных подразделений	Имеется ли достаточное количество подразделений, включая экспериментальные и испытательские комплексы?	Да=1... Частично=5... Нет=10
		Состав и количество совместных предприятий	Имеется ли достаточное количество совместных предприятий, занятых использованием новой технологии и созданием новой продукции?	Да=1... Частично=5... Нет=10
		Численность и структура сотрудников, занятых в НИОКР	Имеется ли достаточное количество опытных и компетентных сотрудников?	Да=1... Частично=5... Нет=10

Продолжение таблицы 1 – Критерии отбора высокотехнологичных проектов для достижения стратегии

Предложение таблицы 1. Критерии отбора высокотехнологичных проектов для достижения стратегии					
№		Категория	Раздел	Вопрос	Критерии
4	4.1	Производственные критерии	Технологии, соответствующие типу производства	Имеются ли все необходимые для производства технологии, соответствующие возможностям?	Да=1... Частично=5... Нет=10
	4.2		Обеспеченность уникальными материалами и комплектующими изделиями	Имеются ли уникальные материалы и комплектующие изделия для реализации высокотехнологичного проекта?	Да=1... Частично=5... Нет=10
	4.3		Гибкость производства	Способно ли производство «воспринять» новые изделия и выпускать их с конкурентоспособной ценой?	Да=1... Вероятно=5... Маловероятно=10
	4.4		Степень использования существующих технологий и оборудования	Каков процент применения технологий и оборудования современного рынка в компании?	80%=1... 50%=5... 20%=10
	4.5		Критичность продукта/услуги	Какой ущерб составят ошибки и дефекты проекта/продукта? (от незначительных до массовой катастрофы)	Сроки=1... Несущественные деньги... Существенные деньги =5... Человеческая жизнь... Много человеческих жизней=10

## КРИТЕРИИ ОТБОРА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОЕКТОВ

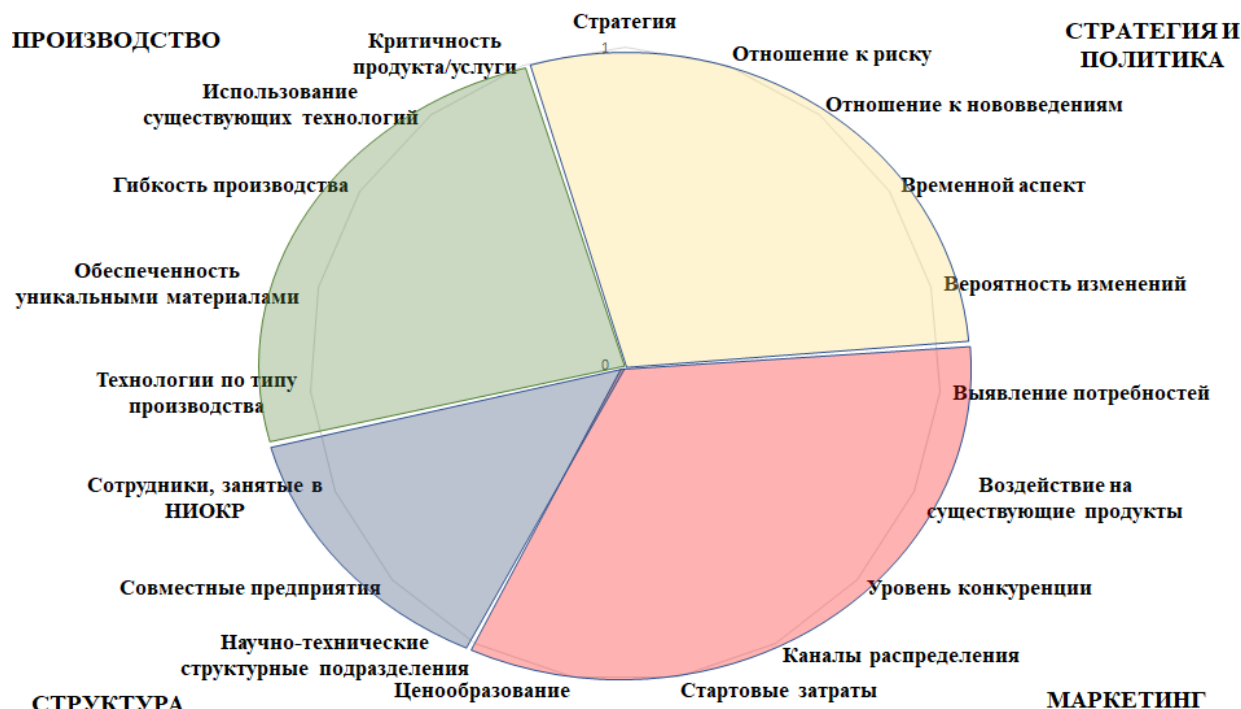


Рис. 3 – Профиль высокотехнологичного проекта

Обязательной частью офиса управления проектами является база знаний, нацеленная на эффективное использование накопленных данных и интеллектуального капитала предприятия, являющихся одними из основных источников конкурентного преимущества. Целесообразно построить структуру базы знаний офиса управления высокотехнологичными проектами в виде диаграммы классов. Структура базы знаний офиса управления высокотехнологичными проектами представлена на рисунке 4.

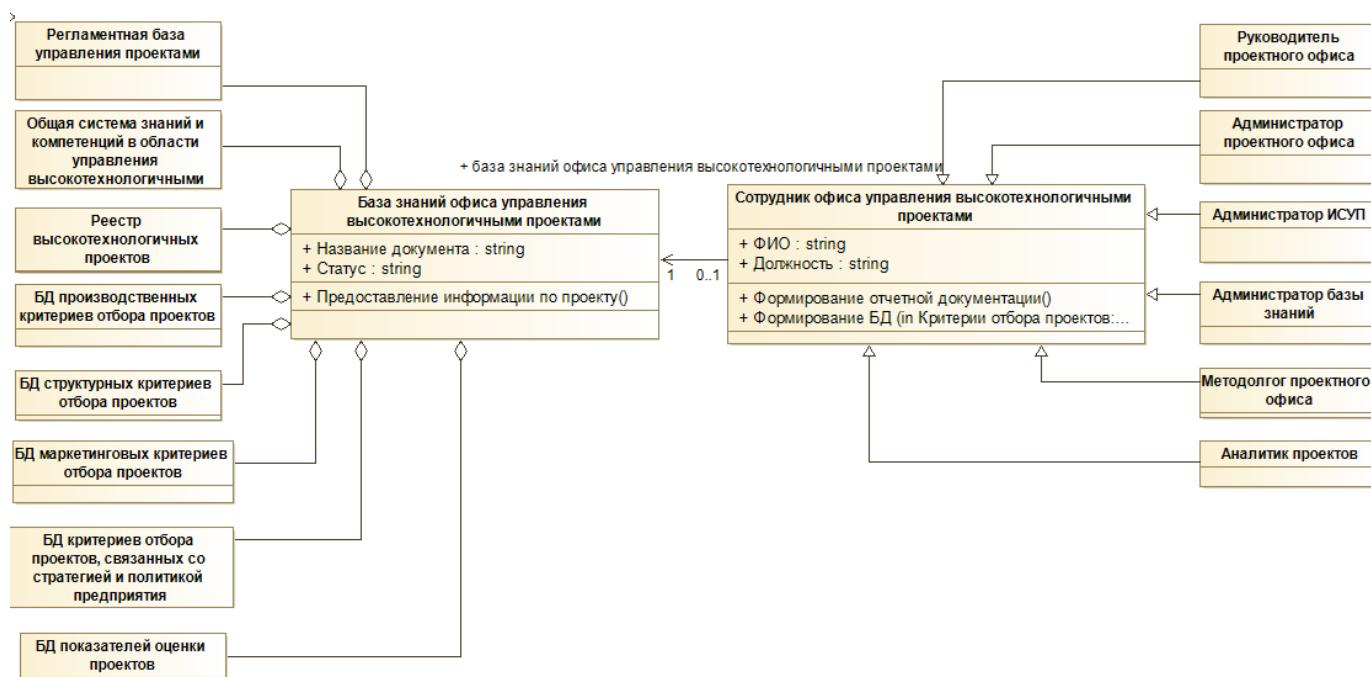


Рис. 4 – Структура базы знаний офиса управления высокотехнологичными проектами и взаимодействие с ней сотрудников проектного офиса

В построенной базе знаний собраны показатели критериев отбора высокотехнологичных проектов указанные таблицы 1. Данные критерии, хранящиеся в базе, помогут анализировать отдельные проекты, проводить сравнительный анализ и ранжировать проекты по сложности их реализации, направленности на достижения научно-технических результатов, соответствию стратегическим целям.

### Заключение

Проектирование офиса управления высокотехнологичными проектами – важный шаг для обеспечения стабильного функционирования и развития организаций, в частности, инновационных предприятий в конкурентном мире. Полученные организационная структура офиса управления проектами, а также база знаний позволят осуществлять такие функции как: формирование критериев достижения стратегической цели, анализ, оценка, отбор проектов и контроль их исполнения. Представленные в работе критерии отбора и профили высокотехнологичных проектов предлагаются как инструменты для отбора проектов, ориентированных на стратегию.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Карасев В. А. Исследование практических подходов к адаптации системы контроля проектов к стратегии инновационной компании / В. А. Карасев, С. А. Титов // Экономика и предпринимательство. – 2014. – №. 5-2. – С. 522-526.
2. Илларионов А. Портфель проектов / А. Илларионов, Э. Клименко // Инструмент стратегического управления предприятием. М.: Альпина Паблишер. – 2013.
3. Титов С. А. Проектные офисы как элемент корпоративной системы управления проектами: анализ и классификация / С. А. Титов, Н. А. Новикова // Вестник университета. – 2014. – №. 14.
4. Грачева А. Д. Проектный офис как инновационная инфраструктура управления инновационными проектами / А. Д. Грачева // Вестник науки и образования. – 2020. – №. 4-1 (82).
5. Pulse of the Profession 2018. [Electronic resource] – URL: <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2018> (accessed 24.11.2020).
6. Зайнитдинова Я. Р. Исследование некоторых особенностей функционирования проектного офиса на наукоёмком предприятии / Я. Р. Зайнитдинова, И. О. Найдис // Синергия Наук. – 2019. – №. 31. – С. 450-466.
7. Свечкарев В.П. Концептуальное конструирование интегрированных технологических систем: информационных подход / В.П. Свечкарев // Сев.-Кавк. науч. центр высш. шк., Ростов н/Д, 2003.
8. Свечкарев В. П. Механизмы интеграции UML диаграмм / В.П. Свечкарев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2004. – Т. 37. – №. 2.
9. Тамахина Е. А. Критерии отбора и оценки проектов НИОКР / Е. А. Тамахина // Социально-экономические явления и процессы. – 2011. – №. 1-2.
10. Лапаев Д.Н. Организация НИОКР: учеб. Пособие / Д.Н. Лапаев [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2017. – С. 5.
11. Глаз О. В. Экономические методы оценки эффективности инноваций на предприятии / О. В. Глаз, И. Н. Казакова // Современная наука и инновационные образовательные технологии. – 2019. – С. 24-26.



**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Karasev V. A. Issledovanie prakticheskikh podkhodov k adaptacii sistemy kontrolja proektov k strategii innovacionnoj kompanii [Research of Practical Approaches to Adaptation of the Project Control System to the Strategy of an Innovative Company] / V. A. Karasev, S. A. Titov // *Ehkonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship]. – 2014. – No. 5-2, pp. 522-526 [in Russian]
2. Illarionov A. Portfel' proektov [Project Portfolio] / A. Illarionov, E. Klimenko // *Instrument strategicheskogo upravlenija predpriatiem* [Instrument of Strategic Enterprise Management]. M.: Al'pina Publisher. – 2013. [in Russian]
3. Titov S. A. Proektnye ofisy kak ehlement korporativnoj sistemy upravlenija proektami: analiz i klassifikacija [Project Offices as an Element of the Corporate Project Management System: Analysis and Classification] / S. A. Titov, N. A. Novikova // *Vestnik universiteta* [Bulletin of the University]. – 2014. – No. 14. [in Russian]
4. Gracheva A. D. Proektnyj ofis kak innovacionnaja infrastruktura upravlenija innovacionnymi proektami [Office as an Innovative Infrastructure for the Management of Innovative Projects] / A. D. Gracheva // *Vestnik nauki i obrazovanija* [Bulletin of Science and Education]. – 2020. – No. 4-1 (82) [in Russian]
5. Pulse of the Profession 2018. [Electronic resource] – URL: <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2018> (accessed: 24.11.2020)
6. Zajjnitdinova Ja. R. Issledovanie nekotorykh osobennostej funkcionirovanija proektnogo ofisa na naukojomkom predpriatii [Study of Some Peculiarities of Functioning of the Project Office on the High-Tech Enterprise] / Ja. R. Zajjnitdinova, I. O. Najjdis // *Sinergija Nauk* [Synergy of Sciences]. – 2019. – No. 31. – pp. 450-466 [in Russian]
7. Svechkarev V.P. Konceptual'noe konstruirovanie integrirovannykh tekhnologicheskikh sistem: informacionnykh podkhod [Conceptual Design of Integrated Technological Systems: Information Approach] / V. P. Svechkarev // North Caucasus Scientific Center of Higher Education, Rostov-on-Don, 2003 [in Russian]
8. Svechkarev V. P. Mekhanizmy integracii UML diagramm [Mechanisms of Integration of UML Diagrams] / V. P. Svechkarev // *Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* [Bulletin of the Southern Federal University. Technical Sciences.] – 2004. – Vol. 37. – No. 2. [in Russian]
9. Tamakhina E. A. Kriterii otbora i ocenki proektov NIOKR [Criteria for Selection and Evaluation of R&D Projects] / E. A. Tamakhina // *Social'no-ehkonomicheskie javlenija i processy* [Socio-Economic Phenomena and Processes]. – 2011. – No. 1-2. [in Russian]
10. Lapaev D.N. Organizacija NIOKR: ucheb. posobie [Organization of R&D: Manual] / D.N. Lapaev et al.; Nizhny Novgorod State Technical University. – N. Novgorod, 2017. – p. 5 [in Russian]
11. Glaz O. V. Ehkonomicheskie metody ocenki ehffektivnosti innovacij na predpriatii [Economic Methods for Evaluating the Effectiveness of Innovations in the Enterprise] / O. V. Glaz, I. N. Kazakova // *Sovremennaja nauka i innovacionnye obrazovatel'nye tekhnologii* [Modern Science and Innovative Educational Technologies]. – 2019. – pp. 24-26 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.013>**ПРИЗНАКИ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЕНТИЛЯТОРОВ**

Научная статья

**Парийская А.Ю.<sup>1</sup>, Мокряк А.В.<sup>2,\*</sup>**<sup>1, 2</sup> Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (mokryakanna[at]mail.ru)

**Аннотация**

В настоящее время в быту и в промышленности широко распространено использование электрических тепловентиляторов для обогрева помещения. Нарушение правил эксплуатации, таких как близкое расположение, к легко воспламеняющимся материалам, может привести к воспламенению и последующему за ним пожару.

В данной статье рассмотрена пожарная опасность бытовых электрических тепловентиляторов, нагревательными элементами которых является спираль и посвящена морфологическим признакам, формирующимся на тепловентиляторах и позволяющим при оценке их в комплексе установить и обосновать причину пожара.

Приведены характерные морфологические признаки аварийного режима работы тепловентиляторов, которые могут быть использованы при экспертном исследовании после пожара

**Ключевые слова:** тепловентилятор, нагревательная спираль, пожарно-техническая экспертиза, сканирующая электронная микроскопия, морфология, пожар.

**SIGNS OF MALFUNCTION OF HOUSEHOLD ELECTRIC FAN HEATERS**

Research article

**Pariyskaya A.Yu.<sup>1</sup>, Mokryak A.V.<sup>2,\*</sup>**

Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

\* Corresponding author (mokryakanna[at]mail.ru)

**Abstract**

The use of electric fan heaters is currently very widespread both in everyday life and in workplace. Improper handling of these devices, such as close proximity to highly flammable materials, can lead to ignition and subsequent fire.

The current article examines the fire hazard of household electric fan heaters, the heating elements of which are a coil, and discusses the morphological features of fan heaters that, when examined, allow to fully determine the cause of the fire.

The study provides distinct morphological characteristics of the malfunction of fan heaters, which can be used in the expert study after a fire.

**Keywords:** fan heater, heating coil, fire investigation, scanning electron microscopy, morphology, fire.

По статистике пожаров (рисунок 1), как в РФ, так и за рубежом, пожары, вызванные нарушением правил устройства и эксплуатации (НПУиЭ) электрооборудования, составляют 30% от общего числа [1].

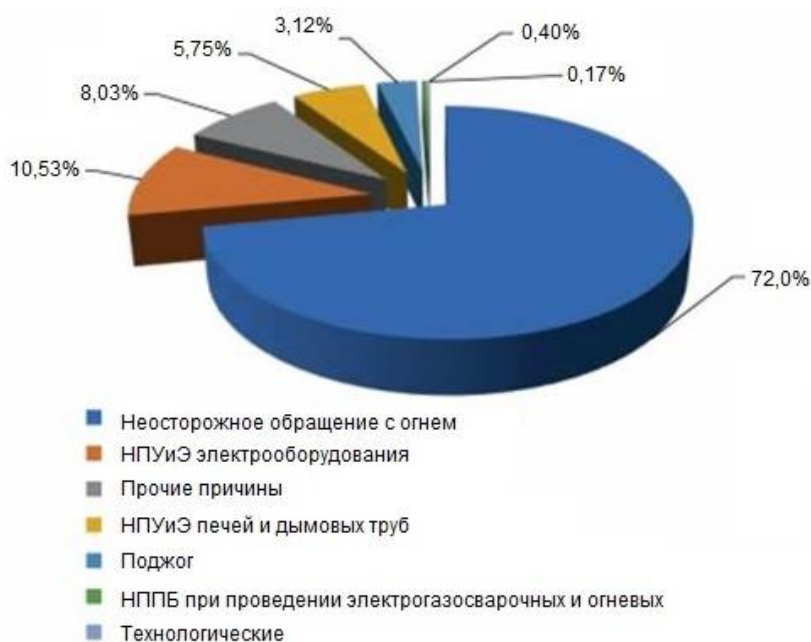


Рис. 1 – Распределение количества пожаров, произошедших в Российской Федерации в 2019г., по причинам их возникновения

Использование электроэнергии в быту и на производстве вполне закономерно связано с риском возникновения пожара. Задача пожарно-технического эксперта – реконструировать процесс возникновения и развития горения или доказать отсутствие в рассматриваемом случае взаимосвязи (причинно-следственной связи) в системе «электрооборудование – пожар».

В экспертных заключениях любое оплавление или разрыв провода трактуется как след короткого замыкания (КЗ). Короткое замыкание часто предшествуют утечки тока через поврежденную изоляцию, постепенно развивающиеся в неметаллическое КЗ и сверхтоки. КЗ формируют режим перегрузки и загораются не окружающие объекты, вещества и материалы, а собственная изоляция провода. Свой вклад в формирующуюся суммарную морфологическую картину вносят режимы большого переходного сопротивления (БПС), последовательный и параллельный дуговой пробой и др. [2].

Пожарная опасность увеличивается при препятствовании свободному выходу тепловых потоков из тепловентилятора.

Как известно, тепловентилятор — это электронагревательное устройство, создающее направленный поток теплого воздуха. Принцип его действия заключается в создании воздушного потока, который поступает к нагревательному элементу, в результате чего он нагревается и далее выдувается через решетку в окружающую среду.

Нагревательные элементы бывают спиральными, трубчатыми и керамическими. Тепловентиляторы с нагревательной спиралью отличаются высокой пожароопасностью, по нескольким причинам. Во-первых, это высокая температура нагрева спирали порядка 1000° С. Во-вторых, особенности конструкции тепловентилятора представляет открытый тип спирали. В-третьих, близость ее расположения с горючими элементами корпуса прибора, а также изоляции токоведущих проводников. При этом часто конструкция тепловентилятора не предполагает защиту спирали [3].

Авторы статьи участвовали в выполнении пожарно-технической экспертизы по пожару, в которой объектами исследования были, в частности тепловентиляторы. Они были установлены в нескольких различных туристских палатках с примерно одинаковой пожарной нагрузкой. Один из тепловентиляторов (обозначим его объект №1) располагался в зоне, которая по показаниям свидетелей уверенно определялась, как очаг пожара. У экспертов была возможность сравнить термические поражения тепловентиляторов, изъятых с разных мест, выделив специфические для очага пожара морфологические признаки [4].

Исследования проводили визуально, а также с использованием инструментальных методов — сканирующая электронная микроскопия и рентгенофлуоресцентный элементный анализ.

На исследование были представлены остатки тепловентиляторов — один из очага пожара объект №1 (рисунок 2) и три из зоны горения (объекты сравнения), объект №2 (рисунок 3).



Рис. 2 – Фото остатков тепловентилятора (объекта №1), изъятых с места пожара



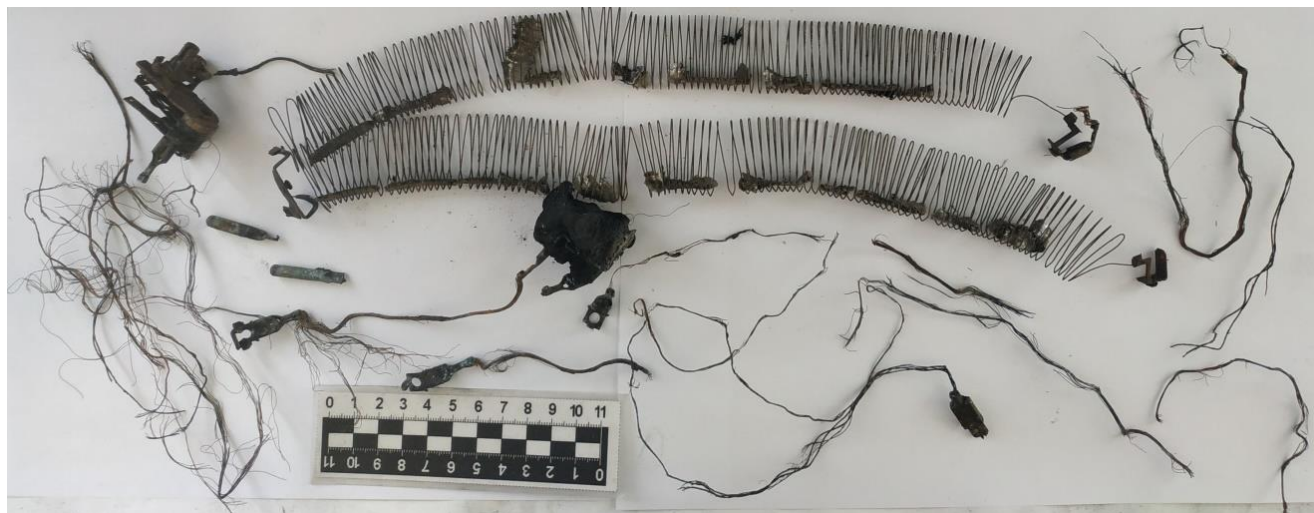


Рис. 3 – Фото остатков тепловентилятора (объекта № 2), изъятых с места пожара

Для исследования был отобран фрагмент нагревательной спирали с объекта № 1.

При визуальном исследовании было обнаружено, что спираль с объекта № 1 фрагментирована на множество частей (рисунок 4). У тепловентилятора с объекта №2 спираль в целом сохранилась (рисунок 3).



Рис. 4 – Фото фрагментированных частей нагревательной спирали

При этом спираль имеет локальные повреждения в виде уменьшения ее сечения (рисунок 5 и 6), которые отсутствуют на аналогичной спирали, объектов сравнения (рисунок 7).

Уменьшение сечения спирали может происходить либо в результате плавления металла, либо за счет окисления в виде коррозии при повышенных температурах.

Пожарная нагрузка в зонах установки всех тепловентиляторов была примерно одинакова, тепловыделение, соответственно, тоже. Поэтому причиной локального температурного максимума, вероятнее всего являются, меньшие теплотери работающего вентилятора. Такое могло произойти, если, например, вентилятор оказался теплоизолирован от окружающей среды упавшим на него предметом одежды, постельной принадлежностью, или он опрокинулся набок и перекрылся канал подачи холодного или выхода горячего воздуха [5].

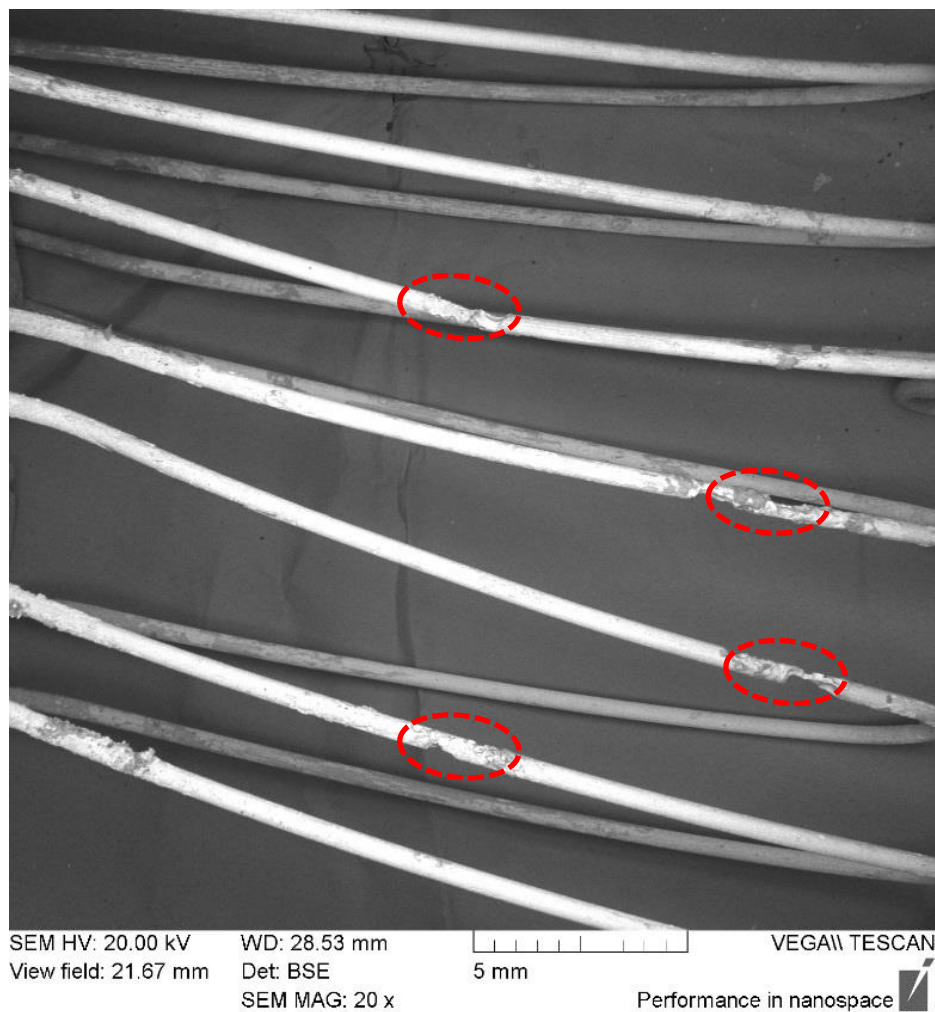


Рис. 5 – Локальные повреждения нагревательной спирали тепловентилятора, СЭМ  
Примечание: пунктиром выделены поврежденные участки

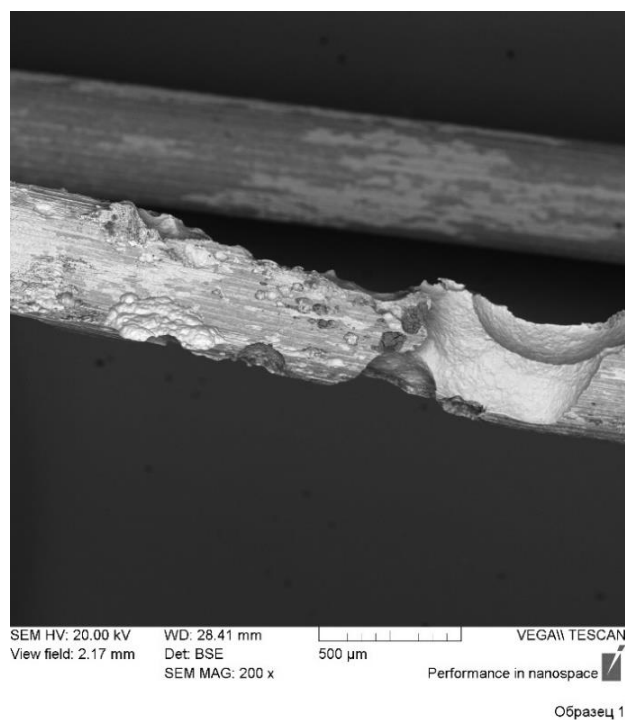
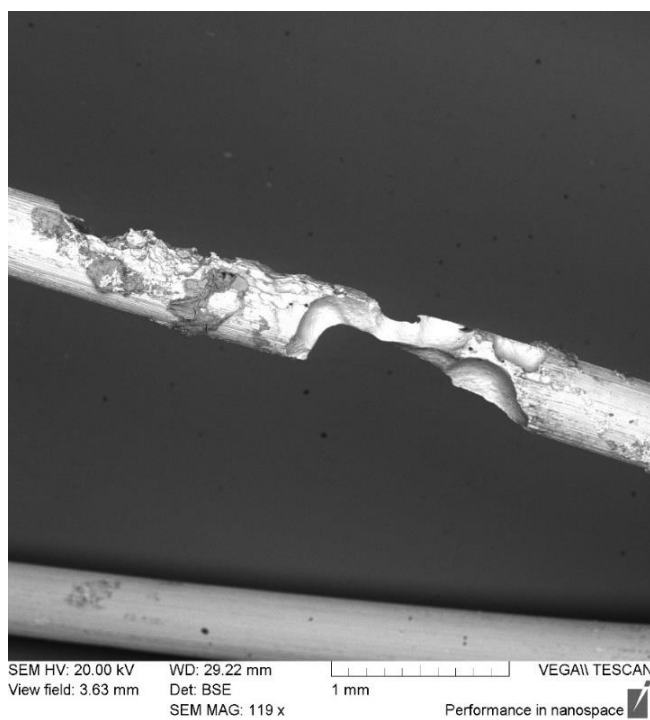


Рис. 6.1 – Крупный план повреждений нагревательной спирали тепловентилятора, СЭМ

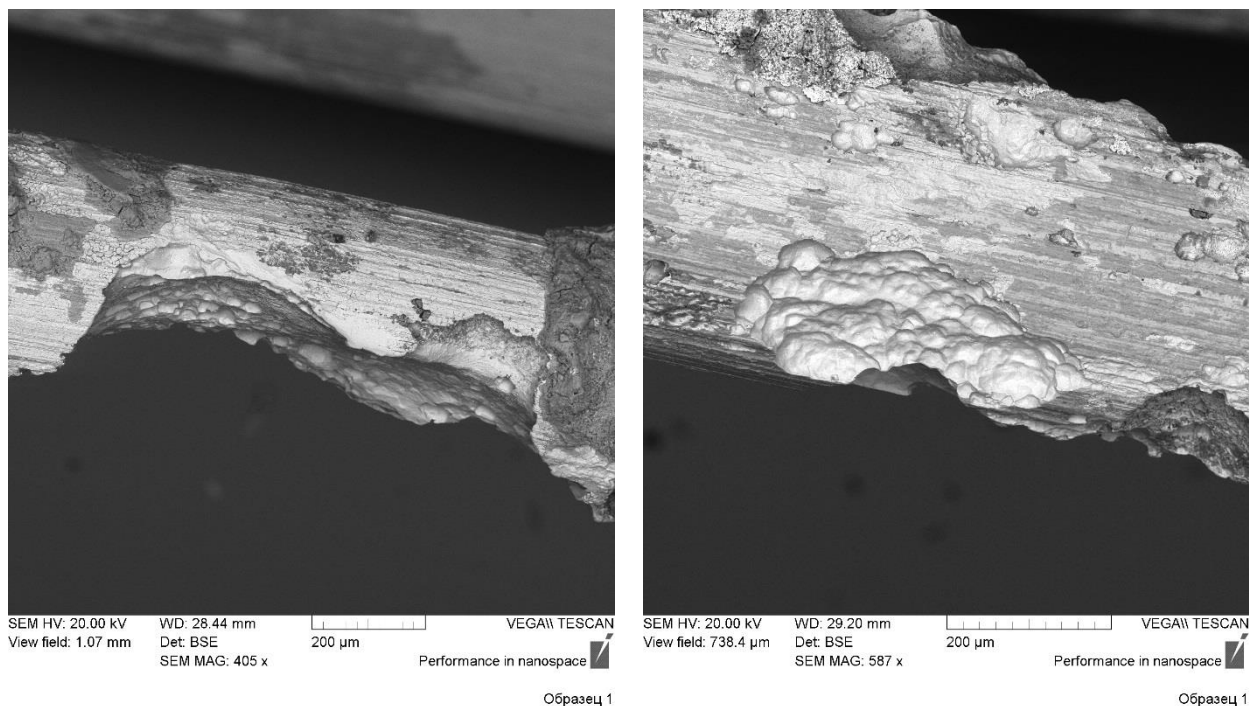


Рис. 6.2 – Крупный план повреждений нагревательной спирали тепловентилятора, СЭМ

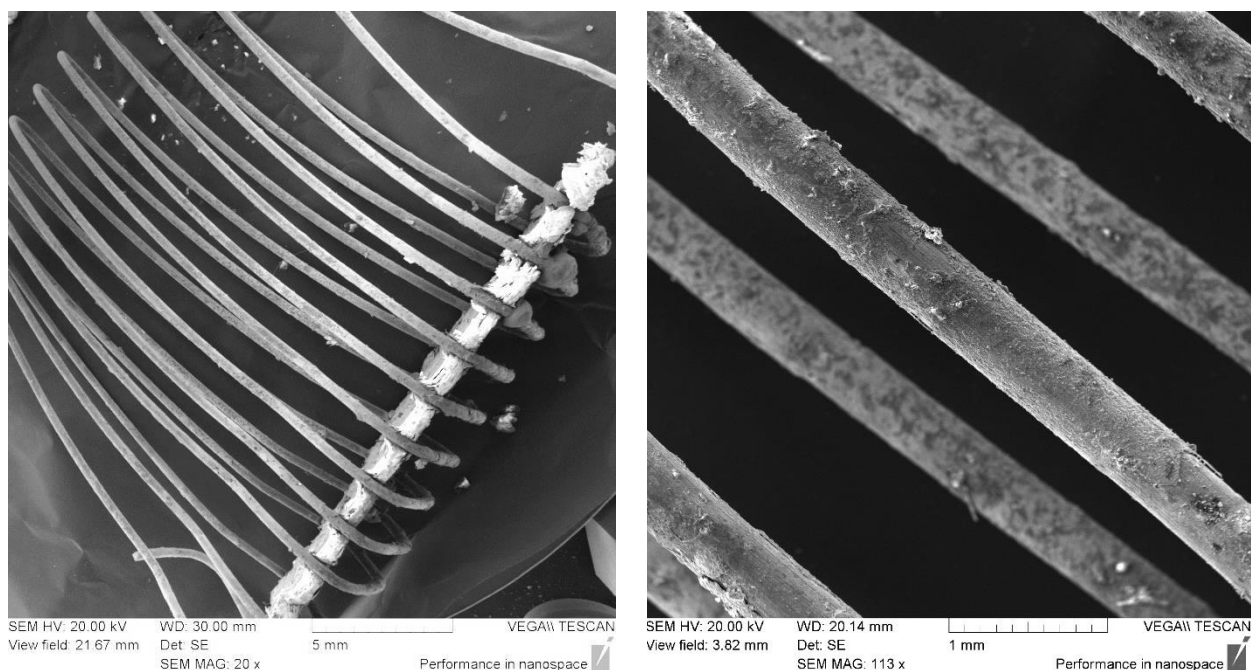


Рис. 7 – Участок нагревательной спирали тепловентилятора, изъятый с места пожара (объект сравнения)

Также по поверхности спирали наблюдались множественные кратеры и лунки. Кратеры представляют собой многоступенчатые углубления округлой формы на поверхности оплавления (рисунок 6). Лунки представляют собой более мелкие, по сравнению с кратерами, углубления округлой формы, которые могут располагаться как внутри кратеров, так и вне их (рисунок 6).

Наличие на поверхности металла кратеров и лунок может являться следами воздействия на металл электродуговых разрядов [6].

Кроме того, на отдельных витках нагревательной спирали тепловентилятора были обнаружены наплавы шарообразной формы (рисунок 8, 9).



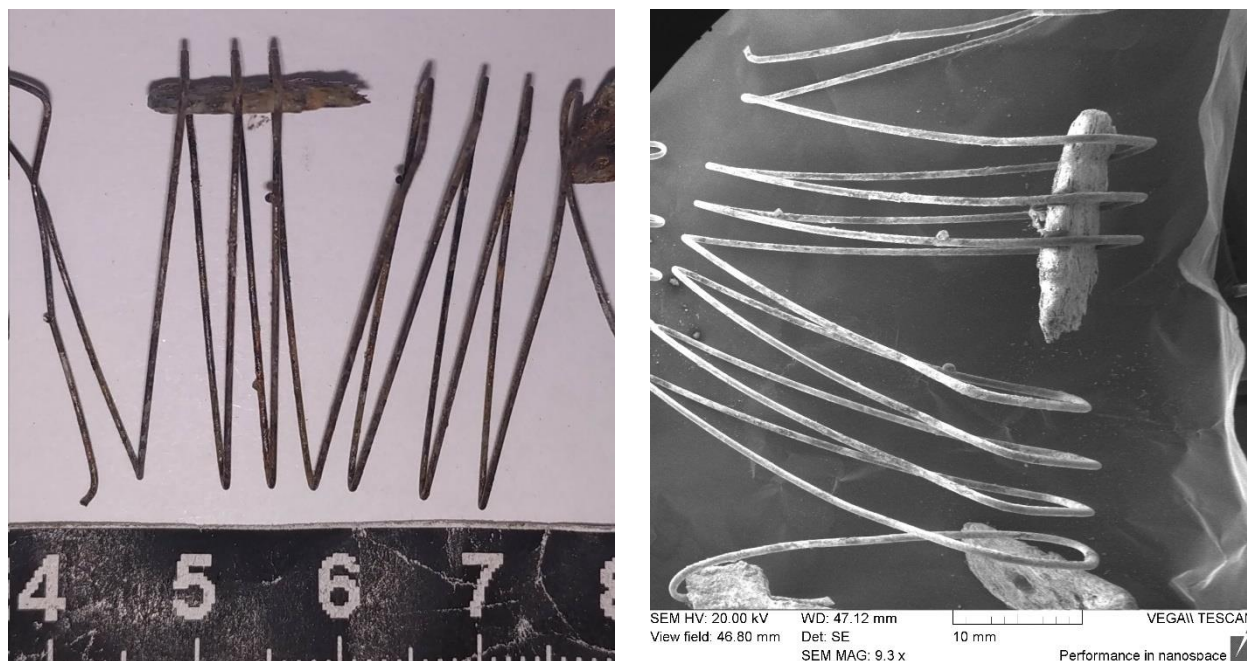


Рис. 8 – Фрагмент нагревательной спирали тепловентилятора с наплавками, СЭМ

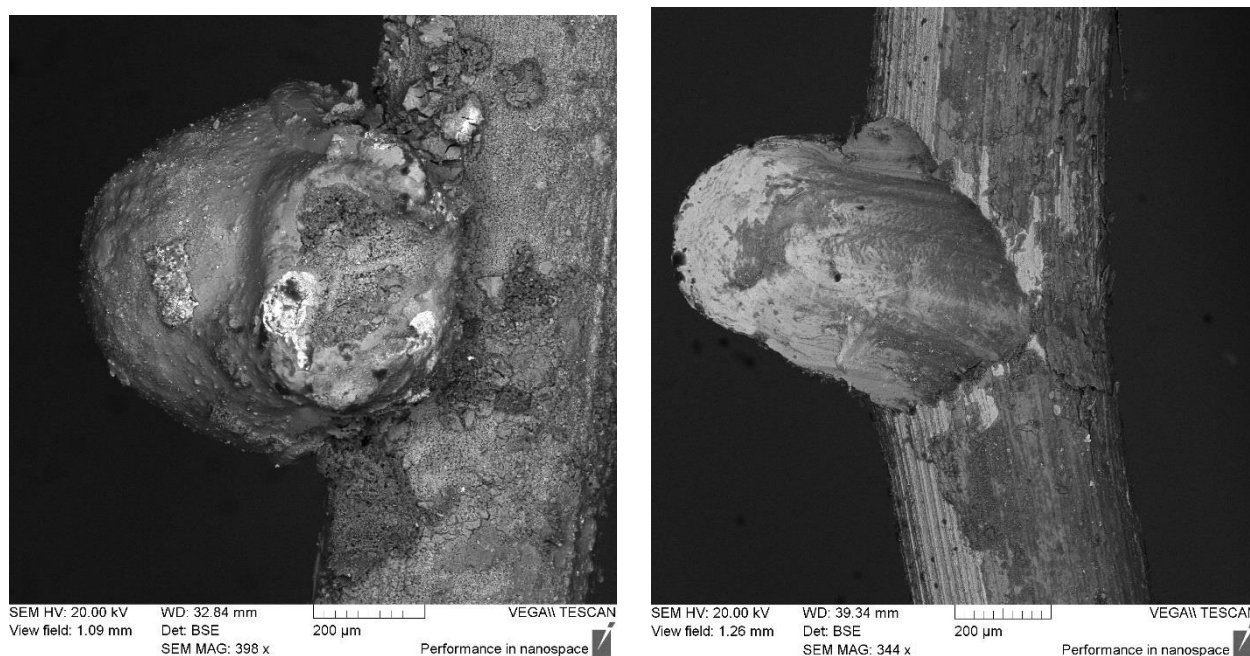


Рис. 9 – Крупный план наплавов нагревательной спирали, СЭМ

Для определения природы образования данных наплавов, был проведен элементный анализ наплавов и спирали.

Анализ проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA\\XMU при высоком вакууме в камере при увеличениях до 1600<sup>x</sup> [7], [8].

Условия проведения анализа:

- ток зонда: 2 пА – 40 нА;
- режим высокого вакуума;
- ускоряющее напряжение: 20 кВ;
- рабочее расстояние: 27 - 47 мм.

Определение элементного состава осуществлялось беззотным рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным детектором X-MAX 80 с площадью кристалла 80 мм<sup>2</sup>.

Условия проведения исследования:

- ток зонда: 2 пА – 40 нА;
- режим высокого вакуума;
- ускоряющее напряжение: 20 – 30 кВ;
- рабочее расстояние: 27 мм.

Результаты элементного анализа (таблица № 1) показали, что основными элементами, из которого состоит спираль, являются: железо (Fe), хром (Cr), алюминий (Al), марганец (Mn) и кремний (Si). Судя по составу, она выполнена из сплава фехраль [9].

Таблица 1 – Элементный состав нагревательных спиралей

№ образца	Химический элемент и его концентрация, % (масс.)				
	Mn	Al	Si	Cr	Fe
1	0.23	5.85	0.34	22.40	71.18

Результат элементного анализа наплава на витке нагревательной спирали тепловентилятора показал, что основным элементом является медь (> 97 %).

Таблица 2 – Элементный состав наплавов на нагревательной спирали

№ спектра	Химический элемент и его концентрация, % (масс.)	
	Cu	O
1	97.99	2.01
2	97.61	2.39
3	97.25	2.75

По результатам проведенного элементного анализа, установлено, что наплавы, обнаруженные на фрагментах спирали не являются частью спирали, так как основным элементом, из которого состоят наплавы, является медь.

Таким образом, в результате проведенного исследования на фрагменте нагревательной спирали объекта № 1, являющийся частью тепловентилятора, были обнаружены следующие признаки:

- нарушение целостности спирали;
- утончение диаметра спирали, а также повреждения в виде утончения в местах разрушения спирали;
- наличие кратеров и лунок на поверхности;
- наличие наплавов постороннего металла на поверхности спирали.

Уяснив механизм образования комплекса описанных выше термических дефектов, эксперт может выйти на решение вопроса о причине пожара. Попытаемся выстроить для этого соответствующую логическую цепь.

1. Внутри объект №1 сильно разрушен вплоть до мелких оплавленных деталей. Имеются явные следы горения. Если бы горение распространялось на данный объект извне, его электропитание прекратилось по причине замыкания проводов на входе и степень термического поражения была бы другая.

2. Фрагменты спирали объекта № 1 хрупки и легко ломаются. Структура металла по местам излома характерна именно для излома. Стало ясно, что причина такой множественной фрагментации не токовая перегрузка или КЗ, а хрупкость перегретого металла спирали; отдельные её фрагменты рассыпались в руках уже при попытках в лаборатории их подсчитать.

Как известно, спирали такого рода в настоящее время изготавливаются из сплава Фехраль, содержащего 12-27% хрома; 3,5-5,5% алюминия; 1% кремния; 0,7% марганца (остальное железо). Аналогичный состав имеют, судя по приведенным в таблице данным, спираль объекта № 1.

Известно, что эти сплавы при температуре выше 350-400 °С подвергаются процессу рекристаллизации, становятся хрупкими. Таким образом, есть основания предполагать, что разрушение спирали является следствием её охрупчивания. Этого не наблюдается в других тепловентиляторах, надо полагать по причине более низкой температуры отжига.

3. Перегрев спирали, возможно, привел к ослаблению её натяжения. Ослабленная спираль свободно шевелилась в потоке воздуха, что способствовало множественным контактам спирали виток с витком и искрообразованию. Происходило это с образованием искр, а также кратеров, лунок и прочих вышеописанных дефектов. Образование медьсодержащих частиц могло стать следствием контакта наплавов с медным проводником.

4. Необходимо отметить, что данный аварийный режим не является, строго говоря, коротким замыканием (КЗ), поскольку нет прямого контакта между разнополярными проводниками или между различными фазами и т.д. Искрение же возникает в результате последовательного электродугового пробоя. Здесь некорректно говорить о КЗ, и такая небрежность на суде может привести к нежеланным последствиям.

Приведенные выше соображения объясняют, каким образом сформировалась наблюдаемая картина термических поражений, какие-то иные альтернативные механизмы не усматриваются. И это обстоятельство весьма существенно как основа выстроенного экспертом механизма возникновения горения.

5. Другие электротехнические приборы и устройства, в зависимости от своих конструктивных особенностей, при работе в аварийных режимах могут образовывать иные морфологические признаки (группы признаков). Они общеизвестны – это электродуговые локальные оплавления. В целом они должны обеспечивать поиски «недостающего звена» и формировать понятную с физической точки зрения картину возникновения и развития горения.

В рассматриваемом случае «недостающим звеном» было объяснение, каким образом горение вышло за пределы внутреннего объема вентилятора?

Чтобы ответить на данный вопрос, у вентилятора «заглубили» терморегулятор, а сверху прибор прикрыли тканью и включили в электросеть. Через 1-2 мин, раньше, чем сработал аппарат защиты в электрощите, из-под тканевой накидки повалил дым, ткань затлела, верхняя часть корпуса вентилятора расплавилась и потекла вниз, обеспечивая тем самым возможность дальнейшего развития горения.

В таком состоянии обогреватель представлял собой реальный тепловой источник, способный обеспечить загорание и развитие горения пожарной нагрузки в пределах установленного очага пожара.



Проведя экспертное исследование остатков спиралей бытовых тепловентиляторов, было установлено, что следы (шарообразные наплавы из меди и фехраля) и локальные повреждения, которые были обнаружены, характерны для разлета раскаленных металлических частиц (искр) при электродуговых процессах, протекающих при коротких замыканиях в электрооборудовании.

Огромную роль в возникновении пожара сыграл материал, из которого изготовлена спираль тепловентилятора – фехраль. Рабочая температуры, до которой может нагреваться фехраль – примерно 1200 °С. Температура плавления приблизительно 1450 С. Производство фехраля дешевле, чем производство нихрома. По этой причине именно фехраль чаще используют для создания нагревательных спиралей, например, в бытовых тепловентиляторах. Основным же недостатком фехраля является его неустойчивость к циклическим нагревам – со временем проволока из этого сплава становится хрупкой, что может приводить к ее истончению и возникновению зон локальных перегревов.

Обнаруженные различные морфологические признаки на деталях вентилятора, необходимо использовать при решении вопроса о причине пожара, а также о причастности тепловентилятора к возникновению пожара.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко / М.: ВНИИПО /2020г./с – 82.
2. Колмаков А.И. Экспертное исследование металлических изделий (по делам о пожарах) / Учебное пособие / А.И. Колмаков, Н.М. Граненков, С.И. Зернов и др. М. ЭКЦ МВД России, 1993 г. – с. – 104.
3. Струков В.М. Экспертное исследование изымаемых с мест пожаров электротехнических изделий с трубчатыми нагревательными элементами / В.М. Струков, С.И. Зернов. М.:ЭКЦ МВД России/1996 г. / с – 56.
4. Маковкин А.В. Проведение экспертных исследований по установлению причинно-следственных связей аварийных процессов в электросети с возникновением пожара: Учебное пособие / А.В. Маковкин, В.И. Кабанов, В.М. Струков. М.: ВНИИ МВД СССР/ 1988 г. / с – 98.
5. Маковкин А.В. Изучение состояния электрооборудования при осмотре места пожара: учебное пособие / А.В. Маковкин, В.И. Кабанов М.: ВНИИПО МВД СССР/ 1988 г. /с – 48.
6. Металлографические и морфологические исследования металлических объектов судебной пожарно-технической экспертизы: учебное пособие / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко, Ю.Н. Бельшина; под общ. ред. Э.Н. Чижикова. – СПб: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»/ 2016 г./ – 160с., 117 ил., 16 табл., 52 библиогр.
7. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия / С.Дж.Б. Рид: Техносфера/ 2008 г./ с – 232.
8. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский. М.: Металлургия/ 1982 г. /с – 632.
9. ГОСТ 12766.1-90 Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Pozhary i pozharnaja bezopasnost' v 2019 godu: statisticheskij sbornik [Fires and Fire Safety in 2019: Statistical Collection] / Edited by D.M. Gordienko / М.: VNIPO /2020./p – 82. [in Russian]
2. Kolmakov A.I. Ehkspertnoe issledovanie metallicheskih izdelij (po delam o pozharakh) [Expert Research of Metal Products (in Cases of Fires)] / A.I. Kolmakov, N.M. Granenkov, S.I. Zernov, V.V. Pen'kov, N.G. Sokolov et al. /M. EhKC MVD Rossii, 1993 / p. – 104. [in Russian]
3. Strukov V.M. Ehkspertnoe issledovanie izyemaemykh s mest pozharov ehlektrotekhnicheskikh izdelij s trubchatymi nagrevatel'nymi ehlementami [Expert Research of Electrical Products With Tubular Heating Elements Recovered From the Places of Fires] / V.M. Strukov, S.I. Zernov M.:EhKC MVD Rossii/1996 / p – 56. [in Russian]
4. Makovkin A.V. Provedenie ehkspertnykh issledovanij po ustanovleniju prichinno-sledstvennykh svyazej avarijnnykh processov v ehlektroseti s vzniknoveniem pozhara: Uchebnoe posobie [Conducting Expert Examinations to Establish the Causality of the Disturbance in the Mains With Fire: Textbook] / A.V. Makovkin, V.I. Kabanov, V.M. Strukov. М.: VNII MVD SSSR/ 1988 / p – 98. [in Russian]
5. Makovkin A.V. Izuchenie sostojanija ehlektrooborudovanija pri osmotre mesta pozhara: uchebnoe posobie [a Study of the Condition of Electrical Equipment During the Inspection of the Fire Scene: Textbook] / A.V. Makovkin, V.I. Kabanov / М.: VNIPO MVD SSSR/ 1988 /p – 48. [in Russian]
6. Metallograficheskie i morfologicheskie issledovanija metallicheskih ob"ektov sudebnoj pozharno-tehnicheskoy ehkspertizy: uchebnoe posobie [Metallographic and Morphological Studies of Metal Objects of Forensic Fire and Technical Expertise: Textbook] / A.Ju. Mokryak, I.D. Cheshko, Ju.N. Bel'shina; Edited by Eh.N. Chizhikov. – SPb: FGBOU VO «Sankt-Peterburgskij universitet GPS MChS Rossii»/ 2016 / – 160p., pic. 117, table 16, bibliography 52. [in Russian]
7. Reed S.J.B. Ehlektronno-zondovyj mikroanaliz i rastrovaja ehlektronnaja mikroskopija [Electron-Probe Microanalysis and Scanning Electron Microscopy] / S.J.B.. Reed: Tekhnosfera/ 2008 / p – 232. [in Russian]
8. Umanskij Ja.S. Kristallografija, rentgenografija i ehlektronnaja mikroskopija [Crystallography, Radiography and Electron Microscopy] / Ja.S. Umanskij М.: Metallurgija/ 1982 /p – 632. [in Russian]
9. GOST 12766.1-90 Provoloka iz precizionnykh splavov s vysokim ehlektricheskim soprotivleniem. Tekhnicheskie uslovija [Wire Made of Precision Alloys With High Electrical Resistance. Technical Specifications] [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.014>**ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗГЛЮТЕННЫХ ВИДОВ МУКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Научная статья

**Анашкина П.Ж.<sup>1</sup>, Москвичева Е.В.<sup>2,\*</sup>, Тимошенкова И.А.<sup>3</sup>, Москвичев А.С.<sup>4</sup>.**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-4687-3483;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-4917-0556;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (moskvicheva\_ev[at]spbstu.ru)

**Аннотация**

В XXI веке участились случаи заболеваний, связанных с нарушением обмена веществ, а в последнее время внимание врачей, диетологов, исследователей все больше интересует проблема непереносимости злакового белка – глютена. Целиакия является хроническим, аутоиммунным заболеванием, характеризующимся стойкой непереносимостью глютена. Глютен содержится в таких злаках, как пшеница, рожь, ячмень и тритикале. Так как глютенная энтеропатия является неизлечимым заболеванием, то больным необходимо соблюдать диету на протяжении всей жизни. Ценность хлебобучных изделий с использованием нетрадиционной муки заключается в комплексности химического состава и в возможности обогатить данные изделия веществами, содержание которых недостаточно. В работе были исследованы органолептические и физико-химические показатели конопляной, черемуховой муки и муки из бурого риса. Черемуховая мука имеет превышающие показатели кислотности и автолитической активности, по сравнению с конопляной и рисовой мукой поэтому, рекомендуется ее добавлять в небольших количествах в безглютеновые смеси, что в дальнейшем может повлиять на органолептическую оценку и качество готового хлеба. По данным исследований, безглютеновая мука обладает хлебопекарными свойствами и может быть рекомендована к использованию в хлебобучном производстве в качестве основного компонента для создания безглютеновых изделий таких как, например, бородинский хлеб, не требующих высокого содержания клейковины.

**Ключевые слова:** мука из бурого риса, черемуховая мука, конопляная мука, органолептический анализ, массовая доля влаги, кислотность, автолитическая активность, водосвязывающей и жиросвязывающей способности.

**A STUDY OF GLUTEN FREE FLOUR TYPES FOR THE PRODUCTION OF BAKERY PRODUCTS**

Research article

**Anashkina P. Zh.<sup>1</sup>, Moskvicheva E. V.<sup>2,\*</sup>, Timoshenkova I. A.<sup>3</sup>, Moskvichev A. S.<sup>4</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-4687-3483;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-4917-0556;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

\* Corresponding author (moskvicheva\_ev[at]spbstu.ru)

**Abstract**

In the 21st century, cases of diseases associated with metabolic disorders have become more frequent while the attention of doctors, nutritionists, researchers recently has been increasingly focusing on the problem of intolerance to gluten, a protein found in cereal. Celiac disease is a chronic, autoimmune disease characterized by persistent gluten intolerance. Gluten can be found in cereals such as wheat, rye, barley and triticale. Since gluten enteropathy is an incurable disease, patients need to follow a diet throughout their lives. The value of bakery products made with non-traditional flour lies in the complexity of the chemical composition and the ability to enrich these products with substances whose content is insufficient. The study examines the organoleptic and physicochemical parameters of hemp, bird cherry flour and brown rice flour. Cherry flour has higher acidity and autolytic activity compared to hemp and rice flour and is therefore recommended to add it in small quantities to gluten-free mixtures, which in the future may affect the organoleptic assessment and quality of the finished bread. According to the research, gluten-free flour has baking properties and can be recommended for use as the main component in the production of gluten-free bakery products such as, for example, Borodinsky bread, which does not require a high gluten content.

**Keywords:** brown rice flour, cherry flour, hemp flour, organoleptic analysis, mass fraction of moisture, acidity, autolytic activity, water-binding and fat-binding capacities.

**Введение**

В последнее время врачей, диетологов, исследователей все больше интересует проблема непереносимости злакового белка – глютена и заболеванием целиакией. Целиакия является хроническим, аутоиммунным заболеванием, характеризуется стойкой непереносимостью глютена, которое возникает у генетически предрасположенных людей, характеризующееся потерей ворсинок в проксимальном отделе тонкого кишечника и желудочно-кишечной мальабсорбцией [1], [17]. Глютен содержится в таких злаках, как пшеница, рожь, ячмень и тритикале. Так как глютенная энтеропатия является неизлечимым заболеванием, то больным необходимо соблюдать диету на протяжении всей жизни [2], [20].

Санкт-Петербургский Медико-генетический центр диагностировал высокий рост заболеваемости в возрасте от 1 до 3 лет, непосредственно после начала употребления продуктов с содержанием глютена [11]. Приведённые данные в полной мере позволяют подтвердить, что глютеночувствительная целиакия не считается редким заболеванием. Так же аглютеновую диету должны соблюдать не только пациенты с заболеванием, но и значительный контингент клинически здоровых людей с целью предотвращения развития ряда заболеваний [12].

Во многих странах для больных целиакией выпускаются безглютеновые продукты: хлеб, макаронные изделия, печенья, мука для выпечки и т.п. В России появляются специализированные продукты для больных целиакией, в

основном это мучные кондитерские изделия. Но несмотря на появление на российском рынке новых безглютеновых продуктов, ассортимент их остаётся ограниченным [3].

Для видового разнообразия безглютеновых хлебобулочных изделий используют различные виды смесей муки в различных соотношениях. Чаще всего для безглютеновых хлебобулочных изделий используют картофельный, кукурузный крахмал, кукурузную и рисовую муку. Но есть другие виды муки, которые богаты витаминами и минералами, благотворно влияют на организм человека и прекрасно подходят для аглютеновых диет. Одними из таких источников сырья для производства безглютеновых изделий могут быть: конопляная и черемуховая мука и мука из бурого риса.

Конопляная мука изготавливается из жмыха семян конопли, берут целые чистые предварительно промытые семена конопли, просушивают их при температуре 80-90 °С в семенной массе до влажности не более 8%, затем охлаждают, измельчают и фасуют, не отделяя от лузги и конечным результатом является 100-процентная конопляная мука

Все семена конопли должны быть обработаны заранее, чтобы быть уверенными, что они не подвергались воздействию каких-либо вредных химических веществ или пестицидов [19].

Конопляная мука обладает множеством полезных свойств, не содержит оказывающего наркотическое действие психотропного вещества — каннабинола. В связи с этим конопляная мука рекомендована для ежедневного употребления не только взрослым, но также может быть включена и в рацион детского питания. Конопляная мука содержит большое количество нерастворимой и водорастворимой клетчатки. В конопляной муке имеется 20 важнейших аминокислот, следует отметить такие как: метионин, триптофан, лизин и другие [9], [10].

Черемуховая мука богата биологически активными веществами. Для получения черемуховой муки высушенные ягоды после очистки вместе с косточками мелко размалывают до порошкообразного состояния [13]. В черемуховой муке содержатся флавоноиды (до 20 %) – растительные полифенолы, которые известны как растительные пигменты. Они являются мощными антиоксидантами, способными нейтрализовать действие свободных радикалов, что снижает риск возникновения злокачественных образований, способствуют укреплению стенок кровеносных сосудов. Черемуховая мука также содержит фитонциды, обладающие активным противомикробным действием [16].

Благодаря мягкому вкусу, бесцветному внешнему виду, гипоаллергенным свойствам, низкому содержанию натрия рисовая мука является одной из наиболее подходящих крупяных культур для приготовления безглютеновых продуктов [14]. Рисовая мука богата клетчаткой, содержит значительное количество витаминов группы В и минералов, таких как магний, калий и селен [15], [18], [21].

Главной целью данной работы было исследование органолептических, физико-химических и функционально-технологических свойств безглютеновых видов муки, для определения оптимального соотношения смеси муки для производства хлебобулочных изделий, например, безглютеного бородинского хлеба.

### Методы и принципы исследования

В качестве объектов исследования использовались следующие виды муки разных производителей: конопляная мука («Масляный король», г. Великий Новгород); черемуховая мука («АЮ-дух леса», г. Улан-Удэ); мука из бурого риса («Здоровка», г. Санкт-Петербург).

Для определения технологических характеристик безглютеновой муки были проведены исследования её органолептических и физико-химических показателей: отбор проб и подготовку их к анализу [6]; органолептические показатели [8]; влажность и кислотность муки [4], [5]; автолитическая активность [7].

Водосвязывающую и жиросвязывающую способности безглютеновой муки определяли унифицированным способом путем взвешивания навесок безглютеновой муки с массой 0,25 г помещенных в пробирку, затем добавляли воду или жир массой 7,5 г и центрифугировали в течение пятнадцати минут при 3000 об/мин.

После центрифугирования жидкость или жир выливают из пробирки и оставляют на 10 минут в наклонном положении на фильтровальной бумаге для устранения лишней влаги, а после взвешивали.

### Результаты и их обсуждение

Органолептическая оценка проводилась пятью независимыми экспертами, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Органолептическая оценка конопляной, черемуховой муки, муки из бурого риса

Показатель	Значение показателя		
	Конопляная мука	Черемуховая мука	Мука из бурого риса
Цвет	Зелено-коричневый	Красно-коричневый	Кремовый
Внешний вид, текстура	Рассыпчатая, не комкается	Рассыпчатая, не комкается	Сыпучая, комкается
Вкус	Травяной с земляным привкусом, наличие хруста	Травяной с шоколадно-ореховым послевкусием, наличие небольшого хруста	Безвкусная
Запах	Травяной, ярко выраженный, ореховый	Травяной, ярко выраженный, сушеных ягод	Нет

Конопляная и черемуховая мука представляют собой сыпучий порошок зелёно-коричневого и кирпично-коричневого цвета соответственно, при разжевывании ощущается небольшое похрустывание. Вкусы запаха конопляной муки ореховый, травяной, в то время как у черемуховой муки вкус травяной, ореховый с выраженным ароматом сушеных ягод.

Мука из бурого риса имеет сыпучий внешний вид, кремового цвета, на вкус данная мука является безвкусной, без выраженного запаха. На рисунке 1 представлен внешний вид и структура конопляной, черемуховой муки и муки из бурого риса.



Рис. 1 – Внешний вид безглютеновой муки: а) конопляной; б) черемуховой; в) из бурого риса

Влажность муки является одним из важных показателей ее качества, так как мука является менее стойким при хранении продуктом, чем зерно, поэтому повышенная влажность приводит к активизации микрофлоры муки и активации содержащихся в муке собственных ферментов. Если влажность муки будет высокой, то ферменты переходят в активное состояние, и в муке запускаются процессы окисления и гидролизного разложения жиров, белков и других соединений. Исследования по влажности муки представлены на рисунке 2.



Рис. 2 – Влажность исследуемых образцов муки

Согласно данным рисунку 2, влажность исследуемых видов муки достаточно низкая, что приводит к подавлению роста микроорганизмов и деактивации ферментов муки, за счет положительных условий хранения. Также можно сказать о том, что при низкой влажности муки, она более высокой водопоглощательной способностью.

Кислотность муки позволяет определить свежесть муки (сроки ее хранения). Данную муку подвергают более тщательному органолептическому контролю. Также можно утверждать, что мука с повышенной кислотностью может привести к увеличению кислотности готовых изделий. Результаты исследований кислотности безглютеновой муки представлены на рисунке 3.

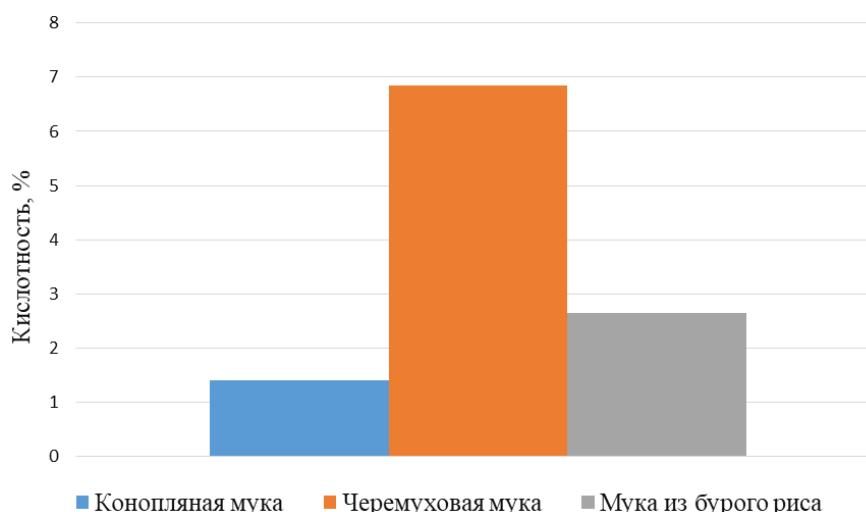


Рис. 3 – Кислотность безглютеновой муки

Изделия из муки с повышенной кислотностью получаются более кислыми и пониженным удельным объемом. Как можно увидеть из данных рисунка 3, показатель кислотности черемуховой муки (6,85 %) превышает показатели остальных видов муки, это связано с тем, что данная мука содержит в своем составе достаточное количество органических кислот таких как: яблочная, лимонная и уксусная. Поэтому можно предположить, что добавление черемуховой муки в хлебобулочные изделия будет минимизировано для улучшения качества готового продукта.

Автолитическая активность – это способность муки образовывать при прогреве водно-мучной суспензии определенное количество водорастворимых веществ. Эта величина характеризует доброкачественность муки. Как низкая, так и высокая автолитическая активность муки отрицательно влияют на качество теста. Показатель автолитической активности безглютеновой муки представлен на рисунке 4.

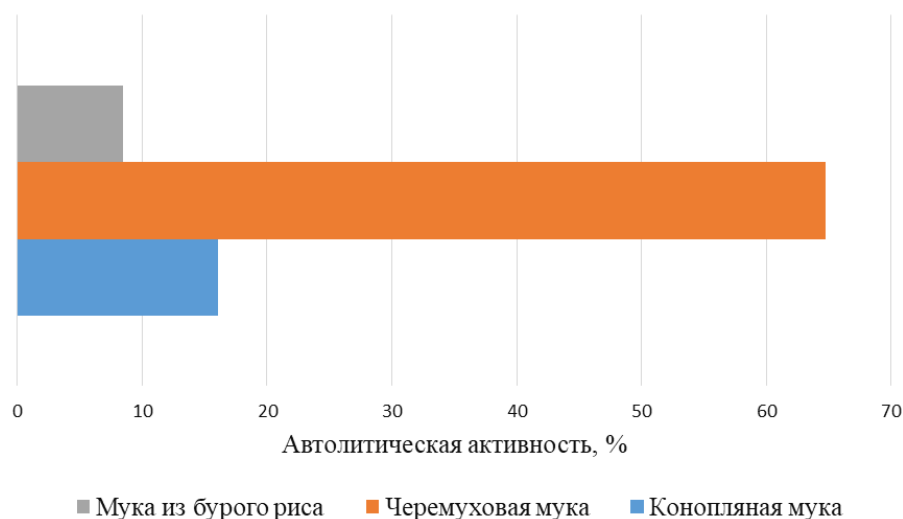


Рис. 4 – Автолитическая активность безглютеновой муки

Чем выше автолитическая активность муки, тем больше в ней содержится ферментов. Высокие показатели автолитической активности приводят к получению хлеба с липким заминающимся мякишем. Как видно из графика, представленного на рисунке 4, высокой автолитической активностью обладает конопляная и черемуховая мука. Черемуховая и конопляная мука содержат значительное количество водорастворимых веществ (сахаров до 5 %, белков), а также высокое содержание ферментов, что обуславливает высокую автолитическую активность данных видов муки.

При производстве хлебобулочных изделий неотъемлемой частью является вода и жиры. Данное исследование показало какое количество жира или воды может связать мука в процентах к собственной массе. Контроль процессов производства хлебобулочных изделий, а также и их качества при учетывании данного показателя позволит заранее спрогнозировать консистенцию и выход конечной продукции. Данные проведенного исследования показаны на рисунках 5 и 6.

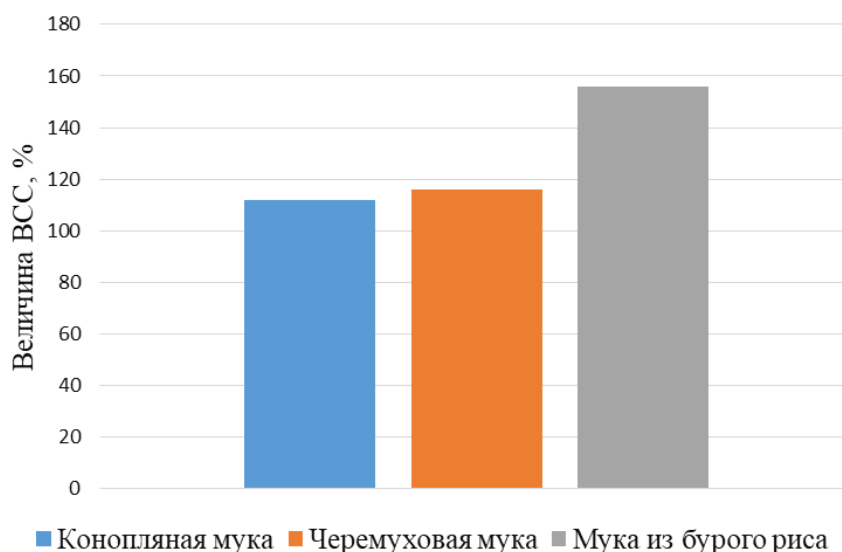


Рис. 5 – Зависимость водосвязывающей способности от вида муки

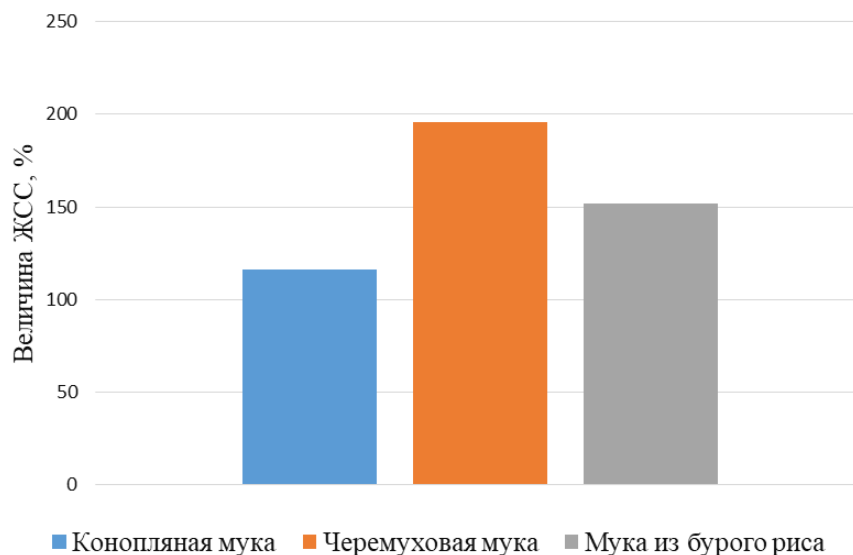


Рис. 6 – Зависимость водо- и жиросвязывающей способности от вида муки

Исходя из данных, представленных на рисунке 5, можно сделать вывод, что водосвязывающая способность (ВСС) безглютеновой муки достаточно велика, а значит, что такая мука сможет впитать в себя больше воды и сможет удержать воду, что в дальнейшем скажется на готовом изделии. Рисовая мука имеет наибольшее значения ВСС (155 %), это обусловлено мелким помолом данной муки и при взаимодействии с водой, рис впитывает воду и набухает.

Говоря о жиросвязывающей способности (ЖСС) муки, видно, что она также имеет высокие показатели, а значит, имеет достаточную жировую впитываемость. Высокие показатели ЖСС (199 %) черемуховой муки обосновываются тем, что в ее составе малое количество жиров (до 1 г), поэтому жиросвязывающая способность высокая, и преобладает над ЖСС конопляной и рисовой мукой.

### Заключение

Из анализа полученных данных, можно сказать, что безглютеновая мука обладает хлебопекарными свойствами и может быть рекомендована к использованию в хлебобулочном производстве в качестве основного компонента для создания безглютеновых изделий таких как, например, бородинский хлеб, не требующих высокого содержания клейковины. Черемуховая мука имеет превышающие показатели кислотности и автолитической активности, по сравнению с конопляной и рисовой мукой поэтому, рекомендуется ее добавлять в небольших количествах в безглютеновые смеси, что в дальнейшем может повлиять на органолептическую оценку и качество готового хлеба.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Анашкина П.Ж. Разработка рецептуры бисквитного полуфабриката на основе смеси рисовой муки и муки из семян рапса / П.Ж. Анашкина, И.А. Тимошенкова, Е.В. Москвичева // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Высшая школа биотехнологии и пищевых технологий. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2018. С. 204-207.
2. Белая и желтая кукурузная мука 2020 [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.esdifferent.com/difference-between-white-and-yellow-cornmeal> (дата обращения 1.12.2020)
3. Бельмер С.А. Непереносимость глютена и показания к безглютеновой диете / С. Бельмер, А. Хавкин // Врач, 2011. – № 5. – С. 17–21.
4. ГОСТ 27493-87 Мука и отруби. Метод определения кислотности по болтушке (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2007. – 4 с.
5. ГОСТ 27495-87 Мука. Метод определения автолитической активности (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2007. – 4 с.
6. ГОСТ 5897-90 Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества, размеров, массы нетто и составных частей. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004
7. ГОСТ 5904-82 Изделия кондитерские. Правила приемки, методы отбора и подготовки проб (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2010. – 8 с.
8. ГОСТ 9404-88 Мука и отруби. Метод определения влажности (с Изменением N1). – М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
9. Ковальчук Я. Польза и вред конопляной муки и как принимать / Я. Ковальчук. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://zdorova.com.ua/zdorovoe-pitanie/polzai-vred-konoplyanoj-muki/> (дата обращения: 15.04.2020).
10. Корнилова А.П. Влияние введения льняной и конопляной муки на качественные характеристики хлебобулочных изделий / А.П. Корнилова, Е.В. Щербакова // Научное Обеспечение Агропромышленного Комплекса сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2016 год. – 2017.
11. Красина И.Б. Безглютеновые хлебцы с использованием нетрадиционных видов сырья / И.Б. Красина, Н.К. Данович, О.И. Казьмина // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 8) – С. 1626-1631

12. Кристалева, О. Н. Целиакия у взрослых – современные подходы к диагностике и лечению / О.Н. Кристалева, М.Г. Мельник // Сибирский мед. журн. – 2010. – Т. 94, № 3. – С. 121–123
13. Кузнецова О.А. Перспективы использования черёмуховой муки в производстве мучных кондитерских изделий / О.А. Кузнецова, Е.В. Москвичева, И.А. Тимошенкова, А.С. Москвичев // В сборнике: Лучшая научная статья 2017. Сборник статей XIV Международного научно-практического конкурса. 2017. С. 44-47.
14. Рисовая мука [Электронный ресурс]. – URL: <https://domeda.com/ingredient/item/risovaja-muka.html> (дата обращения: 17.04.2020).
15. Тхазеплова Ф.Х. Разработка технологии хлебобулочных изделий с использованием рисовой муки / Ф.Х. Тхазеплова, М.А. Ахметова // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность Материалы IV МНПК, посвященной памяти Заслуженному деятелю науки РФ, КБР, Республики Адыгея профессору Б.Х. Фиашеву. 2018. С. 182-186.
16. Щербакова Е.И. Обоснование использования черёмуховой муки в производстве булочных изделий / Е.И. Щербакова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2016. – 103с.
17. Bitiutskikh K. Investigation on the use of hemp flour in cookie production / K. Bitiutskikh // Bulgarian Journal of Agricultural Science 23(4) 2017
18. Flow property measurement of rice flour- A Review [Electronic resource]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/302977561\\_Flow\\_property\\_measurement\\_of\\_rice\\_flour-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/302977561_Flow_property_measurement_of_rice_flour-_A_Review) (accessed: 17.04.2020).
19. Hemp Flour And The Benefits of Cooking With It [Electronic resource]. – URL: <https://farma.health/hemp-flour/> (accessed: 18.04.2020).
20. Krupa-Kozak U. Effect of Buckwheat Flour on Microelements and Proteins Contents in Gluten-Free Bread / U. Krupa-Kozak, M. Wronkowska, M. Soral-Šmida // Czech Journal of Food Sciences 2(No. 2):103–108
21. What is Rice Flour? [Electronic resource]. – URL: <https://www.wisegeek.com/what-is-rice-flour.htm> (accessed: 28.05.2020).

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Anashkina P.Zh. Razrabotka receptury biskvitnogo polufabrikata na osnove smesi risovoj muki i muki iz semjan rastropshi [Formulation development for biscuit semi-finished product based on a mixture of rice flour and flour from milk thistle seeds] / P.Zh. Anashkina, I.A. Timoshenkova, E.V. Moskvicheva // Nedelja nauki SPbPU Materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Vysshaja shkola biotekhnologii i pishhevyyh tekhnologij. Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet Petra Velikogo. [SPbPU Science Week Materials of a scientific conference with international participation. Graduate School of Biotechnology and Food Technology. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University] 2018. P. 204-207. [in Russian]
2. Belaja i zheltaja kukuruznaja muka 2020 [White and yellow corn flour 2020] [Electronic resource]. – URL: <https://ru.esdifferent.com/difference-between-white-and-yellow-cornmeal> (accessed: 17.04.2020) [in Russian]
3. Bel'mer S.A. Neperenosimost' gljutena i pokazaniya k bezgljutenovoj diete [Gluten intolerance and indications for a gluten-free diet] / S. Bel'mer, A. Havkin // Vrach, 2011. – № 5. – P. 17–21. [in Russian]
4. GOST 27493-87 Muka i otrubi. Metod opredeleniya kislotalnosti po boltushke (s Izmeneniyem N 1) [Flour and bran. Method for determining acidity by talker (with Amendment No. 1)]. – М.: Standartinform, 2007. – 4 p. [in Russian]
5. GOST 27495-87 Muka. Metod opredeleniya avtoliticheskoy aktivnosti (s Izmeneniyem N 1) [Flour. Method for determining autolytic activity (with Amendment No. 1)]. – М.: Standartinform, 2007. – 4 p. [in Russian]
6. GOST 5897-90 Izdeliya konditerskie. Metody opredeleniya organolepticheskikh pokazatelej kachestva, razmerov, massy netto i sostavnykh chastej [Confectionery products. Methods for determination of organoleptic indicators of quality, size, net weight and components]. – М.: ИПК standartov publishing house, 2004[in Russian]
7. GOST 5904-82 Izdeliya konditerskie. Pravila priemki, metody otbora i podgotovki prob (s Izmeneniyem N 1) [Confectionery products. Acceptance rules, methods of sampling and sample preparation (with Amendment No. 1)]. – М.: Standartinform, 2010. – 8 p. [in Russian]
8. GOST 9404-88 Muka i otrubi. Metod opredeleniya vlazhnosti (s Izmeneniyem N 1) [Flour and bran. Moisture determination method (with Amendment No. 1)]. – М.: Standartinform, 2010. – 8 p. [in Russian]
9. Koval'chuk Ja. Pol'za i vred konopljanoy muki i kak prinimat' [The benefits and harms of hemp flour and how to take] [Electronic resource]. – URL: <https://zdorova.com.ua/zdorovoe-pitanie/polzai-vred-konoplyanoj-muki/> (accessed: 15.04.2020). [in Russian]
10. Kornilova A.P. Vliyanie vvedeniya l'njanoy i konopljanoy muki na kachestvennye harakteristiki hlebobulochnykh izdelij [Influence of the introduction of flaxseed and hemp flour on the quality characteristics of bakery products] / A.P. Kornilova, E.V. Shherbakova // Nauchnoe Obespechenie Agropromyshlennogo Kompleksa sbornik statej po materialam 72-j nauchno-prakticheskoy konferencii studentov po itogam NIR za 2016 god. [Scientific Support of the Agro-Industrial Complex collection of articles based on the materials of the 72nd scientific-practical conference of students on the basis of research work for 2016] – 2017. [in Russian]
11. Krasina I.B. Bezgljutenovye hlebtsy s ispol'zovaniem netradicionnykh vidov syr'ja [Gluten Free Breads Using Unconventional Raw Materials] / I.B. Krasina, N.K. Danovich, O.I. Kaz'mina // Fundamental'nye issledovaniya [Basic research]. – 2015. – № 2 (ch. 8) – P. 1626-1631[in Russian]
12. Kristaleva, O. N. Celiakija u vzroslykh – sovremennye podhody k diagnostike i lecheniju / O.N. Kristaleva, M.G. Mel'nik // Sibirskij med. zhurn. – 2010. – Vol. 94, № 3. – P. 121–123[in Russian]
13. Perspektivy ispol'zovaniya cherjomuhovoj muki v proizvodstve muchnykh konditerskikh izdelij [Prospects for the use of bird cherry flour in the production of flour confectionery] / Kuznecova O.A., Moskvicheva E.V., Timoshenkova I.A., Moskvichev A.S. V sbornike: Luchshaja nauchnaja stat'ja 2017 // Sbornik statej XIV Mezhdunarodnogo nauchno-

prakticheskogo konkursa [In the collection: The best scientific article 2017. Collection of articles of the XIV International scientific and practical competition]. 2017. P. 44-47. [in Russian]

14. Risovaja muka [Rice flour] [Electronic resource]. – URL: <https://domeda.com/ingredient/item/risovaja-muka.html> (accessed: 17.04.2020). [in Russian]

15. Thazeplova F.H. Razrabotka tehnologii hlebobulochnyh izdelij s ispol'zovaniem risovoj muki [Development of technology for bakery products using rice flour] / F.H. Thazeplova, M.A. Ahmetova // Sel'skohozjajstvennoe zemlepol'zovanie i prodovol'stvennaja bezopasnost' Materialy IV MNPK, posvjashhennoj pamjati Zasluzhennomu dejatel'ju nauki RF, KBR, Respubliki Adygeja professoru B.H. Fiapshevu [Agricultural land use and food security Materials of the IV ISPC dedicated to the memory of the Honored Scientist of the Russian Federation, KBR, Republic of Adygea, Professor B.Kh. Fiapshev]. 2018. P. 182-186. [in Russian]

16. Shherbakova E.I. Obosnovanie ispol'zovanija cheremuhovoj muki v proizvodstve bulochnyh izdelij [Rationale for the use of bird cherry flour in the production of bakery products] / E.I. Shherbakova // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Pishhevye i biotehnologii [Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology]. 2016. – 103p. [in Russian]

17. Bitiutskikh K. Investigation on the use of hemp flour in cookie production / K. Bitiutskikh // Bulgarian Journal of Agricultural Science 23(4) 2017

18. Flow property measurement of rice flour- A Review [Electronic resource]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/302977561\\_Flow\\_property\\_measurement\\_of\\_rice\\_flour-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/302977561_Flow_property_measurement_of_rice_flour-_A_Review) (accessed: 17.04.2020).

19. Hemp Flour And The Benefits of Cooking With It [Electronic resource]. – URL: <https://farma.health/hemp-flour/> (accessed: 18.04.2020).

20. Krupa-Kozak U. Effect of Buckwheat Flour on Microelements and Proteins Contents in Gluten-Free Bread / U. Krupa-Kozak, M. Wronkowska, M. Soral-Śmietańska // Czech Journal of Food Sciences 2(No. 2):103–108

21. What is Rice Flour? [Electronic resource]. – URL: <https://www.wisegeek.com/what-is-rice-flour.htm> (accessed: 28.05.2020).



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.015>**ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ИНТЕРВАЛЕ МЕЖДУ СМЕЖНЫМИ АКТАМИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Научная статья

**Патрикеев А.В.\***

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (patrikeev-av[at]mail.ru)

**Аннотация**

Предлагается возможное решение по унификации технического контроля механической безопасности зданий и сооружений путём оптимизации интервала между инструментальными обследованиями. На основе практического опыта многолетнего мониторинга технически сложных инженерных сооружений предлагается универсальный список контрольных параметров. Инструментальное определение контрольных параметров предлагается выполнять один раз в три года в составе периодических визуальных инспекций. По результатам сравнительного анализа результатов нескольких последовательных результатов мониторинга определяется тренд. В благоприятном случае (изменение контрольных параметров мало или отсутствует) интервал между смежными измерениями, по мнению автора, может быть увеличен, но не более чем до 10 лет.

**Ключевые слова:** механическая безопасность, инженерное сооружение, измерения, анализ колебаний, ключевые контрольные параметры, анализ тренда, интервал между измерениями.

**ON THE OPTIMAL INTERVAL BETWEEN ADJACENT ACTS OF IDENTIFYING THE FREQUENCY OF SELF-INDUCED VIBRATIONS IN MONITORING THE MECHANICAL SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES**

Research article

**Patrikeev A.V.\***

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

\* Corresponding author (patrikeev-av[at]mail.ru)

**Abstract**

The current paper proposes a possible solution for the unification of technical inspection of mechanical safety of buildings and structures by optimizing the interval between instrument-aided structural surveys. Based on the practical experience of long-term monitoring of technically complex engineering structures, the study puts forward a general list of control parameters. Instrumental determination of control parameters is proposed to be performed once every three years as part of periodic visual inspections. The research identifies a trend based on the results of a comparative analysis of the results of several consecutive monitoring results. In a favorable case (little or no change in the control parameters) the interval between adjacent measurements, according to the author of the study, can be increased, but not more than up to 10 years.

**Keywords:** mechanical safety, engineering structure, measurements, vibration analysis, key control parameters, trend analysis, measurement interval.

**Введение**

Широкое применение наружных и внутренних облицовочных покрытий различного назначения при проектировании и строительстве зданий и сооружений приводит ко все большему усложнению доступа специалистов к основным несущим конструкциям при их предварительном визуальном, а также детальном инструментальном обследовании [1]. В ряде случаев при организации работ по обследованию зданий и сооружений доступ специалистов к элементам конструкций, подлежащих обследованию, также может быть существенно ограничен и затруднен по причине режимности объекта контроля, либо нецелесообразности ограничений (на период обследования) условий нормальной эксплуатации объекта.

Для организаций, осуществляющих эксплуатацию и надзор за состоянием зданий и сооружений, была бы весьма полезна унификация принципов технического контроля механической безопасности строительных объектов, несмотря на то что эти сооружения значительно различаются между собой как по своей расчетно-конструктивной схеме, так и по архитектурно-планировочным решениям, назначению, этажности и срокам эксплуатации [2].

Важнейшее значение при разработке нормативно-методического обеспечения мониторинга механической безопасности несущих конструкций зданий и сооружений приобретает проблема выбора нескольких обобщенных параметров, которые достаточно легко и удобно могут быть определены для каждого объекта контроля. Такие параметры, измеряемые (определяемые) с некоторой периодичностью в составе визуальных обследований и анализируемые в комплексе с результатами этих обследований, позволяют судить о безопасности несущих конструкций сооружения в целом. Критерием обеспеченности механической безопасности при этом является неизменность таких обобщенных параметров [3].

Проблема оптимизации периодического вибрационного контроля различных зданий и сооружений известна достаточно давно [4]. Однако современные исследователи уделяют этому вопросу недостаточно внимания. Тем более, что подобная оптимизация может быть основана на использовании недавно введенных государственных стандартов. Здесь можно упомянуть такие работы, как [5], [6], [7]. Современные методы анализа и расчета в этой области также нашли свое отражение в работах [8], [9], [10]. На конкретных примерах зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям, разрабатываются общие рекомендации по их эксплуатации [11], контролю параметров с использованием автоматизированных систем [12].

В соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», одним из критериев безопасности является неизменность величины периода основного тона колебаний  $T$  здания или сооружения и логарифмического декремента затухания этого тона  $D$ . Эти параметры вычисляются по данным электронных архивов колебаний, регистрируемых с некоторой периодичностью. При этом, для выполнения таких измерений не требуется вскрытие облицовок, а доступ специалистов осуществляется в ограниченное количество мест в здании и не препятствует функционированию объекта по прямому назначению. В частности, такими местами для высотных зданий являются элементы кровли в узлах примыкания к силовому каркасу, а для большепролетных конструкций – силовые элементы перекрытий вблизи середины пролета.

Значение периода основного тона колебаний  $T$  определяется по результатам спектрального анализа электронного архива скоростей или ускорений характерных точек контроля на сооружении, в соответствии с требованиями ГОСТ 34081-2017 «Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний»; поскольку изменение этих параметров во времени пропорционально колебаниям объекта контроля. Независимо от способа измерений, частота изменения параметра и мощность одного и того же колебательного процесса будет неизменной [13]. Существуют математические зависимости между частотой  $f$  (а значит, и периодом  $T$ ), перемещением  $d$ , скоростью  $v$  и ускорением  $a$  для пиковых значений синусоидального сигнала:

$$f = \frac{v}{\pi d} = \frac{ga}{2\pi v} \quad (1)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  [14].

Реальные колебания, возникающие у здания или сооружения под воздействием эксплуатационных периодических нагрузок, представляют собой сложный динамический процесс, который, однако, с достаточной степенью точности может быть представлен в виде нескольких синусоидальных колебаний, для каждого из которых будет справедливым выражение (1). Для целей долговременного мониторинга главный интерес представляют собой параметры  $T$  и  $D$  для первого, наиболее низкочастотного резонанса, поскольку эти колебания обладают наибольшей энергией и поэтому могут реально влиять на механическую безопасность контролируемого объекта.

Существующие в настоящее время приборы для регистрации и последующего анализа механических колебаний зданий и сооружений способны контролировать колебания одновременно по трем взаимно перпендикулярным осям, с шагом кадров телеметрии 0,01 Гц, что в полной мере соответствует требованиям действующих нормативных документов. Значение логарифмического декремента затухания  $D$  получают через амплитудно-частотную характеристику системы:

$$D = \frac{\pi \Delta f}{f_0} \quad (2)$$

где  $f_0$  – наиболее вероятная частота собственных колебаний,  $\Delta f$  – полоса пропускания колебательной системы на уровне 0,707 (-3 дБ) от максимума.

Для параметров основного тона колебаний здания или сооружения под неизменностью в ГОСТ 31937-2011 понимается отклонение величины периода основного тона колебаний  $T$  и логарифмического декремента затухания этого тона  $D$ , регистрируемых и вычисляемых при каждом последующем акте мониторинга, на величину не более  $\pm 10\%$  от первоначально зарегистрированных значений, полученных для данного объекта контроля при первом измерении и анализе.

В пределах жизненного цикла сооружения можно представить зависимость обобщенной характеристики надежности (механической безопасности) в виде «Сигма-кривой», имеющей два нелинейных участка [15]. Нас будет интересовать второй участок, соответствующий переходу технического состояния сооружения из категории «работоспособное» в категорию «ограниченно работоспособное».

### Метод и контролируемые параметры

Нормативных величин по периодам колебаний и декрементам их затухания в настоящее время не существует. Все какие-либо рекомендации (что именно считать нормой) основаны на анализе накопленного опыта. Там, где такой опыт успел накопиться, а именно для типовых многоэтажных жилых зданий, в нормативных документах приводятся для справки некоторые диапазоны частот, в которых следует выполнять регистрацию и анализ колебаний. Очевидно, что за исходные параметры, с которыми в дальнейшем нужно сравнивать результаты измерений периодов и декрементов, следует принимать параметры  $T$  и  $D$  объекта контроля, когда этот объект пока еще находится в нормативной или хотя бы в работоспособной категории технического состояния.

В общем виде у сооружения можно предположить S-образную зависимость («Сигма-кривая») параметров  $T$  и  $D$  от времени эксплуатации (в годах). На этапе нормальной эксплуатации эти параметры остаются неизменными в некоторых пределах, составляющих  $\pm 10\%$  от исходных величин, зафиксированных непосредственно после окончания строительства и ввода сооружения в эксплуатацию. В случае накопления у сооружения в процессе его длительной эксплуатации необратимых изменений конструктивных свойств элементов и узлов несущих конструкций (например, изменение степени шарнирности сопряжений, перераспределение усилий в однотипных элементах и т.п.), контролируемый параметр начинает демонстрировать явный тренд. Поступательное изменение контрольного параметра, свидетельствующее о его скором выходе из заданных пределов вариативности, наряду с постоянным

увеличением числа дефектов, фиксируемых визуальным контролем, предвещает скорый переход сооружения из категории технического состояния «работоспособное» в категорию «ограниченно работоспособное» или «недопустимое» (аварийное).

Значительную часть проблем, связанных с механической безопасностью зданий, представляют собой повреждения частей зданий и сооружений, либо отклонения их от вертикальности, вызванные деформациями грунтов основания и неисправностью фундаментов вследствие различных причин природного или техногенного характера. При этом доступ специалистов для детального обследования фундаментов здания и грунтов его основания, как правило, существенно затруднен либо вовсе невозможен. Деформации грунтов основания и неисправности фундаментов зданий устанавливаются в процессе осмотров надземных строительных конструкций, осуществляемых в составе периодических визуальных обследований. При этом признаками деформации грунтов и неисправности фундаментов могут служить малые изменения величин углов сопряжения смежных элементов силового каркаса здания в его нижней части. Как правило, такие изменения сопровождаются постоянным увеличением количества и интенсивности дефектов, выявляемых визуальным контролем, таких как протечки и трещины в несущих конструкциях.

Кроме того, обобщенными параметрами для периодического контроля (мониторинга) здания могут являться: величина прогиба  $\delta$  в середине пролета (например, для большепролетных конструкций покрытий) и углов наклона  $\Delta$  от вертикальности здания в целом (например, для высотных зданий). Значение крена (углов наклона  $\Delta$ ) вдоль и поперек здания может быть выбрано в качестве обобщенного параметра механической безопасности оснований и фундаментов, взамен контроля величин углов сопряжения элементов каркаса, поскольку способ контроля крена не требует постоянной установки на каждом объекте каких-либо специальных технических устройств.

### Основные результаты

Получен универсальный ограниченный набор контрольных параметров, регистрируемых с некоторой периодичностью в ходе предварительных обследований, наряду с визуальным контролем и фиксацией дефектов конструкций. Набор контрольных параметров универсален, поэтому применим к любому зданию или сооружению. Этот набор контрольных параметров легко может быть формализован и включен в состав типовой формы предварительного обследования (как дополнение к ней), в виде, например, простой таблицы (см. табл. 1).

ГОСТ 31937-2011 регламентирует периодичность проведения обследований 1 раз в 3 года. Однако, совместный анализ результатов двух (или более) последовательных измерений основных контролируемых параметров механической безопасности объекта контроля позволяет в ряде случаев оправдать увеличение этого интервала, вплоть до 10 лет. Опыт многолетнего мониторинга параметров механической безопасности, например, периода первого (основного) тона колебаний, для такого сложного инженерного сооружения, как главный монумент памятника Победы на Поклонной горе в Москве, подтверждает правомочность таких выводов [16], [17].

Таблица 1 – Перечень контролируемых параметров и оборудования для осуществления контроля механической безопасности зданий и сооружений

№№ п/п	Наименование параметра	Условное обозначение	Выполняется на каждом объекте контроля	Примерный состав переносного комплекта оборудования
1	Период основного тона собственных колебаний вдоль большой, малой и вертикальной осей	$T_x$ $T_y$ $T_z$	Выбор и разметка точек для установки датчика регистратора колебаний	Регистратор низкочастотных колебаний с анализатором спектра
2	Логарифмический декремент затухания основного тона собственных колебаний вдоль большой, малой и вертикальной осей	$D_x$ $D_y$ $D_z$		
3	Значение крена вдоль большой и малой осей	$\Delta_x$ $\Delta_y$	Выбор и разметка точек для установки прибора и его визирования	Теодолит, тахеометр, прибор вертикального проектирования
4	Прогиб в середине пролета (большепролетные конструкции)	$\delta$ (по числу таких конструкций)		Нивелир, теодолит, тахеометр

В случае, если контролируемые параметры не только не выходят за пределы 10%-ного контрольного диапазона, но и не изменяются, интервалы между последующими измерениями разумно было бы увеличить. Но для этого следует изучить тренд контролируемого параметра. Если мы измерили (например) период колебаний два раза с интервалом между ними три года, в соответствии с действующим ГОСТ, то по этим двум точкам мы можем составить линейный тренд – это будет прямая линия, проходящая через эти две точки и экстраполированная в будущее. Некоторую

неопределенность при этом вносит погрешность метода измерений контролируемого параметра, поскольку изначально она нам неизвестна.

Если мы измерим период колебаний три раза с интервалом по три года между измерениями, то получим возможность построить параболическую кривую тренда. Экстраполировав ее в будущее, мы сможем более точно прогнозировать дальнейшее изменение интересующего нас параметра. Но на это потребуется больше времени (в годах) и финансовых расходов. По мнению автора, более подробное исследование данной зависимости в пределах жизненного цикла здания не целесообразно.

На рис. 1 приведен пример анализа контролируемого параметра мониторинга при помощи линейного тренда. Для того, чтобы принять решение об увеличении интервала между последующими измерениями (актами мониторинга) с 3 до 10 лет, необходимо выполнить первичное измерение и через три года – повторное измерение. На графике по вертикали отложена величина контролируемого параметра, а по горизонтали – время в годах. Прямая линия соединяет две точки, соответствующие значениям контролируемой величины  $X_0$  и  $X_1$ , полученным с интервалом в три года. Две горизонтальные линии, пересекающие ось ординат в точках  $1,1X_0$  и  $0,9X_0$ , ограничивают доверительный интервал. Таким образом следует поступить с каждым параметром любого типа из Таблицы 1. Если линия тренда, экстраполированная в будущее (продленная вправо) для любого из контролируемых параметров, не выходит из доверительного интервала в пределах 10 лет (в масштабе графика и с обязательной поправкой на точность измерений параметра), то второе повторное измерение можно производить не более чем через 10 лет.

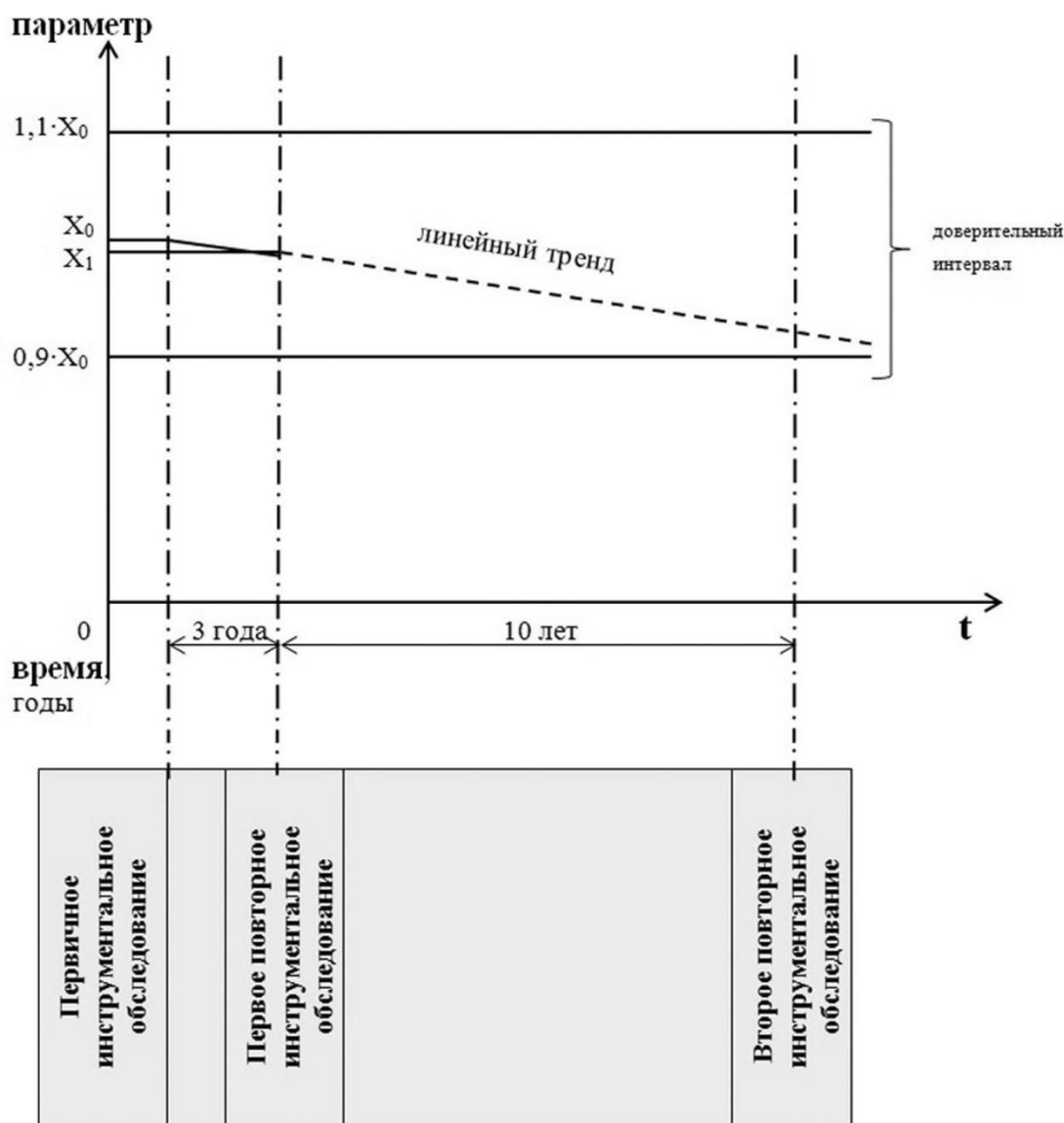


Рис. 1 – Пример анализа контролируемого параметра мониторинга:  $X_0$  – значение контролируемого параметра, измеренное (вычисленное) при первичном инструментальном обследовании;  $X_1$  – то же, при первом повторном инструментальном обследовании

Необходимыми условиями применения предлагаемого метода контроля параметров механической безопасности являются: во-первых, составление паспорта сооружения на момент начала его эксплуатации и последующее ведение этого паспорта в соответствии с требованиями государственного стандарта; и, во-вторых, обязательный учет точности результатов измерений, включая как точность используемого измерительного оборудования, так и точность методов контроля каждого из параметров.

**Заключение**

Регулярный периодический контроль неизменности нескольких характерных параметров (период основного тона собственных колебаний и логарифмический декремент его затухания по трем взаимно перпендикулярным осям, величина крена относительно основных осей здания, значения прогибов большепролетных конструкций) может представлять интерес для зданий и сооружений, долгое время находящихся в эксплуатации, как альтернатива, позволяющая реже проводить комплексное обследование несущих конструкций. Выявление тренда на изменение одного из контролируемых параметров, регистрируемых регулярно (1 раз в 3 года), в ходе периодических осмотров, может являться сигналом к проведению полного комплексного обследования, с целью выявления некондиционных элементов и узлов несущей конструкции, фиксации перехода категории технического состояния здания или сооружения из «работоспособного» в «ограниченно работоспособное».

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Савин С.Н. Современные методики определения динамических параметров зданий и сооружений в соответствии с ГОСТ Р 53778-2010 и ГОСТ Р 54859-2011 / С.Н. Савин, И.Л. Данилов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты) – СПб У ГПС МЧС России, 2013. №3 (7). С. 37-46.
2. О мониторинге особых объектов нежилого фонда города Москвы / Закон города Москвы от 11.07.2007 № 35 (с изменениями на 30.04.2014). – [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/3674793.pdf>. (дата обращения: 15.11.2020)
3. Патрикеев А.В. Основы методики динамического мониторинга деформационных характеристик зданий и сооружений / А.В. Патрикеев, Е.К. Салатов // Вестник МГСУ, 2013. № 1. С. 133-138. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.1.133-138.
4. Дорофеев В.М. Методика определения периода и логарифмического декремента основного тона собственных колебаний зданий и сооружений / В.М. Дорофеев, И.И. Булыкин, Н.В. Назьмов // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 4. С. 28-29.
5. Шашкин М.А. Вибродинамический мониторинг здания в режиме реального времени с функцией управления технологией ремонтно-строительных работ / М.А. Шашкин // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 12. С. 53-59.
6. Ишков А.Н. Оценка значимости периода основного тона собственных колебаний зданий и сооружений, как критерия, определяющего техническое состояние гражданских зданий / А.Н. Ишков, Г.Д. Шмелёв, Н.И. Филиппова // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура, ВГТУ, г. Воронеж. 2017. № 3 (2). С. 9-15.
7. Давидюк А.А. Автоматизированный мониторинг зданий и сооружений при помощи датчиков / А.А. Давидюк, Ю.А. Смирнова, А.П. Долгалёв // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 55-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.55-59.
8. Шаблинский Г.Э. Мониторинг уникальных высотных зданий и сооружений на динамические воздействия / Г.Э. Шаблинский. М.: Изд-во АСВ, 2013. 327 с.
9. Белостоцкий А.М. О развитии адаптивных математических моделей, численных и численно-аналитических методов как основы и составной части систем мониторинга несущих конструкций уникальных зданий и сооружений / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, В.Н. Сидоров, Т.Б. Кайтуков // Сборник научных трудов РААСН. – М.: АСВ, 2018. С. 71-78. DOI: 10.22337/9785432302663-71-78.
10. Бигус Г.А. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова, Д.И. Галкин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ). 2015. – 448 с.
11. Чернов Ю.Т. Проектирование зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям / Ю.Т. Чернов // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 73-77.
12. Шахрамьян А.М. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на олимпийских объектах Сочи-2014 / А.М. Шахрамьян, Ю.А. Колотовичев // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92-105. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.92-105.
13. Бирбраер А.Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А.Н. Бирбраер, А.Ю. Роleder. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
14. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2016 – 751 с.
15. Лурье О.М. Уточнение показателей надёжности систем транспортных средств в течение жизненного цикла при помощи адаптивной фильтрации / О.М. Лурье, К.Е. Бяков, Т.Д. Поздняков // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журн. 2017. № 06. С. 1-12. DOI: 10.7463/0617.0001179.
16. Патрикеев А.В. Система динамического мониторинга инженерного сооружения как ключевой элемент его технической безопасности / А.В. Патрикеев // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 133-140. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.3.133-140.
17. Патрикеев А.В. Актуальные вопросы периодического вибрационного контроля зданий и сооружений / А.В. Патрикеев // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 9. С. 1221-1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1221-1227.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Savin S.N. Sovremennyye metodiki opredeleniya dinamicheskikh parametrov zdaniy i sooruzheniy v sootvetstvii s GOST R 53778-2010 i GOST R 54859-2011. Prirodnyye i tekhnogennyye riski (fiziko-matematicheskiye i prikladnyye aspekty). [Modern methods for determining the dynamic parameters of buildings and structures in accordance with GOST R 53778-2010 and GOST R 54859-2011. Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)] / S.N. Savin, I.L. Danilov // SpbU GPS MCHS Rossii [SpbU GPS of the Ministry of Emergencies of Russia]. 2013, No. 3 (7), Pp. 37-46. [in Russian]

2. O monitoringe osobykh ob'ektov nezhilogo fonda goroda Moskvy. Zakon goroda Moskvy ot 11.07.2007 # 35 (s izmeneniyami na 30.04.2014) [About monitoring of special objects of non-residential fund of the city of Moscow. The law of the city of Moscow dated 07/11/2007 No. 35 (as amended on 04/30/2014)]. – [Electronic resource] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/3674793.pdf>. (accessed: 15.11.2020) [in Russian]
3. Patrikeev A.V. Osnovy metodiki dinamicheskogo monitoringa deformatsionnykh kharakteristik zdaniy i sooruzheniy [Fundamentals of the dynamic monitoring of deformation characteristics of buildings and structures] / Patrikeev A.V., Salatov E.K. // Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, No. 1, pp. 133–138. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.1.133-138 [in Russian]
4. Dorofeyev V.M. Metodika opredeleniya perioda i logarifmicheskogo dekrementa osnovnogo tona sobstvennykh kolebaniy zdaniy i sooruzheniy. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [The methodology for determining the period and the logarithmic decrement of the fundamental tone of the natural vibrations of buildings and structures. Industrial and Civil Engineering] / Dorofeyev V.M., Bulykin I.I., Naz'mov N.V. 2006, No. 4, Pp. 28-29. [in Russian]
5. Shashkin M.A. Vibrodinamicheskiy monitoring zdaniya v rezhime real'nogo vremeni s funktsiyey upravleniya tekhnologiyey remontno-stroitel'nykh rabot. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Real-time vibrodynamic monitoring of the building with functional control of construction and repair work technology. Industrial and Civil Engineering] / Shashkin M.A.. 2017, No. 12, Pp. 53-59. [in Russian]
6. Ishkov A.N. Otsenka znachimosti perioda osnovnogo tona sobstvennykh kolebaniy zdaniy i sooruzheniy, kak kriteriya, opredelyayushchego tekhnicheskoye sostoyaniye grazhdanskikh zdaniy. Zhilishchnoye khozyaystvo i kommunal'naya infrastruktura. [Assessment of the significance of the period of the fundamental tone of the the natural vibrations of buildings and structures, as a criterion that determines the technical condition of civil buildings. Housing and communal infrastructure] / Ishkov A.N., Shmelev G.D., Filippova N.I.. // VGTU – Voronezh., 2017, No. 3 (2), Pp. 9-15. [in Russian]
7. Davidyuk A.A. Avtomatizirovanny monitoring zdaniy i sooruzheniy pri pomoshchi datchikov [Automated monitoring of buildings and structures using sensors] / Davidyuk A.A., Smirnova YU.A., Dolgalov A.P. // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. [Industrial and Civil Engineering]. 2019, No. 2, Pp. 55-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.55-59 [in Russian]
8. Shablinskiy G.E. Monitoring unikal'nykh vysotnykh zdaniy i sooruzheniy na dinamicheskiye vozdeystviya [Monitoring of unique high-rise buildings and structures on dynamic impacts] / G.E. Shablinskiy. DIA publishing house. 2013, 336 p. [in Russian]
9. Belostockiy A.M. O razviti adaptivnykh matematicheskikh modeley, chislennykh i chislenno-analiticheskikh metodov kak osnovy i sostavnoy chasti sistem monitoringa nesushchikh konstruksiy unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [On the development of adaptive mathematical models, numerical and numerical-analytical methods as the basis and component of monitoring systems of supporting structures of unique buildings and structures] // Sbornik nauchnykh trudov RAASN [Collection of scientific works of RAASN] / Belostockiy A.M., Akimov P.A., Sidorov V.N., Kayukov T.B.. DIA publishing house. 2018, pp. 71-78. DOI: 10.22337/9785432302663-71-78 [in Russian]
10. Bigus G.A. Osnovy diagnostiki tekhnicheskikh ustroystv i sooruzheniy. MGTU im. N.E. Baumana (NIU) [Fundamentals of the diagnosis of technical devices and structures. Bauman Moscow State Technical University (NRU)] / Bigus G.A., Daniev Yu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. Moscow., 2015, 448 p. [in Russian]
11. Chernov Yu.T. Proyektirovaniye zdaniy i sooruzheniy, podvergayushchikhsya dinamicheskim vozdeystviyam. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Design of buildings and structures subject to dynamic effects. Industrial and Civil Engineering] / Chernov Yu.T. 2018, No. 4, Pp. 73-77. [in Russian]
12. Shakhraman'jan A.M. Opyt ispol'zovaniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa deformatsionnogo sostoyaniya nesushchikh konstruksiy na olimpiyskikh ob'yektakh Sochi-2014 [The experience of using automated systems for monitoring the deformation state of load-bearing structures at the Olympic facilities in Sochi-2014] / Shakhraman'jan A.M., Kolotovich Yu.A. // Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, No. 12, pp. 92–105. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.92-105 [in Russian]
13. Birbraer A.N. Ekstremal'nyye vozdeystviya na sooruzheniya. [Extreme impacts on structures]. Publishing house of Polytechnic University / A.N. Birbraer. – SPb., 2009, 594 p. [in Russian]
14. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing. Piter Publishing] / A.B. Sergienko. – 2-nd edition. – SPb., 2016, 751 p. [in Russian]
15. Lur'ye O.M. Utochneniye pokazateley nadezhnosti sistem transportnykh sredstv v techeniye zhiznennogo tsikla pri pomoshchi aktivnoy fil'tratsii. Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Baumana. Elektronnyy zhurnal [Refinement of reliability indicators of vehicle systems during the life cycle using active filtering. Science and education. Bauman Moscow State Technical University (NRU) Electronic journal] / Lur'ye O.M., Byakov K.E., Pozdnyakov T.D.. 2017, No. 06, Pp. 1-12. DOI: 10.7463/0617.0001179 [in Russian]
16. Patrikeev A.V. Sistema dinamicheskogo monitoringa inzhenernogo sooruzheniya kak klyuchevoy element yego tekhnicheskoy bezopasnosti [Dynamic monitoring system of an engineering structure as a key element of its technical safety] / A.V. Patrikeev // Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, No. 3, pp. 133–140. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.3.133-140 [in Russian]
17. Patrikeev A.V. Relevant issues of periodic vibration monitoring of buildings and structures. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture] / A.V. Patrikeev. 2020; 15(9): 1221-1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1221-1227 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.016>**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА  
С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ТЕПЛОТЫ ГРУНТА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД**

Научная статья

**Псаров С.А.<sup>1,\*</sup>, Шумилин Е.В.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4368-7848;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3210-1469;<sup>1,2</sup> Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

\* Корреспондирующий автор (006212[at]pnu.edu.ru)

**Аннотация**

Восстановление теплоты грунта в теплый период года позволяет уменьшить требуемую длину геотермальных скважин и, соответственно, уменьшить стоимость обустройства геотермальных тепловых насосов. В данной работе проведено моделирование работы геотермального теплового насоса с учетом восстановления теплоты грунта в теплый период года с помощью плоских солнечных коллекторов, открытых солнечных коллекторов и воздушно-отопительных агрегатов. Впервые показано, что в климатических условиях г. Хабаровска воздушно-отопительные агрегаты за теплый период года не могут полностью восстановить теплоту грунта. Показано, что наиболее перспективным является использование геотермальных тепловых насосов с открытыми солнечными коллекторами из-за их невысокой стоимости и высокой эффективности при низких температурах антифриза в геотермальной скважине после отопительного периода. При этом высокая инерционность грунта накладывает ограничения на тепловую мощность, воспринимаемую грунтом. Это также может привести к неполному восстановлению теплоты грунта в случае теплого периода недостаточной продолжительности.

**Ключевые слова:** геотермальный тепловой насос, плоский солнечный коллектор, открытый солнечный коллектор, воздушно-отопительный агрегат.

**SIMULATION OF A GEOTHERMAL HEAT PUMP OPERATION WITH GROUND HEAT RECOVERY  
IN WARM PERIODS**

Research article

**Psarov S.A.<sup>1,\*</sup>, Shumilin E.V.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4368-7848;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3210-1469;

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

\* Corresponding author (006212[at]pnu.edu.ru)

**Abstract**

The recovery of ground heat in the warm season allows for the reduction of the required length of geothermal wells thus reducing the cost for installing geothermal heat pumps. The current study carries out a simulation of the operation of a geothermal heat pump, taking into account the recovery of ground heat in the warm period of the year using flat-plate solar collectors, open solar collectors and air heating units. The study introduces the data that in the climatic conditions of Khabarovsk, air heating units cannot completely restore the heat of the ground during the warm periods of the year. The research demonstrates that the use of geothermal heat pumps with open solar collectors proves to be the most promising due to their low cost and high efficiency at temperatures of antifreeze agents in a geothermal well after the heating period. At the same time, the high soil inertia imposes restrictions on the thermal power perceived by the ground. This can also lead to incomplete recovery of ground heat in the case of an insufficient duration of a warm period.

**Keywords:** geothermal heat pump, flat-plate solar collector, open solar collector, air heating unit.

**Введение**

Отопление зданий и нагрев горячей воды для бытовых и производственных нужд в условиях сурового климата Дальнего Востока России требует достаточно больших затрат тепловой энергии. Поэтому использование альтернативных источников энергии, таких как геотермальная энергия, солнечная энергия, энергия ветра является одним из способов уменьшения как энергии, необходимой для отопления зданий и производства горячей воды, так и пиковой тепловой мощности. Однако широкому распространению альтернативных источников теплоснабжения препятствует их высокая стоимость. Поэтому последнее время большое количество исследовательских работ посвящено поиску оптимальных сочетаний различных альтернативных источников энергии, которые обеспечили бы экономическую эффективность и техническую надежность альтернативной энергетики.

В частности, исследованию совместной работы геотермальных тепловых насосов и различных солнечных коллекторов последнее время посвящено достаточно большое количество научных работ [1], [2], [3], [4]. Грунт является энергоемким источником низкопотенциальной тепловой энергии. Однако восстановление теплоты грунта из-за низкой теплопроводности происходит достаточно медленно, что в условиях холодного климата приводит к постоянному увеличению термического сопротивления грунта и уменьшению его теплоотдачи. Например, для климатических условий г. Хабаровска нами было показано [5], что коттедж площадью 105 м<sup>2</sup>, в среднем за год потребляет тепловую мощность из геотермальных скважин равную 1530 Вт (13400 кВт·ч тепловой энергии в год). Для компенсации уменьшения теплоотдачи от грунта и обеспечения бесперебойной работы теплового насоса в течение длительного периода (десятилетия лет) необходимо обеспечить запас по длине скважин не менее 110 м, что составило приблизительно одну третью часть общей длины геотермальных скважин.

Для восстановления теплоты грунта в летний период могут быть использованы различные методы. В работе [2] было рассмотрено три варианта восстановления теплоты грунта с помощью гибридных солнечных коллекторов (производящих одновременно электрическую и тепловую энергии). Однако из-за высокой стоимости гибридных солнечных коллекторов экономическая эффективность их использования не была достигнута: минимальные затраты за 20-летний период составили почти 52 тысячи долларов. В работе [3] в качестве перспективного направления восстановления теплоты грунта в летний период было предложено использование открытых солнечных коллекторов. Во-первых, стоимость открытых солнечных коллекторов является относительно невысокой: 2–3 тысячи рублей за квадратный метр. Во-вторых, после отопительного периода температура антифриза в геотермальной скважине составляет около 0 °С. Поэтому открытые солнечные коллекторы могут быть использованы круглосуточно, нагревая грунт за счет температуры наружного воздуха. Таким образом, поиск эффективных способов восстановления теплоты грунта является актуальной научной задачей.

В данной работе проведено численное исследование совместной работы геотермального теплового насоса с плоским солнечным коллектором; открытым солнечным коллектором; воздушным отопительным агрегатом Volcano VR1, которые использовались для восстановления теплоты грунта в теплый период. При моделировании теплоотдачи от грунта использовалась зависимость термического сопротивления грунта от времени, что позволяет моделировать работу геотермальных скважин и теплового насоса в долгосрочной перспективе (десять и более лет).

### Исходные данные для моделирования

Моделируемая система теплоснабжения с геотермальным тепловым насосом схематично представлена на рисунке 1.

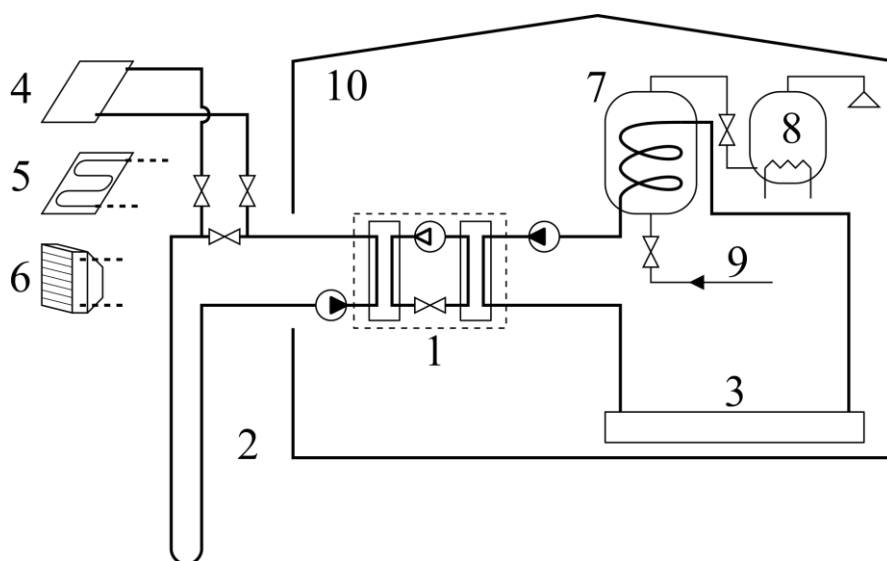


Рис. 1 – Схема моделируемой системы теплоснабжения: 1 – тепловой насос, 2 – геотермальные скважины, 3 – низкотемпературная система отопления, 4 – плоский солнечный коллектор, 5 – открытый солнечный коллектор, 6 – воздушно-отопительный агрегат, 7 – бак-аккумулятор для предварительного нагрева горячей воды, 8 – электронагреватель для горячей воды емкостного типа, 9 – ввод холодной воды, 10 – жилой дом

Расчет был выполнен для одноэтажного жилого дома площадью 105 м<sup>2</sup>. Расчетные условия приняты для г. Хабаровска: температура воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 минус 29 °С; продолжительность отопительного периода 205 суток; средняя температура отопительного периода минус 9,5 °С. Воздухообмен принимался равным однократному воздухообмену в жилых комнатах и составил приблизительно 205 м<sup>3</sup>/ч. Расчетная тепловая нагрузка на систему отопления с учетом рекуперации теплоты удаляемого вентиляционного воздуха составила 6,39 кВт.

Для горячего водоснабжения принимался электрический бойлер с электронагревателем мощностью 2 кВт. При расчете среднемесячного потребления энергии на горячее водоснабжение общий расход воды принимался равным 20 м<sup>3</sup>/мес на четверых проживающих. Нагрев горячей воды осуществляется в баке-накопителе до температуры внутреннего контура теплового насоса, затем в электрическом бойлере до температуры 65 °С. Среднемесячная тепловая нагрузка на тепловой насос для горячего водоснабжения составила 0,47 кВт.

При моделировании тепловых потерь здания трансмиссионные тепловые потери и потери на нагрев вентиляционного воздуха принимались пропорциональными среднемесячным температурам воздуха и рассчитывались по формуле (1):

$$q_{зд} = q_0 \frac{T_{зд} - T_m}{T_{зд} - T_p} \quad (1)$$

где  $q_0$  – тепловые потери при расчетной температуре наружного воздуха,  $T_{зд}$  – средняя температура воздуха в жилом доме,  $T_m$  – средняя месячная температура,  $T_p$  – расчетная температура наружного воздуха.

Также при моделировании были учтены тепловые поступления для четырех проживающих и тепловые поступления от солнечной радиации. Площадь светопрозрачных конструкций принималась равной 8,8 м<sup>2</sup> для южного фасада дома и



7,6 м<sup>2</sup> для северного фасада. Средние месячные теплоступления от прямой и рассеянной солнечной радиации принимались по климатическим справочникам.

Для моделирования теплоснабжения здания были использованы данные для электрических парокомпрессионных геотермальных тепловых насосов DanHeat D&S-9 (НС) или аналог SPRSUN CGD-9 (НС). На сайте производителя приведены все данные, необходимые для моделирования. Тепловая мощность насоса и потребляемая электрическая энергия описывались квадратичными полиномами относительно температуры антифриза на входе в тепловой насос со стороны геотермальной скважины и температуры теплоносителя на выходе из теплового насоса со стороны системы отопления, которая принималась постоянной равной 45 °С.

В работе [5] нами было показано, что при отсутствии восстановления теплоты грунта в летний период для бесперебойной работы теплового насоса требуется обустройство геотермальных скважин общей длиной 320 м при теплопроводности грунта 1,7 Вт/(м·°С). При этом около 110 м скважин необходимо компенсации несбалансированной теплоты, ежегодно отбираемой из грунта. Поэтому в данной работе при моделировании использовалось поле из пяти скважин глубиной по 40 м каждая (суммарная длина скважин 200 м). Этой длины скважин достаточно для обеспечения работы теплового насоса в течение одного отопительного периода, включая пиковые нагрузки.

Для моделирования геотермальных скважин использовалась методика, впервые предложенная в работе [6] и позднее развитая в других работах [7], [10], [11].

В соответствии с данной методикой линейная плотность теплового потока от грунта к геотермальной скважине может быть определена по формулам (2) и (3):

$$q_l(t) = \frac{T_g - T_b}{R_q(t)} \quad (2)$$

$$R_q(t) = \frac{1}{2\pi\lambda_g} g(t, a_g, H, r_b, \text{геометрия поля скважин}) \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $T_g$  – температура грунта вдали от геотермальных скважин может быть принята плюс 8 °С,  $T_b$  – температура поверхности обсадной трубы геотермальной скважины,  $R_q(t)$  – термическое сопротивление теплопередаче от грунта к геотермальной скважине,  $\lambda_g$  – теплопроводность грунта,  $a_g$  – температуропроводность грунта,  $H$  – глубина скважин,  $r_b$  – наружный диаметр скважины.

Функция  $g(t)$  в формуле (3) является безразмерным термическим сопротивлением поля геотермальных скважин. Безразмерное термическое сопротивление рассчитывалось согласно [7], [8] и фактически является откликом поля геотермальных скважин на ступенчатое тепловое воздействие (ступенчатую функцию Хевисайда). Это позволяет выполнить моделирование теплового потока от геотермальных скважин для нестационарного режима и произвольного временного теплового воздействия. При этом для геотермальных скважин использовалась полностью неявная схема по времени.

Для расчета теплоступлений от солнечных коллекторов использовалась следующая модель [2], [3]:

$$Q_{coll} = F_{coll} Q_t (\eta_0 - T_{норм}(b_1 + b_2 u)) \quad (4)$$

$$Q_t = Q_{sun} + \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma ((T_a + 273.15)^4 - (T_c + 273.15)^4) \quad (5)$$

$$T_{норм} = \frac{T_c - T_a}{Q_t} \quad (6)$$

где  $F_{coll}$  – площадь солнечного коллектора, м<sup>2</sup>;  $Q_t$  – суммарное излучение, попадающее на коллектор, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{sun}$  – сумма прямой и рассеянной солнечной радиации, попадающей на коллектор, Вт/м<sup>2</sup>;  $u$  – скорость ветра, м/с;  $T_c$  – температура антифриза, поступающего в коллектор, °С;  $T_a$  – температура окружающего воздуха, °С;  $T_{норм}$  – относительная температура коллектора, м<sup>2</sup>°С/Вт;  $\varepsilon$  – степень черноты коллектора;  $\alpha$  – коэффициент поглощения солнечной радиации коллектора;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\eta_0$  – базовый коэффициент эффективности солнечного коллектора;  $b_1, b_2$  – коэффициенты, учитывающие влияние ветра на эффективность коллектора.

Экспериментальные зависимости коэффициента эффективности для разных коллекторов от относительной температуры коллектора приведены на рисунке 2. На рисунке 2 видно, что для открытых солнечных коллекторов эффективность может быть больше единицы из-за нагрева антифриза окружающим воздухом. Выполненная нами аппроксимация экспериментальных данных показывает, что для открытых солнечных коллекторов коэффициенты в формулах (4), (5), (6) равны  $\eta_0 = 0,84$ ,  $b_1 = 18,8$  Вт/(м<sup>2</sup>°С),  $b_2 = 3,7$  Вт/(м<sup>3</sup>°С). Для плоских солнечных коллекторов коэффициенты в формулах (4), (5), (6) равны  $\eta_0 = 0,8$ ,  $b_1 = 4,1$  Вт/(м<sup>2</sup>°С),  $b_2 = 0$  Вт/(м<sup>3</sup>°С). Суммарная месячная прямая и рассеянная солнечная радиация, попадающая на коллектор, принималась по климатическим справочникам.

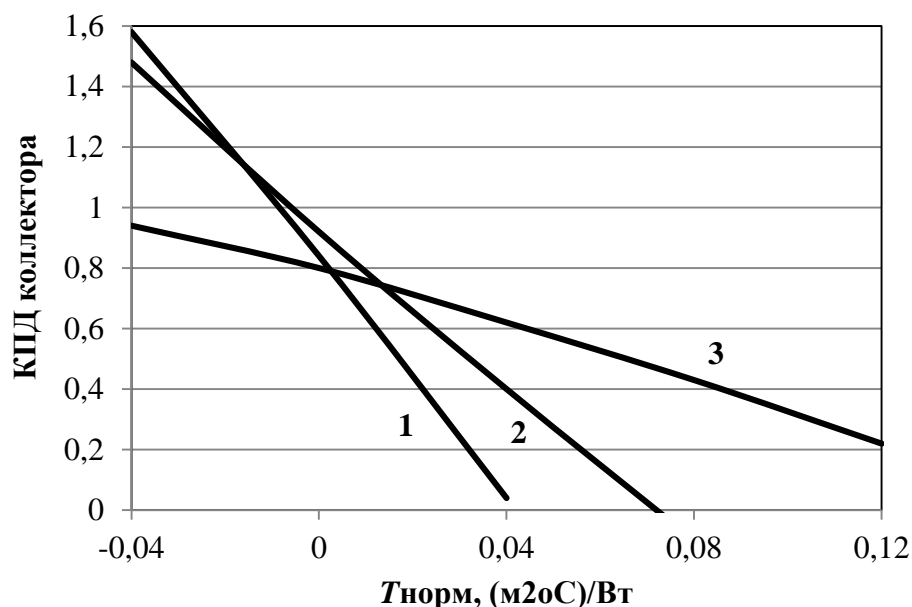


Рис. 2 – Экспериментальные зависимости коэффициента эффективности коллектора от относительной температуры [3]: 1 – открытый солнечный коллектор для летнего бассейна; 2 – открытый солнечный коллектор с селективным покрытием, 3 – плоский солнечный коллектор

Для расчета тепlopоступлений от воздушно-отопительного агрегата использовались коэффициенты теплопередачи от воздуха к антифризу для пяти скоростей вентилятора агрегата: 212, 306, 361, 407 и 466 Вт/°С. Коэффициенты теплопередачи получены путем аппроксимации технических данных, представленных производителем.

#### Результаты расчета и анализ

На рисунках 3 и 4 показано количество тепловой энергии, полученное грунтом за летний период от плоского, открытого солнечных коллекторов и от воздушно-отопительного агрегата.

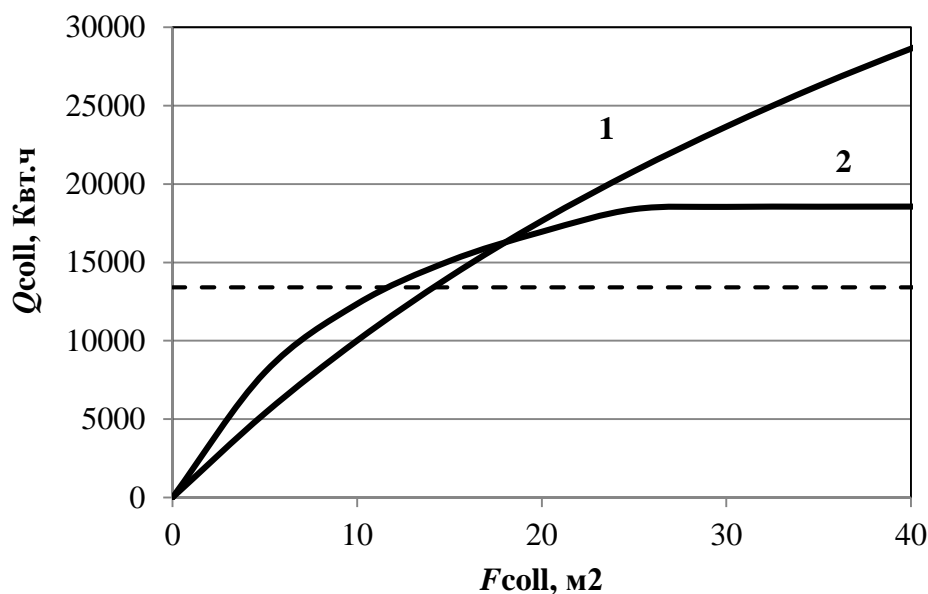


Рис. 3 – Количество тепловой энергии, полученное грунтом от солнечных коллекторов в зависимости от их площади: 1 – плоский солнечный коллектор; 2 – открытый солнечный коллектор для летнего бассейна  
Примечание: пунктирной линией показано количество теплоты, необходимое для полного восстановления теплоты грунта

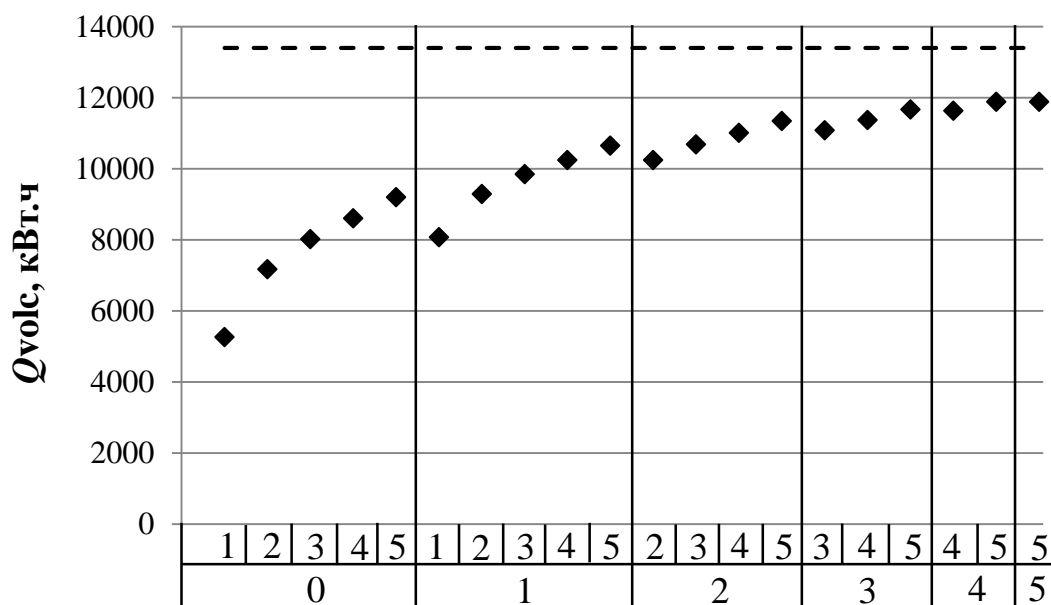


Рис. 4 – Количество тепловой энергии, полученное грунтом от двух воздушно-отопительных агрегатов в зависимости от скоростей вентиляторов агрегатов

Примечание: пунктирной линией показано количество теплоты, необходимое для полного восстановления теплоты грунта

На рисунке 3 видно, что полное восстановление теплоты грунта в летний период происходит при площади плоских солнечных коллекторов равной 14 м<sup>2</sup>, открытых солнечных коллекторов равной 11 м<sup>2</sup>. При этом для открытых солнечных коллекторов при площади более 23 м<sup>2</sup> наблюдается выход на стационарное значение равное 18500 кВт·ч, связанное с высокой инерционностью грунта, повышением температуры антифриза и, соответственно, невозможностью грунта принять тепловой поток больше определенной мощности.

При восстановлении теплоты грунта с помощью воздушно-отопительных агрегатов также происходит выход на стационарное значение приблизительно 11900 кВт·ч (см. рисунок 4). При этом полного восстановления теплоты грунта за летний период не происходит.

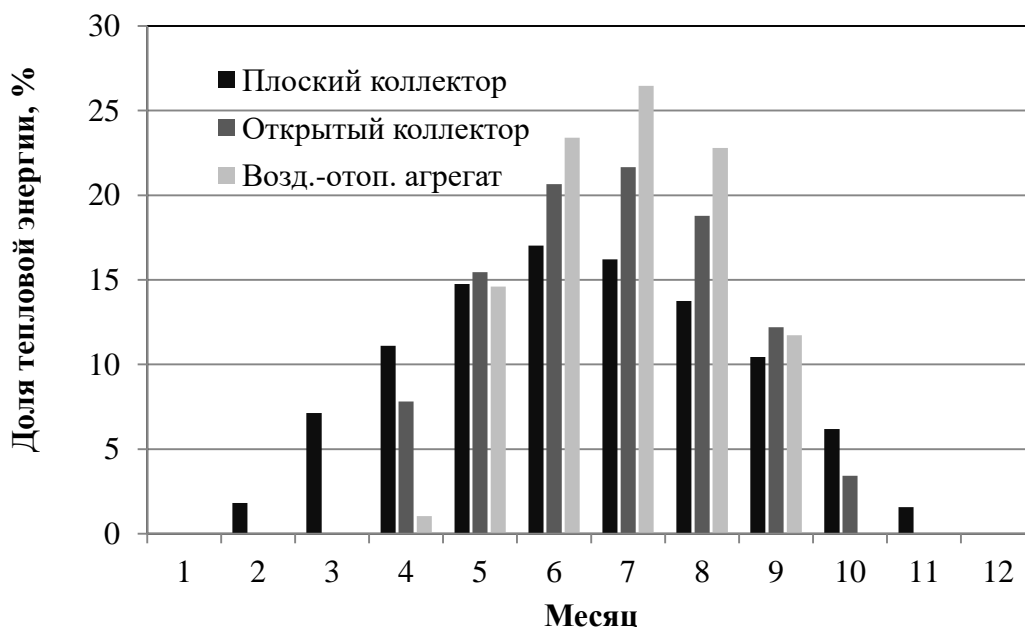


Рис. 5 – Восстановление теплоты грунта по месяцам при площади коллекторов 10 м<sup>2</sup> и двух воздушно-отопительных агрегатов с вентиляторами, установленными на 3-ю скорость

На рисунке 5, на котором приведен процесс восстановления теплоты грунта по месяцам, видно, что восстановление теплоты грунта воздушно-отопительным агрегатом происходит только с мая по сентябрь и является наиболее интенсивным из рассмотренных способов восстановления грунта. Однако даже в условиях жаркого дальневосточного лета (средняя температура июля 21,4°C) воздушно-отопительные агрегаты не могут полностью восстановить теплоту грунта за теплый период года. С учетом высокой стоимости и относительно высокого уровня шума воздушно-отопительных агрегатов следует сделать вывод о нецелесообразности их использования для восстановления теплоты грунта, несмотря на то что данный способ наиболее часто встречается на практике.

Между восстановлением теплоты грунта с помощью плоских и открытых солнечных коллекторов невозможно сделать однозначный выбор в пользу одного из них. На рисунке 3 видно, что наиболее надежным и универсальным (работающим в широком диапазоне климатических условий) является восстановление теплоты грунта с помощью плоских солнечных коллекторов. Однако стоимость плоского солнечного коллектора составляет от 21 тысячи рублей за один коллектор площадью 2 м<sup>2</sup>. Стоимость 7 коллекторов с учетом их обвязки составит от 160 до 180 тысяч рублей. При этом восстановление теплоты грунта в летний период позволяет уменьшить суммарную длину скважин на 110 м и при стоимости бурения около 2 тысяч рублей за метр уменьшить капитальные затраты на обустройство геотермальных скважин на 220–250 тысяч рублей. Поэтому стоимости обустройства плоских солнечных коллекторов, хотя и остается ниже, но приближается к стоимости трех дополнительных геотермальных скважин по 40 м каждая.

Открытые солнечные коллекторы напротив имеют небольшую стоимость, например, открытый коллектор для летнего бассейна площадью 1 м<sup>2</sup> стоит около 1500 рублей. Поэтому затраты на систему восстановления теплоты грунта с помощью открытых солнечных коллекторов составят 30–40 тысяч рублей. К недостаткам открытых солнечных коллекторов можно отнести выход на насыщение по тепловой энергии при определенной площади коллекторов (см. рисунок 3) и отсутствие рынка данных типов коллекторов. Из-за этого применение открытых солнечных коллекторов ограничено районами с достаточно продолжительным теплым периодом года, а надежность и долговечность коллекторов данного типа недостаточно изучены.

На рисунке 6 приведены температуры грунта вблизи геотермальных скважин после многолетней работы теплового насоса с учетом восстановления теплоты грунта в летний период. Определение данного параметра при моделировании является очень важным, поскольку тепловые насосы имеют ограничения по температуре антифриза, поступающего из геотермальных скважин. Как низкая, так и высокая температуры антифриза могут привести к аварийной остановке или выходу из строя теплового насоса.

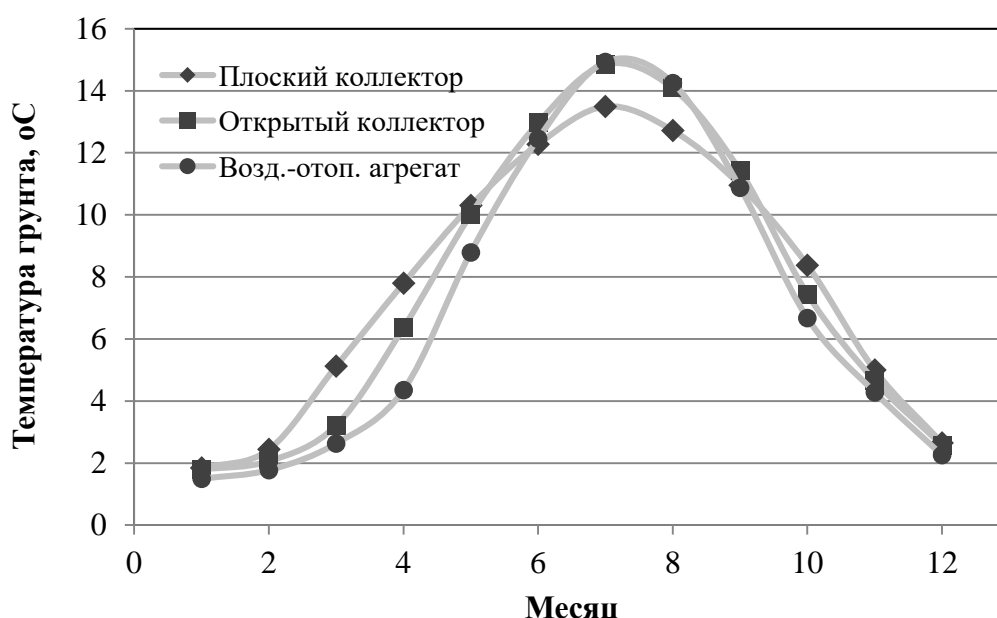


Рис. 6 – Температура грунта возле геотермальной скважины с учетом восстановления теплоты грунта в летний период

На рисунке 6 видно, что температура грунта в январе составляет почти 2 °C, а в теплый период года не превышает 16 °C. Таким образом, несмотря на значительные сезонные колебания температуры наружного воздуха и значительные колебания тепловой нагрузки на систему теплоснабжения, температура грунта находится в пределах допустимых рабочих температур большинства тепловых насосов, как в отопительный, так и в теплый период года. При этом сохраняется необходимый запас температуры для работы теплового насоса в условиях пиковых нагрузок в наиболее холодную пятидневку.

### Заключение

В работе впервые было показано, что полное восстановление теплоты грунта в теплый период года невозможно без использования солнечной радиации. Даже в условиях жаркого дальневосточного лета воздушно-отопительные агрегаты не могут полностью восстановить теплоту грунта, что с учетом их высокой стоимости и относительно высокого уровня шума приводит к нецелесообразности их использования для этих целей. При достаточно продолжительном теплом периоде года наиболее оптимальным является восстановление теплоты грунта с помощью открытых солнечных коллекторов, имеющих невысокую стоимость. Определена необходимая площадь солнечных коллекторов и показано, что стоимость обустройства солнечных коллекторов меньше стоимости обустройства дополнительного количества геотермальных скважин, необходимых для обеспечения многолетней бесперебойной работы теплового насоса. В работе также показано, что восстановление теплоты грунта в теплый период года не приводит к выходу температуры грунта за пределы допустимого рабочего диапазона температур, указанного производителями тепловых насосов.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

**Список литературы / References**

1. Eicher S. Life cycle impact assessment of a solar assisted heat pump for domestic hot water production and space heating / S. Eicher, C. Hildbrand, A. Kleijer, et al. // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 48. – P. 813-818.
2. Lei Xia Performance Simulation of a Ground Source Heat Pump System Integrated with Solar Photovoltaic Thermal Collectors for Residential Applications / Lei Xia, Zhenjun Ma, G. Kokogiannakis // *Building Simulation 2017 : Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017*. – USA, 2017. – P. 839-847.
3. Bertram E. Heat Pump Systems with Vertical Ground Heat Exchanger and Uncovered Solar Thermal Collectors. – Umschlag: MV-Verlag, 2015. – 258 p.
4. Mojic I. Heat pump system with uncovered and free ventilated covered collectors in combination with a small ice storage / I. Mojic, M.Y. Haller, B. Thissen, E. Frank // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 48. – P. 608-617.
5. Псаров С. А. Методика определения суммарной длины вертикальных скважин для геотермальных тепловых насосов / С. А. Псаров, Е. В. Шумилин, А. В. Каменчуков // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2020. – № 11 (101), Часть 1. – С. 61-66.
6. Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. – Sweden: University of Lund, Department of Mathematical Physics, 1987. – 222 p.
7. Cimmino M. pygfunction: an open-source toolbox for the evaluation of thermal response factors for geothermal borehole fields // *The Canadian Chapter of the International Building Performance Simulation Association : Proceedings of eSim 2018, the 10<sup>th</sup> conference of IBPSA, Canada, May 9-10, 2018*. – Canada, Montreal. – P. 492-501.
8. Cimmino, M. (2018). Fast calculation of the *g*-functions of geothermal borehole fields using similarities in the evaluation of the finite line source solution // *Journal of Building Performance Simulation*. – 2018. – 11(6). – P. 655-668.
9. Xuedan Zhang Comparison of Four Methods for Borehole Heat Exchanger Sizing Subject to Thermal Response Test Parameter Estimation / Xuedan Zhang, Tiantian Zhang, Bingxi Li, Yiqiang Jiang // *Energies*. – 2019. – № 12, 4067.
10. Rolando, D. A Web Application for Geothermal Borefield Design / D. Rolando, J. Acuna, M. Fossa // *Proceedings World Geothermal Congress, Australia, Melbourne, 19-25 April, 2015*. – P. 1-10. [Electronic resource] URL: [https://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.571174.1550157681!/rolando%20et%20al%20web%20application.pdf](https://www.kth.se/polopoly_fs/1.571174.1550157681!/rolando%20et%20al%20web%20application.pdf) (accessed 01.10.2020).
11. Claesson, J. An analytical method to calculate borehole fluid temperatures for time-scales from minutes to decades / J. Claesson, S. Javed // *ASHRAE Transactions*. – 2011. – vol. 117(2), P. 279-288.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Eicher S. Life cycle impact assessment of a solar assisted heat pump for domestic hot water production and space heating / S. Eicher, C. Hildbrand, A. Kleijer, et al. // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 48. – P. 813-818.
2. Lei Xia Performance Simulation of a Ground Source Heat Pump System Integrated with Solar Photovoltaic Thermal Collectors for Residential Applications / Lei Xia, Zhenjun Ma, G. Kokogiannakis // *Building Simulation 2017 : Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017*. – USA, 2017. – P. 839-847.
3. Bertram E. Heat Pump Systems with Vertical Ground Heat Exchanger and Uncovered Solar Thermal Collectors. – Umschlag: MV-Verlag, 2015. – 258 p.
4. Mojic I. Heat pump system with uncovered and free ventilated covered collectors in combination with a small ice storage / I. Mojic, M.Y. Haller, B. Thissen, E. Frank // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 48. – P. 608-617.
5. Psarov S. A. Metodika opredelenija summarnoj dliny vertikal'nyh skvazhin dlja geotermal'nyh teplovyh nasosov [Method of determining the total length of vertical wells for geothermal heat pumps] / S. A. Psarov, E. V. Shumilin, A. V. Kamenchukov // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]*. – 2020. – № 11 (101), part 1. – P. 61-66. [in Russian]
6. Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. – Sweden: University of Lund, Department of Mathematical Physics, 1987. – 222 p.
7. Cimmino M. pygfunction: an open-source toolbox for the evaluation of thermal response factors for geothermal borehole fields // *The Canadian Chapter of the International Building Performance Simulation Association : Proceedings of eSim 2018, the 10<sup>th</sup> conference of IBPSA, Canada, May 9-10, 2018*. – Canada, Montreal. – P. 492-501.
8. Cimmino, M. (2018). Fast calculation of the *g*-functions of geothermal borehole fields using similarities in the evaluation of the finite line source solution // *Journal of Building Performance Simulation*. – 2018. – 11(6). – P. 655-668.
9. Xuedan Zhang Comparison of Four Methods for Borehole Heat Exchanger Sizing Subject to Thermal Response Test Parameter Estimation / Xuedan Zhang, Tiantian Zhang, Bingxi Li, Yiqiang Jiang // *Energies*. – 2019. – № 12, 4067.
10. Rolando, D. A Web Application for Geothermal Borefield Design / D. Rolando, J. Acuna, M. Fossa // *Proceedings World Geothermal Congress, Australia, Melbourne, 19-25 April, 2015*. – P. 1-10. [Electronic resource] URL: [https://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.571174.1550157681!/rolando%20et%20al%20web%20application.pdf](https://www.kth.se/polopoly_fs/1.571174.1550157681!/rolando%20et%20al%20web%20application.pdf) (accessed 01.10.2020).
11. Claesson, J. An analytical method to calculate borehole fluid temperatures for time-scales from minutes to decades / J. Claesson, S. Javed // *ASHRAE Transactions*. – 2011. – vol. 117(2), P. 279-288.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.017>**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ  
ПО ПРОИЗВОДСТВУ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Научная статья

**Кулагин С.М.<sup>1</sup>, Крупнов Е.И.<sup>2</sup>, Ометова М.Ю.<sup>3</sup>, Рыбкина Г.В.<sup>4</sup>\***<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия

\* Корреспондирующий автор (ometova\_m[at]rambler.ru)

**Аннотация**

Предложена энергоэффективная схема холодоснабжения предприятия по производству полимерных материалов. На данном предприятии холод требуется для обеспечения требуемых параметров микроклимата и качественного протекания технологического процесса. В качестве источника холодоснабжения в работе предложена схема чиллер с драйкуллером. Установка дополнительного теплообменного устройства на нагнетательной линии холодоносителя позволяет сократить потребление электрической энергии. Для утилизации «бросовой» теплоты от холодильного центра предложена схема утилизации теплоты с использованием парокомпрессионного теплового насоса, теплообменное оборудование, которого рассчитывалось с учетом теплоты фазового перехода. Определен экономический эффект предлагаемых проектных решений.

**Ключевые слова:** системы холодоснабжения, холодильный центр, тепловой насос, энергосбережение, парокомпрессионный цикл, драйкуллер.

**DEVELOPMENT OF AN ENERGY-EFFICIENT COOLING SCHEME FOR A POLYMERIC MATERIAL  
MANUFACTURING ENTERPRISE**

Research article

**Kulagin S.M.<sup>1</sup>, Krupnov E.I.<sup>2</sup>, Ometova M.Yu.<sup>3</sup>, Rybkina G.V.<sup>4</sup>\***<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

\* Corresponding author (ometova\_m[at]rambler.ru)

**Abstract**

The current article presents an energy-efficient scheme of refrigeration supply of a polymeric material manufacturing enterprise. The enterprise uses cold to ensure the required parameters of the microclimate and high-quality operation of the technological process. The study proposes a chiller and dry cooler scheme as a source of refrigeration. The installation of an additional heat exchanger on the cold carrier supply line reduces the consumption of electrical energy. For the utilization of "discarded" heat from the refrigeration center, the study proposes a scheme for heat utilization using a steam compression heat pump, heat exchange equipment, which was calculated taking into account the heat of the phase transition. The research identifies the economic effect of the proposed design solutions.

**Keywords:** refrigeration system, cooling center, heat pump, energy efficiency, vapor compression cycle, dry cooler.

**Введение**

С 2006 года в РФ активно развивается отечественный рынок по производству полимерных материалов, для производства которых требуются энергоемкие системы холодоснабжения. Потребление энергии системами холодоснабжения на данный момент составляет 17 % от мирового потребления, а к 2030 году прогнозируется увеличение этого показателя до 25 %. [1]. Снижение энергоемкости систем холодоснабжения является актуальной задачей, решение которой позволит повысить качество выпускаемой продукции при снижении себестоимости.

На практике применяются различные схемы холодоснабжения производственных помещений: схемы холодоснабжения с буферной емкостью, системы холодоснабжения с фрикулингом, чиллер с льдогенератором и др. [2], [3], [4], и др. Удачные решения по холодоснабжению одних помещений оказываются неприемлемыми на другом объекте.

Целью данной работы является разработка эффективной системы холодоснабжения предприятия по производству полимерных материалов и эффективной системы утилизации теплоты от холодильных систем. Кроме создания требуемых параметров воздушной среды, на предприятии холод требуется для охлаждения технологического оборудования.

Объектом исследования данной статьи является предприятие по производству биаксиально ориентированной полипропиленовой пленки. Нормативные документы регламентируют проектировать системы холодоснабжения с применением естественных и искусственных источников холода [5], [6]. Основные потребители холода на предприятии – технологический процесс, фанкойлы, приточные установки и теплообменное оборудование. Холодильный центр предприятия должен обеспечивать заданные режимы холодоснабжения каждого потребителя.

Общая потребность в холоде данного предприятия составляет 3873 кВт, из них 1400 кВт требуется на технологический процесс. Холодильный центр на предприятии потребляет 1600 кВт энергии для производства холода. Основные элементы технологической схемы производства полимерного материала: главный экструдер, соэкструдер, MDO, TDO, PRS-намотчик. Каждый из элементов дополняется системой водоподготовки.

Для решения поставленной задачи предложено запроектировать трехконтурный холодильный центр (рис. 1):

– первый контур, объединяющий источник холода (холодильные установки), насосные установки и промежуточные теплообменники. Контур имеет температуру холодоносителя 7/12 °С. В качестве холодоносителя применяется водный раствор 50% пропиленгликоля, расход 320 м<sup>3</sup>/ч;

– второй контур, объединяющий потребителей холода, насосную установку и промежуточный теплообменник. Контур имеет температуру холодоносителя 10/16 °С. В качестве холодоносителя применяется вода в количестве 140 м<sup>3</sup>/ч.

– третий контур, объединяющий потребителей холода, насосную установку и промежуточный теплообменник. Контур имеет температуру холодоносителя 20/26 °С. В качестве холодоносителя применяется вода, в количестве 100 м<sup>3</sup>/ч.

При температуре наружного выше + 5°С применяется летний режим работы холодильного центра. В теплый период года естественные источники холода не участвуют в системе холодоснабжения (драйкулеры отключены), охлаждение производится за счет искусственных источников [7].

Циркуляцию холодоносителя в контуре, обеспечивают циркуляционные насосы, расположенные на 1-ом уровне холодильного центра, и обслуживают первичный контур теплообменников. Циркуляционные насосы оборудуются частотными преобразователями.

Холодоноситель контуров фэнкойлов, приточных установок и технологического оборудования – вода. Циркуляцию в этих контурах холодоснабжения обеспечивают циркуляционные насосы, расположенные на 2-ом уровне холодильного центра.

Для поддержания заданных температур 10/16°С и 20/26°С в контурах фэнкойлов, приточных установок и технологического оборудования, предусмотрены два пластинчатых теплообменника. Для компенсации изменения объема холодоносителя предусмотрены расширительные мембранные баки.

Энтропийно-статистический анализ парокомпрессионного контура, который выполнялся в программном комплексе Solkane 7.0 показал, что в качестве искусственного источника холодоснабжения целесообразно использовать фреон R134a (тетрафторэтан), который обладает высокой удельной энтальпией и относительно высокой объемной способностью переноса теплоты.

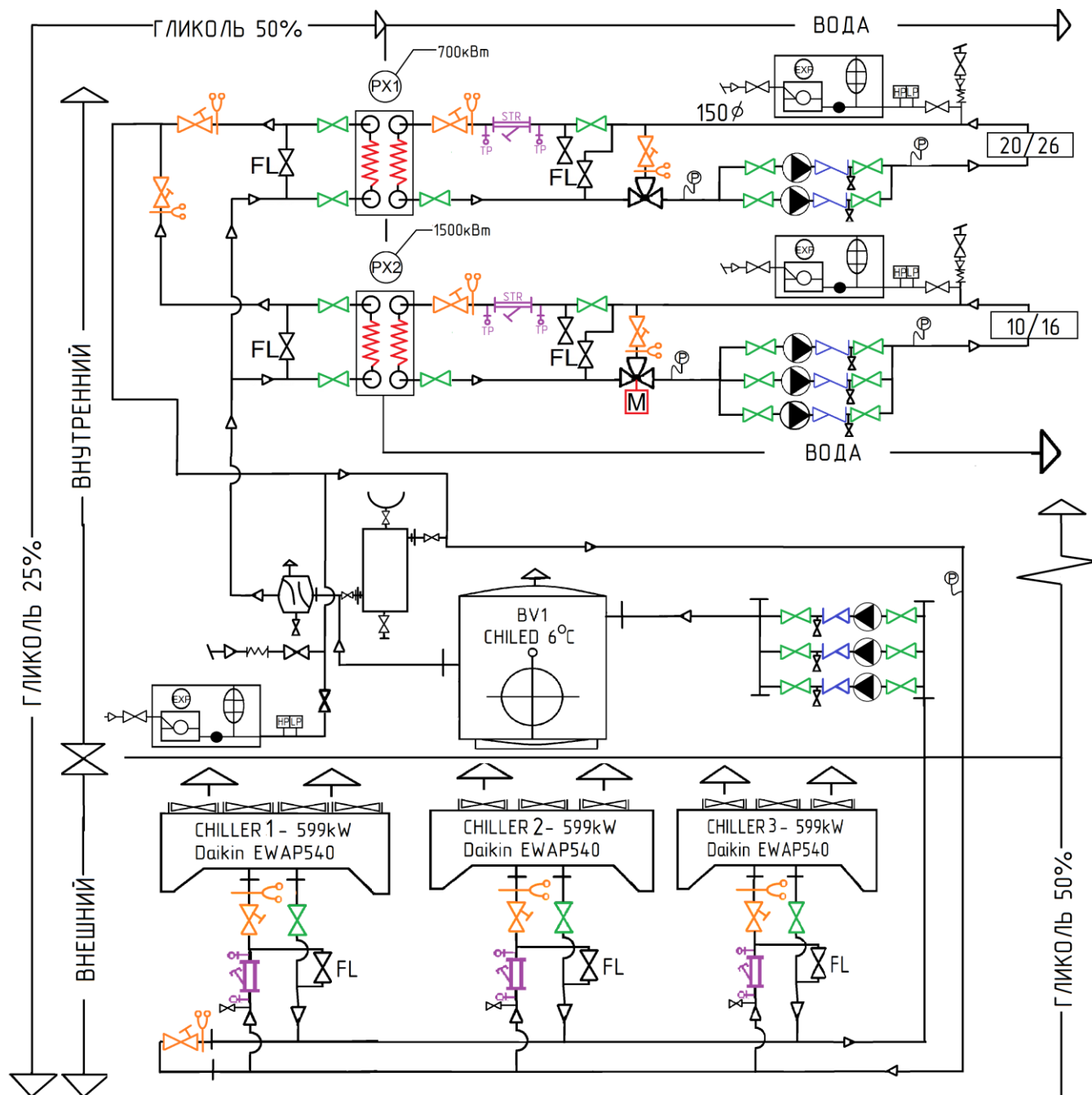


Рис. 1 – Принципиальный трехконтурный центр

При работе холодильного центра от компрессоров выделяется большое количество теплоты, которое в количестве 14000 кВт выбрасывается в окружающую среду. На предприятии по производству полимерных материалов одновременно с потребностью в холоде существует потребность в тепловой энергии. Разработка энергосберегающих решений по утилизации «бросового» тепла от холодильного центра является актуальной задачей [7], [8]. Следует отметить, что график работы теплового насоса и потребности предприятия по производству полимерной пленки в горячей воде совпадают. Потребность данного предприятия в горячей воде для обработки поверхностей составляет 12000 кВт.

Система утилизации теплоты конденсации холодильного центра строится следующим: рядом с чиллером устанавливается парокомпрессионный тепловой насос, который забирает холодоноситель со стороны линии нагнетания компрессора, рис. 2. Основное назначение теплового насоса утилизировать теплоту конденсации и направлять ее для нагрева воды до температуры 60° C.



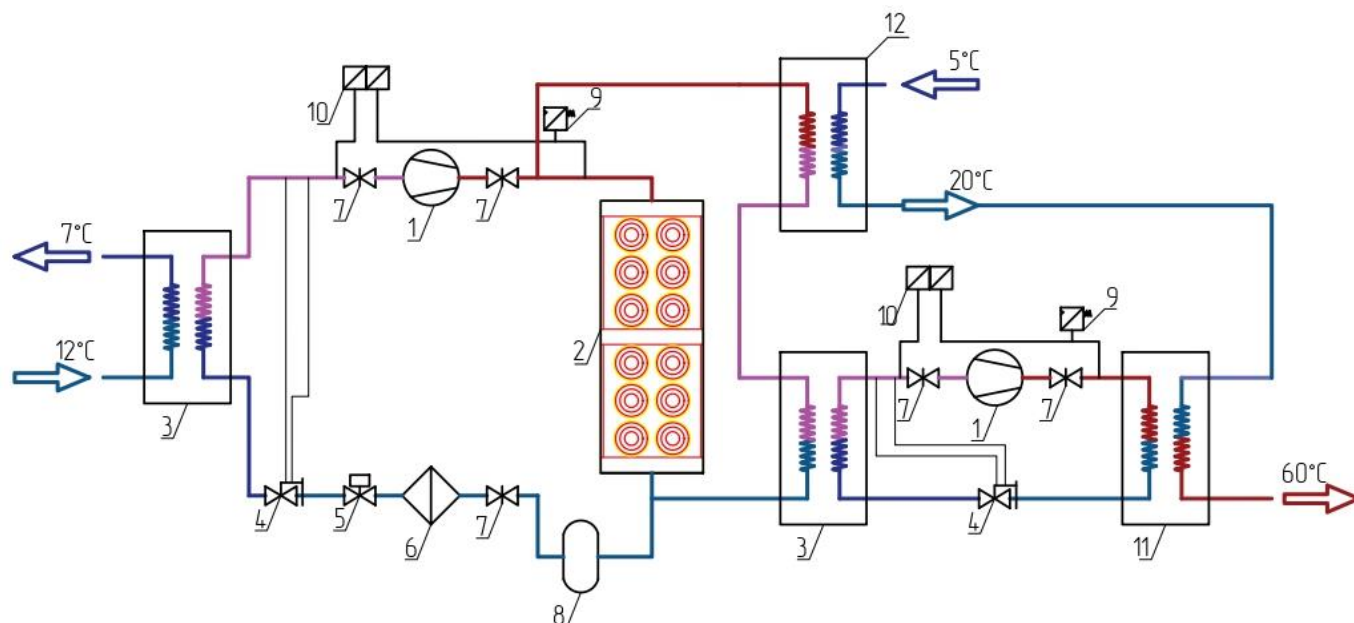


Рис. 2 – Схема утилизации тепла конденсации холодильного центра: 1-Компрессор; 2-Воздушный конденсатор; 3-Испаритель; 4- Термо-регулирующий вентиль; 5- Соленоидный вентиль; 6-Фильтр осушитель; 7- Вентиль; 8- Ресивер; 9- Реле высокого давления; 10- Реле давления сдвоенное; 11- Водяной конденсатор; 12- Промежуточный теплообменник

При определении поверхностей нагрева испарителя и конденсатора коэффициент теплоотдачи рассчитывался с учетом фазовых переходов хладагента [9], [10]. В табл. 1, 2 представлены теплотехнические характеристики испарителя и конденсатора, соответственно с учетом теплоты фазового перехода.

Таблица 1 – Теплотехнические характеристики испарителя теплового насоса

Тип ТА	$\alpha_{б.о.}$	$\alpha_{кв}$	$\alpha_{к}$	$\alpha_{д}$	$\alpha_{и}$	F, м <sup>2</sup>	F <sub>ст</sub> , м <sup>2</sup>
Испаритель	1690	3420	9405	715	5238	1,11	1,37

Таблица 2 – Теплотехнические характеристики конденсатора теплового насоса

Тип ТА	$\alpha_{конд}$	$\alpha_{пп}$	$\alpha_{к}$	F, м <sup>2</sup>	F <sub>ст</sub> , м <sup>2</sup>
Конденсатор	1415	189	1372	2,25	2,655

### Заключение

1. Для предприятия по производству полимерных материалов предложена схема холодоснабжения основными элементами, которой являются чиллер с драйкуллером. Предлагаемая система обеспечивает различные режимы холодоснабжения отдельных потребителей холода. При этом системы создания микроклимата обеспечивают требуемые параметры воздушной среды без дополнительного увлажнения приточного воздуха.

2. Установка дополнительного теплообменного устройства – драйкуллера на нагнетательной линии первого контура позволяет экономить до 35 % электрической энергии.

3. Расчет поверхностей нагрева парокомпрессионного теплового насоса с учетом теплоты фазового перехода позволяет сократить размеры тепломассообменных поверхностей соответственно, испарителя на 24 %, конденсатора – на 18 %.

4. Использование парокомпрессионного теплонасосного оборудования для нагрева воды, позволяет экономить до 40% электрической энергии по сравнению с традиционными схемами приготовления горячей воды, например, водяными котлами.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Малинина О. С. Технологии охлаждения в мировой экономике/ О. С. Малинина, А. В. Бараненко // Холодильная техника. – 2018. – №3. – С. 14–18.
2. Дошлыгин Н.А. Теплонасосные установки для утилизации низкопотенциальных энергоресурсов / Н.А. Дошлыгин, М.Ю.Ометова, Г.В. Рыбкина // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием (ПОЙСК - 2018) Ч. 2.: Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера. Иваново: ИВГПУ, 2018.– С.300–302
3. Дошлыгин Н.А. Совершенствование систем холодоснабжения предприятия по производству БОПП – пленки / Н.А. Дошлыгин, М.Ю. Ометова, Г.В. Рыбкина // Сборник Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОЙСК). 2019. Иваново: ИВГПУ, 2019.– С.164-165

4. Спасский А.А. Системы холодоснабжения искусственных ледовых катков/ А.А.Спасский, И.А. Спасский //Холодильная техника. – 2012. – №5. – С.31–33.
  5. СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 (с Изменением № 1) – М.: Стандартинформ, 2017 – 117 с.
  6. Ометова М.Ю. Утилизация низкопотенциального тепла от холодильных установок / М.Ю. Ометова, Г.В. Рыбкина, Н.А. Дошлыгин // Объектно-пространственное проектирование уникальных зданий и сооружений. К 100-летию строительного образования в Ивановской области и создания инженерно-строительного факультета Иваново-Вознесенского политехнического института: сборник материалов I научно-практического форума «SMARTBUILD».– Иваново: ИВГПУ, 2018. – 176-179 с.
  7. Малышев А.А. Исследования режимов течения двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах/ А.А. Малышев, А.С. Большакова, К.В. Киссер // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование – 2014 – № 3(16). – С. 61-70.
  8. Денисов-Винский Н. Д. Тепло компрессорных установок / Н. Д. Денисов-Винский // МегаПаскаль. 2011. № 2. С. 8–16.
  9. Малинина О.С. Гелиохолодильные абсорбционные бромистолитиевые машины для кондиционирования и получения воды / О. С. Малинина, А. В. Бараненко // Вестник Международной академии холода. № 4. 2015. С. 38–43.
  10. Шуршев В. Ф. Идентификация режимов течения двухфазных потоков холодильных агентов и их смесей с использованием фазовых диаграмм. / В. Ф. Шуршев, А. Н. Умеров // Вестник АГТУ. 2005 № 2 (25). С. 224–231.
- Список литературы на английском языке / References in English**
1. Malinina O. S. Tehnologii ohlagdenia v mirovoy ekonomike [Technologies cooling in the world economy] / O. S. Malinina, A.V. Baranenko // Holodilnaia tehnika [Refrigerating equipment]. – 2018. – № 3. – P. 14-18. [in Russian]
  2. Doshlygin N. A. Teplonasosnie ustanovki dla utilizatsii nizkopotentsialnykh energoresursov [Heat-Bearing installations for utilization of low-potential energy resources] / N. A. Doshlygin, M. Yu. Ometova, G. V. Rybkina //Sbornik materialov megvuzovskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii aspirantov i studentov s megdunarodnim uchastiem ( POISK –2018) P-2 Molodie uchenie – razvitiu tekstilno–promishlenogo klastira [Collection of materials of the interuniversity scientific and technical conference of postgraduates and students with international participation (SEARCH – 2018) Part 2: Young scientists – development of the textile and industrial cluster] 2018. Ivanovo: IVGPU, 2018.– P.300–302. [in Russian]
  3. Doshlygin N. A. Soverchenstvovanie system holodocnabgenia predpriatia po proizvodstvu BOPP – plenki [Improvement of cold supply systems for the production of BOPP films] / N. A. Doshlygin, M. Yu. Ometova, G. V. Rybkina // Sbornik molodie uchenie – razvitiy Nashionalnoi tehnologicheskoi inishiativi (POISK) [Collection of Young scientists-development of the National technological initiative (SEARCH). 2019]. Ivanovo: IVGPU, 2019. – P. 164 –165 . [in Russian].
  4. Spassky A. A. Sistemi holodocnabgenia iscustvennih ledovih katcov [Systems of cold supply of artificial ice rinks]/ A. A. Spassky, I. A. Spassky // Holodilnaia tehnika [Refrigerating equipment]. – 2012. – № 5. – P. 31–33. [in Russian]
  5. SP SP 60.13330.2016 Otoplenie, ventiliatsia i konditsionirovanie vozduha.Aktualizirovannaya redaktsiyaSNIP 41-01-2003 (s izmeneniyami № 1) [Heating, ventilation and air conditioning. Updated version of SNiP 41-01-2003 (with Change N 1)] – М.: Standartinform [Moscow: STANDARTINFORM], 2017 – 117 p. [in Russian]
  6. Ometova M. Yu. Utilizatsiya nizkopotentsialnogo tepla ot khodilnykh ustanovok [Utilization low-potential heat from refrigeration] / Ometova M. Yu., G. V. Rybkin, N. And. Doshlygina // Obyektivno-prostranstvennoe proektirovanie unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. K 100-letiyu stroitel'nogo obrazovaniya v Ivanovskoy oblasti i sozdaniya inzhenerno-stroitel'nogo fakulyteta/ Ivanova-Voznesenskogo politehnicheskogo instituta: sbornik materialov I nauchnogo prakticheskogo foruma «SMARTBUILD» [Object-spatial design of unique buildings and structures. To the 100th anniversary of construction education in the Ivanovo region and the creation of the faculty of civil engineering of the Ivanovo-Voznesensky Polytechnic Institute: collection of materials of the first scientific and practical forum "SMARTBUILD"].– Ivanovo: IVGPU, 2018. – 176-179 p. [in Russian]
  7. Malyshev A. A. Isledovania regimov techeniya dvuhfaznykh potocov hladogentov v gorizontalnykh trubah [Studies of flow regimes of two-phase refrigerant flows in horizontal pipes] / A. A. Malyshev, A. S. Bolshakova, K. V. kisser // Nauchnii gurnal NIU ITMO. Seria: Holodilnaia tehnika I kondishionirovanie [Scientific journal of NRU ITMO. Series: Refrigeration and air conditioning] – 2014 – № 3(16). – P. 61-70. [in Russian]
  8. Denisov-Vinsky N. D. Teplo kompresornykh ustanovok [Heat of compressor installations] / N. D. Denisov-Vinsky //MegaPaskaly [Megapascal]. 2011. No. 2. P. 8-16. [in Russian]
  9. Malinina O. S. Geliokholodilnye asorbtionnye bromistolitievye mashiny dlya konditsionirovaniya i polucheniya void [Helikopterinin lithium bromide absorption machine for air conditioning and get water] / O. S. Malinina, A.V. Baranenko // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii holoda [Bulletin of the International Academy of cold]. № 4. 2015. P. 38–43. [in Russian]
  10. Shurshev V. F. Identifikatsiya rezhimov techeniya dvuhfaznykh potocov khodilnykh agentov i ikh smesey s ispol'zovaniem fazovykh diagram [Identification of flow modes of two-phase flows of refrigerants and their mixtures using phase diagrams] / S. V. F. Shurshev, A. N. Umerov // VestnikAGTU [Bulletin AGTU]. 2005 № 2(25). P.224–231 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.018>**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ ИЗ СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ**

Научная статья

**Сафин Д.Р.<sup>1,\*</sup>, Белов Ю.А.<sup>2</sup>, Сафина А.Д.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2871-0808;<sup>1, 2, 3</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

\* Корреспондирующий автор (d.safin[at]list.ru)

**Аннотация**

Цель исследования – оценка деформативности слабого водонасыщенного глинистого основания, усиленного группой песчаных свай в виде сплошного свайного поля, при их совместном деформировании под нагрузкой. В существующих исследованиях рассматриваются взаимодействие отдельностоящих грунтовых свай с окружающим грунтом, методики их расчета, без учета совместной работы группы свай в деформируемом грунтовом массиве. Основные результаты исследований получены в виде новых экспериментальных данных работы группы песчаных свай при их совместном деформировании с массивом грунта из слабого водонасыщенного глинистого грунта под штампом. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что приведенные экспериментальные данные могут быть использованы при дальнейших теоретических исследованиях для разработки расчетной модели, позволяющей учесть особенности взаимодействия песчаных свай в свайном поле между собой и с окружающим грунтовым массивом, и представляют практическую ценность.

**Ключевые слова:** строительство, грунт, песчаная свая, слабый водонасыщенный глинистый грунт, армирование грунта, деформации, осадка.

**AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE SOFT CLAY SOIL FOUNDATIONS**

Research article

**Safin D.R.<sup>1,\*</sup>, Belov Yu.A.<sup>2</sup>, Safina A.D.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2871-0808;<sup>1, 2, 3</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

\* Corresponding author (d.safin[at]list.ru)

**Abstract**

The aim of the study is to assess the deformability of a soft water-saturated clay foundation reinforced by a group of sand piles in the form of a continuous pile field when they are jointly deformed under load. Existing studies consider the interaction of free-standing soil piles with the surrounding soil and the methods of their calculation without taking into account the joint work of a group of piles in a deformable soil mass. The main results of the research are obtained in the form of new experimental data on the work of a group of sand piles during their joint deformation with a soil mass of weak water-saturated clay soil under the stamp. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the experimental data can be used in further theoretical studies to develop a computational model that allows taking into account the aspects of the interaction of the sand piles in the pile field both with one another and with the surrounding soil mass, and are of practical value.

**Keywords:** construction, soil, sand pile, soft water-saturated clay soil, soil reinforcement, deformations, sediment.

**Введение**

Одним из эффективных методов улучшения строительных свойств оснований, сложенных из слабых водонасыщенных глинистых грунтов, является применение армирующих элементов в виде песчаных свай. С появлением современных материалов, появилась возможность дополнительно улучшить характеристики песчаных свай путем наружного цилиндрического армирования их геосинтетическим сетками или геосинтетическим нетканым материалом, что позволяет существенно снизить их поперечные деформации и, как следствие, уменьшить их вертикальные деформации. В тоже же время более медленно происходит процесс заиливания тела песчаных свай.

В настоящее время различными авторами проведены ряд научных экспериментальных и теоретических исследований по изучению деформативности и несущей способности песчаных свай. В исследованиях Тер-Мартirosяна З.Г., Тер-Мартirosяна А.З. [1], [2] рассмотрены основные методы улучшения свойств слабых глинистых грунтов при их поверхностном и глубинном уплотнении, отмечается, что в зависимости от технологии устройства свай существенно отличаются процессы уплотнения слабого глинистого основания. Приводятся решения задачи взаимодействия грунтовой сваи и фундаментной плиты с окружающим грунтовым цилиндром, опирающимся на несжимаемое основание по схеме «свая-стойка». Авторами получены замкнутые решения для определения напряжений в теле сваи и грунте под штампом.

В своей работе Новиков Ю.А. [3] на основании комплексных экспериментальных исследований в лабораторных и натурных условиях выявил эффективное соотношение диаметра песчаной сваи к её длине, выявил особенности напряженно деформированного состояния слабого глинистого основания ленточных фундаментов, усиленного армированными песчаными сваями по контуру.

В работах А. Б. Пономарева, Р. А. Усманова, Р. И. Шенкмана [4], [5] рассматривается технология улучшения слабого грунтового основания с использованием грунтовых свай из щебня в геосинтетической оболочке. Для изучения армированного основания были проведены лабораторные и полунатурные эксперименты, численное моделирование. В процессе полунатурных испытаний были рассмотрены несколько вариантов передачи нагрузок на армированное основание и технологии армирования. Авторы отмечают, что при нагружении армированного массива из грунтовых свай не удастся добиться существенного снижения осадок. Поэтому, на сегодняшний день хоть и имеются

разработанные методики определения осадок армированных свай, существует необходимость изучения осадок группы грунтовых свай, армирующих слабые водонасыщенные основания.

Результаты исследований в области применения песчаных свай, технологии их устройства и работы под нагрузками, деформации слабых водонасыщенных грунтов под статическими и циклическими нагрузками, данные по исследованию эффективности армирования грунта геосинтетическими материалами приведены так же в [6], [7]. Результаты численных исследований основания плитного фундамента из слабого глинистого грунта [8], [9] показали, что вертикальные деформации штампа, изгиб свай главным образом зависят от диаметра свай, их длины и шага. Хорошая эффективность армирования достигается при отношении длины свай к толщине слабого слоя грунта 0,75.

В упомянутых работах в основном рассматривается ячейка, состоящая из одиночной армированной песчаной сваи при совместном деформировании с окружающим грунтом в пределах ячейки. Однако под сплошными плитными фундаментами в различных зонах реализуются разные условия напряженно-деформированного состояния, и условия деформирования свай в зависимости от расположения будут существенно отличаться, что, несомненно, необходимо учитывать при определении осадок и несущей способности основания в целом. На сегодняшний день работа группы грунтовых свай, применяемых для улучшения слабого водонасыщенного глинистого основания, изучена недостаточно, и существует необходимость в разработки методик расчета осадок таких оснований, базирующихся на новых экспериментальных данных.

### Методы и принципы исследования

С целью изучения напряженно-деформированного состояния слабого глинистого основания под жестким штампом в лаборатории кафедры ОФДСиИГ КазГАСУ были проведены серии лабораторных исследований на маломасштабных грунтовых моделях. При моделировании применяли метод геометрического подобия, когда соблюдается постоянство в отношении всех сходственных размеров. Лоток стендовой установки имел внутренние размеры 500х500х500мм. В качестве грунта использовался суглинок нарушенной структуры, физико-механические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики грунта

Наименование показателей	Ед. изм.	Значение
Удельный вес	кН/м <sup>3</sup>	18,5-18,9
Заданная влажность	%	38
Число пластичности	%	16
Показатель текучести	д.ед.	0,93-0,96

Были изготовлены три серии образцов: 1 серия (2 образца) – естественное основание (образцы без усиления); 2 серия (3 образца) – усиление грунта песчаными сваями диаметром 25 мм длиной 200 мм, армированными геосинтетическим материалом по контуру; 3 серия (2 образца) – усиление грунта песчаными сваями диаметром 25 мм длиной 300 мм, армированными геосинтетическим материалом по контуру.

В образцах серии 2 нагрузка передается на армированный массив (через песчаную прослойку), а в образцах серии 3 нагрузка передается непосредственно на сваи. Шаг свай в плане принят 60 мм. Для устройства свай в массив погружалась труба с остроконечным пробойником внутри. После достижения заданной глубины пробойник извлекался, в трубу опускалась геосинтетическая ткань. Далее в полость трубы послойно загружался песок с раскаткой пробойником. В качестве материала для свай применялся песок крупный с влажностью  $W = 3\%$  с плотностью  $\rho = 1,9 \text{ г/см}^3$ . Плотность контролировалась по расходу песка для заполнения свай. Нагрузку на массив передавали через жесткий металлический штамп диаметром 160 мм. Величина предельной осадки штампа принята 100мм. Схемы испытаний приведены на рис.1.

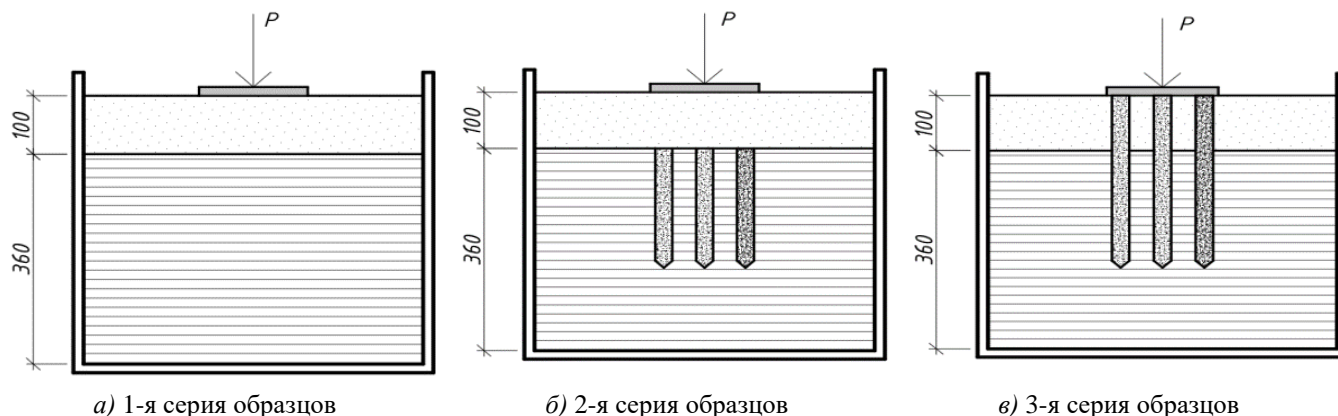


Рис. 1 – Схема грунтовых моделей

### Основные результаты

Результаты испытаний в виде графиков «осадка-давление» для трех серий экспериментов представлены на рис.2. Графики построены по осредненным значениям нескольких экспериментов в каждой серии.

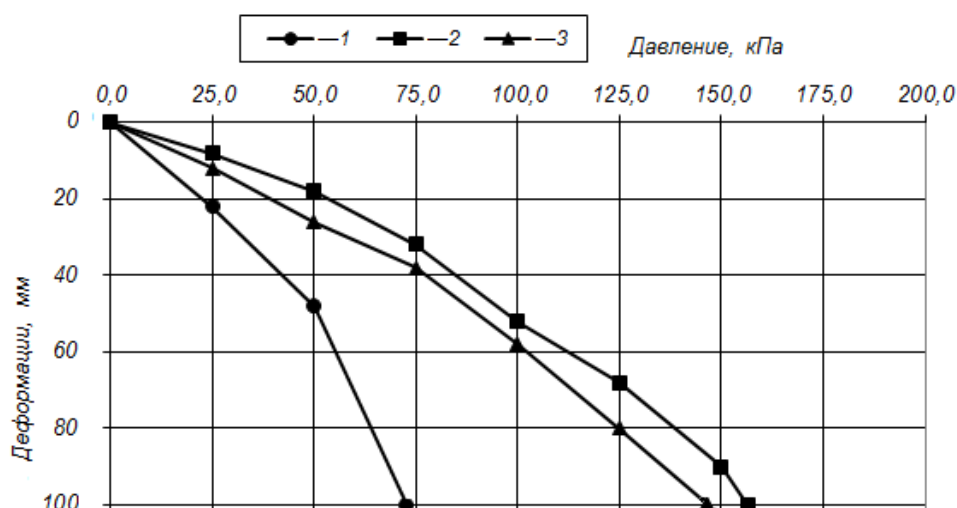


Рис. 2 – Вертикальные деформации штампа:  
1–грунтовый массив без усиления (1-я серия); 2– усиление грунта песчаными сваями длиной 200 мм (2-я серия); 3– усиление грунта песчаными сваями длиной 300 мм (3-я серия)

На основании изучения графиков осадки штампа в зависимости от давления графиков можно сделать следующие выводы:

а) при значении предварительно заданной предельно допустимой осадки штампа величиной в 10см, предельное давление составило:

- на основание без усиления – 73 кПа;
- на основание с усилением песчаными сваями длиной 200мм – 145 кПа;
- на основание с усилением песчаными сваями длиной 300мм – 156 кПа;

б) устройство песчаных свай в массиве слабого водонасыщенного глинистого грунта привело к увеличению предельной нагрузки до 2,1 раз.

в) в образцах 3-й серии песчаные сваи выполнены длиной 300 мм с устройством их через прослойку песчаного грунта непосредственно под подошвой штампа. Однако, в сравнении с образцами 2-й серии, где песчаные сваи выполнены длиной 200 мм только в пределах слабого слоя грунта, предельная нагрузка на основание возросла всего лишь на 7,5%, что говорит о неэффективности сопряжения песчаных свай непосредственно со штампом.

Результаты испытаний образцов 1-й серии на примере одного эксперимента представлены на рис.3

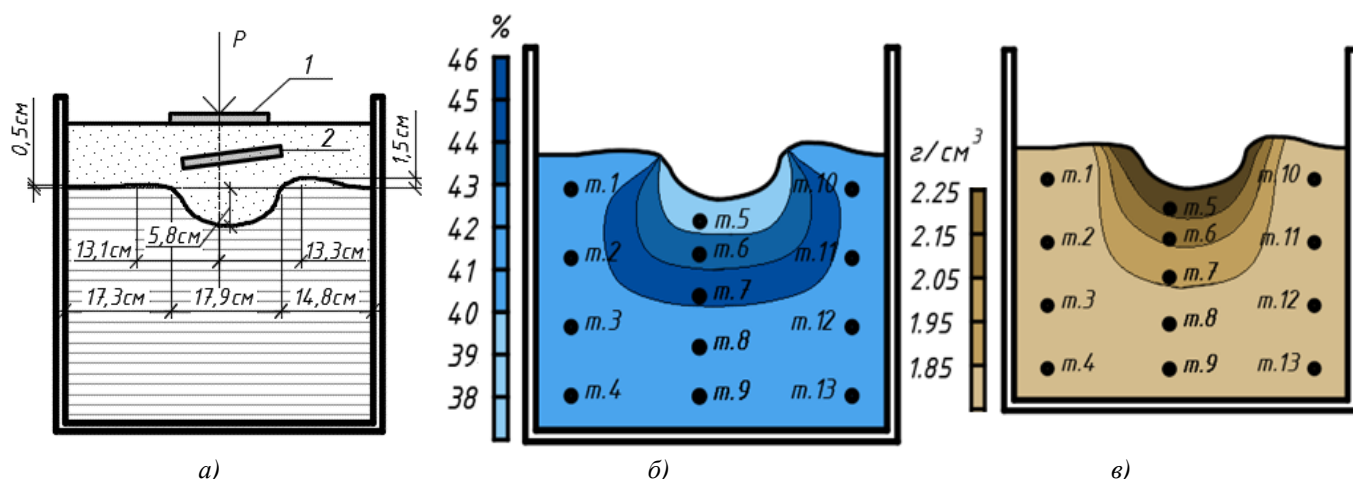


Рис. 3 – Результаты испытаний 1-й серии образцов: а) 1, 2 положение штампа до и после испытаний; б) влажность грунта в различных зонах массива после испытаний; в) плотность грунта в различных зонах массива после испытаний

Как видно из схемы (а), к концу испытаний наблюдается потеря устойчивости штампа, сопровождающийся небольшим выпором на поверхности величиной около 15 мм, что свидетельствует о достижении давления на основание своего предельного значения. К окончанию эксперимента под штампом формируется деформационное ядро уплотнения, о чем свидетельствуют контрольные измерения влажности и плотности в различных точках массива (схемы б и в). На поверхности слабого грунта наблюдается углубление величиной до 58 мм. Миграция воды происходит в направлении от деформационного ядра вниз и в стороны. Существенное изменение плотности массива и влажности распространяется на глубину до 1,5 диаметров штампа.



Результаты испытаний образцов 2-й и 3-й серий с армированием слабого основания песчаными сваями представлены на рис. 4 и 5.

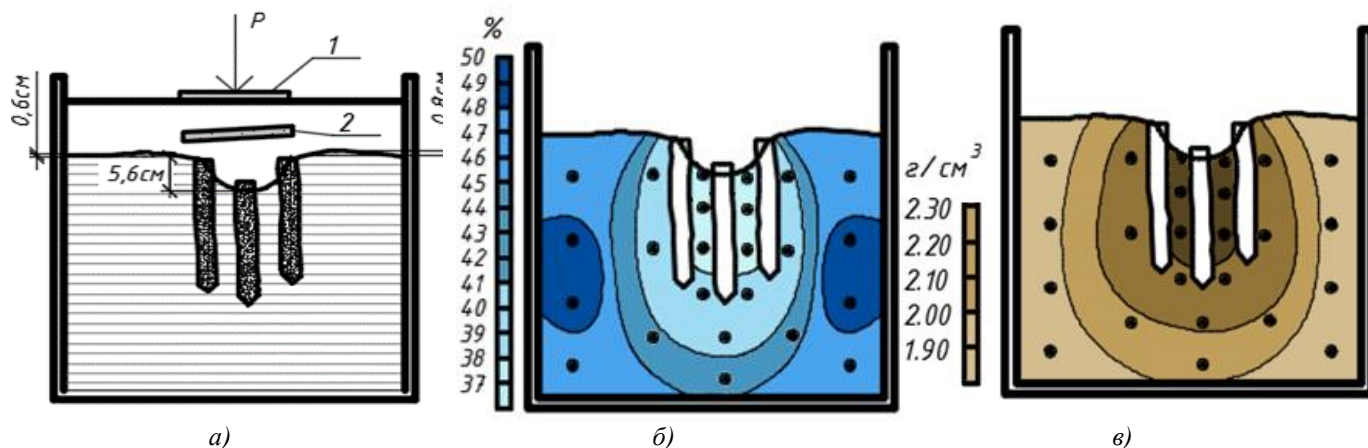


Рис. 4 – Результаты испытаний 2-й серии образцов: а) 1, 2 положение штампа до и после испытаний; б) влажность грунта в различных зонах массива после испытаний; в) плотность грунта в различных зонах массива после испытаний

Для образцов 2-й серии уплотненная зона грунта образуется практически в пределах всей длины песчаных свай. При этом за счет бокового давления грунта несколько увеличились расстояния между сваями, однако сваи практически сохранили свою вертикальность. Как видно на схемах рис.4, на поверхности грунта наблюдается углубление величиной до 5,6 см, поэтому вертикальные деформации средних свай в массиве слабого грунта существенно больше, примерно равные диаметру свай после расширения. Что свидетельствует о том, что нагрузка на сваи в пределах штампа передается не равномерно, средние сваи нагружены больше.

По сравнению с массивом грунта без армирования, глубина изменения плотности и влажности грунта существенно больше, практически равна мощности образца. Движение воды происходит в основном из центральной зоны в боковые зоны лотка, в горизонтальном направлении. В боковых частях лотка примерно на уровне низа свай находятся зоны с максимальным увеличением влажности образца.

В песчаных сваях также произошло существенное изменение влажности в большую сторону.

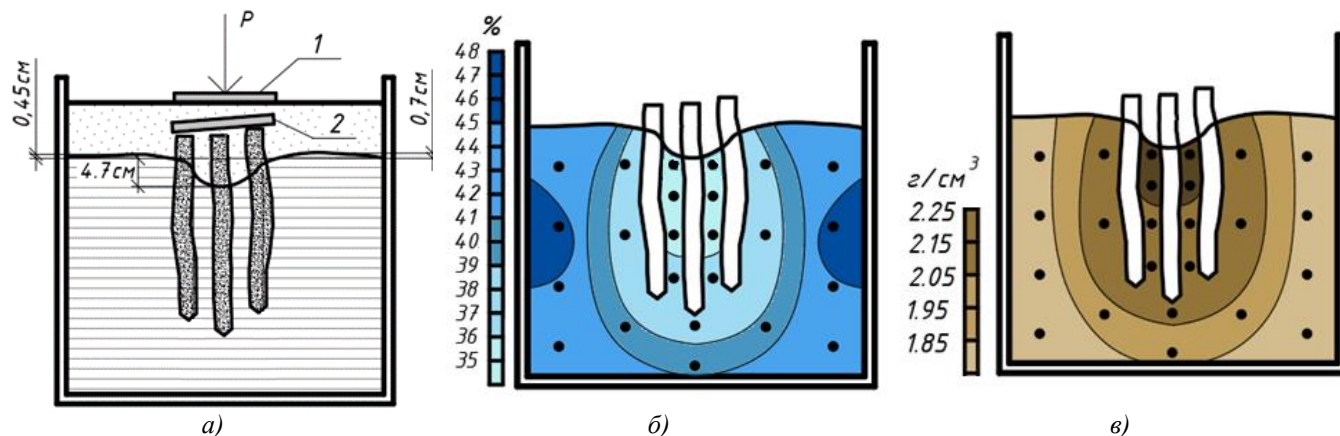


Рис. 5 – Результаты испытаний 3-й серии образцов: а) 1, 2 положение штампа до и после испытаний; б) влажность грунта в различных зонах массива после испытаний; в) плотность грунта в различных зонах массива после испытаний

Влажность в песчаных сваях после окончания эксперимента составила порядка 10% – 17% – 12% в верхней, средней и нижней зонах соответственно, при изначальной влажности песка в 3%. Указанное изменение влажности свидетельствует о том, что значительное количество влаги фильтруется в тело песчаных свай, как дренирующих элементов.

Для образцов 3-й серии наблюдается деформирование свай в горизонтальном направлении с изгибом, что свидетельствует о чрезмерной гибкости свай в связи с большим соотношением диаметра свай к длине. Как показали измерения плотности грунта после проведения эксперимента, уплотненная зона грунта для этой серии образовалась только в пределах верхней зоны песчаных свай. Поэтому, боковое расширение грунта в пределах уплотненной зоны привело к изгибу свай в горизонтальном направлении в стороны, а нижние зоны свай при этом сохраняли свою вертикальность. Однако, ввиду передачи нагрузки от штампа непосредственно на сваи, произошло существенное проскальзывание их в массиве. Для средних свай величина деформаций проскальзывания существенно больше, чем для крайних свай. Изгиб свай привел к существенному снижению их несущей способности, поэтому деформации штампа для 3-й серии незначительно отличаются от деформаций образцов 2 серии.

## Заключение

Предельная нагрузка при усилении массива из слабого водонасыщенного глинистого грунта песчаными сваями в геотекстильной оболочке возросла до 2,1 раза. Что подтверждает эффективность применения указанных свай и достаточно хорошо согласуется с натурными и численными экспериментальными данными других исследователей [10], [11], [12]. При изучении деформаций свай можно выделить, что средние сваи под штампом нагружены больше, что сопровождается увеличением их осадки по сравнению с крайними сваями. Крайние сваи полностью не могут включиться в работу, так как они испытывают одновременно вертикальные и горизонтальные деформации, в пределах образующегося ядра уплотнения под штампом происходит изгиб свай в направлении от штампа. При этом верхняя и нижняя зоны свай сохраняют свою вертикальность, хотя и наблюдается некоторое боковое смещение самих свай. Так же необходимо отметить, что при передаче нагрузки от штампа непосредственно на сваи, существенного увеличения несущей способности основания не происходит. Это приводит к проскальзыванию свай в массиве и увеличению осадки штампа в целом. В случае, когда давление от штампа на песчаные сваи передается через прослойку грунта с хорошими деформационно-прочностными характеристиками, происходит дополнительное боковое обжатие тела песчаных свай, что увеличивает их несущую способность и уменьшает осадку штампа. Указанное явление подробно описано также в [10, 11]. Несмотря на то, что армированные песчаные сваи достаточно эффективно улучшают деформативные характеристики основания из слабого водонасыщенного грунта, осадки достигают достаточно больших величин. Как указывают и другие исследователи, это вероятнее всего связано с тем, что определённые деформации происходят до момента включения в работу грунтовых свай.

## Конфликт интересов

Не указан.

## Conflict of Interest

None declared.

## Список литературы / References

1. Тер-Мартirosян А.З. Экспериментально-теоретические основы преобразования слабых водонасыщенных глинистых грунтов при поверхностном и глубинном уплотнении / А.З. Тер-Мартirosян, Тер-З.Г. Мартirosян // Инженерная геология, 2015, №4. – С.16-25.
2. Тер-Мартirosян А.З. Взаимодействие грунтовых свай с окружающим грунтом с учетом расширения диаметра свай / А.З. Тер-Мартirosян, Тер-З.Г. Мартirosян, В.В. Сидоров // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2016, №3. – С.10-15.
3. Новиков Ю.А. Исследование работы песчаных армированных по контуру свай в слабых глинистых основаниях под ленточными фундаментами / Ю.А. Новиков: дис... канд. техн. наук. Тюмень, 2015.
4. Полунатурные экспериментальные исследования грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов / Р. И. Шенкман, А. Б. Пономарев, Р. А. Усманов // Вестник гражданских инженеров. 2014, № 1(42) – С. 54-60.
5. Подходы к расчету осадок и технологии изготовления грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов / Р. И. Шенкман, А. Б. Пономарев, С. В. Пискотин // Вестник гражданских инженеров. 2015, № 6(53) – С. 127-133.
6. Хасанов Р. Р. Экспериментальные исследования деформативности водонасыщенных глинистых грунтов при циклических нагружениях / Р. Р. Хасанов, Р. Р. Гиниятуллин // Известия КГАСУ. – Казань: 2008, № 2 (10). – С. 85-89.
7. Хасанов Р. Р. Экспериментальные исследования физических характеристик предварительно обжатых глинистых грунтов при замачивании / Р. Р. Хасанов, А. Р. Смирнова // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург: 2017, №12 (66) – С. 178-182.
8. Сиразиев Л.Ф. Экспериментальные исследования влияния напластования различных грунтов на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания плитного фундамента / Л.Ф. Сиразиев, Д.Н. Сергеев // Известия КГАСУ. – 2017. – № 2 (40). – С. 153-159.
9. Сиразиев Л.Ф. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния слоистых грунтовых оснований под центром штампа при кратковременных испытаниях / Л.Ф. Сиразиев // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 11. – С. 225-228.
10. Сафин Д.Р. Экспериментальные исследования НДС слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными элементами / Д. Р. Сафин // Известия КГАСУ. – 2014. – № 4 (30). – С. 191-199.
11. Safin D. R. Experimental studies of a weak clay base reinforced with sand piles / D. R. Safin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 962 (2020) 032020 doi:10.1088/1757-899X/962/3/032020.
12. Elsaywy, M.B.D. Performance of Granular Piles-Improved Soft Ground Under Raft Foundation: A Numerical Study / M.B.D Elsaywy, & B. El-Garhy, // Int. J. of Geosynth. and Ground Eng. (2017) 3: 36.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Ter-Martirosyan A.Z. Jeksperimental'no-teoreticheskie osnovy preobrazovanija slabых vodonasysshennyh glinistyh gruntov pri poverhnostnom i glubinnom uplotnenii [Experimental and theoretical foundations of the transformation of weak water-saturated clay soils with surface and deep compaction] / A.Z. Ter-Martirosyan, Z.G. Ter-Martirosyan // Inzhenernaja geologija [Engineering Geology], 2015, No. 4. - pp. 16-25. [in Russian]
2. Ter-Martirosyan A.Z. Vzaimodejstvie gruntovyh svaj s okruzhajushhim gruntom s uchetom rasshirenija diametra svaj [The interaction of soil piles with surrounding soil, taking into account the expansion of the diameter of piles] / A.Z. Ter-Martirosyan, Z.G. Ter-Martirosyan, V.V. Sidorov // Osnovaniya, fundamente i mehanika gruntov [Foundations, foundations and soil mechanics], 2016, No. 3. - pp. 10-15. [in Russian]
3. Novikov Yu.A. Issledovanie raboty peschanyh armirovannyh po konturu svaj v slabых glinistyh osnovaniyah pod lentochnymi fundamentami [Investigation of the work of sand reinforced along the contour of piles in weak clay foundations under strip foundations] / Yu.A. Novikov: thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences. Tyumen, 2015. [in Russian]

4. Polunaturnye jeksperimental'nye issledovanija gruntovyh svaj v obolochke iz geosinteticheskikh materialov [Seminatural experimental studies of soil piles in a shell made of geosynthetic materials] / R.I. Schenkman, A.B. Ponomarev, R.A. Usmanov // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2014, No. 1 (42) - pp. 54-60. [in Russian]
5. Podhody k raschetu osadok i tehnologii izgotovlenija gruntovyh svaj v obolochke iz geosinteticheskikh materialov [Approaches to the calculation of the draft and manufacturing technology of soil piles in a shell made of geosynthetic materials] / R.I. Schenkman, A.B. Ponomarev, S.V. Piskotin // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2015, No. 6 (53) - pp. 127-133. [in Russian]
6. Khasanov R. R. Eksperimental'nye issledovanija deformativnosti vodonasyshennykh glinistykh gruntov pri ciklicheskih nagruzhenijah [Experimental studies of deformation of water-saturated clayey soils under cyclic loads] / R. R. Khasanov, R. R. Ghiniatullin // Izvestija KGASU [Izvestiya KGASU]. - Kazan: 2008, № 2 (10). – P. 85-89. [in Russian]
7. Khasanov R. R. Eksperimental'nye issledovanija fizicheskikh kharakteristik predvaritel'no obzhatykh glinistykh gruntov pri zamachivanii [Experimental studies of the physical characteristics of pre-compressed clay soils during soaking] / R. R. Khasanov, A. R. Smirnova // Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal [International Research Journal]. – Ekaterinburg: 2017, №12 (66) – P. 178-182. [in Russian]
8. Siraziev L.F. Jeksperimental'nye issledovanija vlijanija naplastovanija razli'nych gruntov na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie sloistogo gruntovogo osnovanija plitnogo fundamenta [Experimental studies of the influence of the bedding of various soils on the stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation] / L.F. Siraziev, D.N. Sergeev // Izvestiya KGASU. – 2017. – № 2 (40). – P. 153-159. [in Russian]
9. Siraziev L.F. Jeksperimental'nye issledovanija naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie sloistogich gruntovich osnovanii pod tsentrom chtampa pri kratkovremennich ispitaniyach [The stressed-stained state experimental researches of multilayered soilbases under the stamp center at short term tests] / L.F. Siraziev // Innovatsii i investitsii. – 2018. – № 11. – P. 225-228. [in Russian]
10. Safin D.R. Eksperimental'nye issledovanija NDS slabyyh vodonasyshennykh glinistykh gruntov, armirovannykh vertikalnymi elementami [Experimental studies intense-deformed condition vertically reinforced water-saturated argillir soil body] / Safin D. R. // Izvestiya KGASU. – 2014. – № 4 (30). – P. 191-199. [in Russian]
11. Safin D. R. Experimental studies of a weak clay base reinforced with sand piles / D. R. Safin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 962 (2020) 032020 doi:10.1088/1757-899X/962/3/032020.
12. Elsaywy, M.B.D. Performance of Granular Piles-Improved Soft Ground Under Raft Foundation: A Numerical Study / M.B.D Elsaywy, & B. El-Garhy // Int. J. of Geosynth. and Ground Eng. (2017) 3: 36.



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.019>**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНОВЫХ НОРМ ВРЕМЕНИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА**

Научная статья

**Сафронова Е.М.<sup>1,\*</sup>, Биченкова О.Ф.<sup>2</sup>, Черненькая Л.В.<sup>3</sup>**<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-9097-8402;<sup>1, 2, 3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (solncuivetr[at]gmail.com)

**Аннотация**

В статье приведено определение плановых норм времени выполнения партий операций при планировании производства. Обосновано внедрение предложенного подхода, разработан алгоритм расчета и место внедрения в планирование графика и расписания. Разработан и внедрен способ контроля выбора доступного интервала рабочего центра. Созданы условия проверки необходимости добавления дополнительного времени работы до самой операции и после. Апробация предложенного решения происходила на реальных данных в холдинге «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» в информационной системе 1С:MES Оперативное управление производством. Данный метод позволил улучшить качество построения графика производства.

**Ключевые слова:** 1С:MES Оперативное управление производством, график производства, расписание операций, планирование, производство.

**DISTRIBUTION OF TARGET TIME STANDARDS IN PRODUCTION PLANNING**

Research article

**Safronova E.M.<sup>1,\*</sup>, Bichenkova O.F.<sup>2</sup>, Chernenkaya L.V.<sup>3</sup>**<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-9097-8402;<sup>1, 2, 3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

\* Corresponding author (solncuivetr[at]gmail.com)

**Abstract**

The article describes the target standards of time of executing the batches of operations during production planning. The study justifies the implementation of the proposed approach and develops the calculation algorithm and the place of implementation in the planning of the schedule. In the paper, the authors demonstrate the development and implementation of a method for controlling the selection of the available interval of the work center and outline the conditions for checking the need to add additional work time before and after the operation. The proposed solution was tested on real data in the holding "LENPOLIGRAFMA" in the information system 1C: MES Operational production management (Operativnoye upravleniye proizvodstvom). This method has improved the quality of the production schedule.

**Keywords:** 1C: MES Operational production management, production schedule, scheduling of operations, planning, production.

**Введение**

Для корректного планирования операций в графике и расписании производства системы 1С:MES Оперативное управление производством, необходимо правильно рассчитать время выполнения операций, размещаемых на диаграмме.

КОИД – это количество одновременно изготавливаемых деталей. Например, рассмотрим операцию отрезки, после которой получается две детали, в этом случае КОИД будет равен 2. По умолчанию операция с количеством 1 равна 1 полуфабрикату / выпуску.

ЕН – это единица нормирования, корректирует штучное время выполнения операции.

Общее время выполнения операций, используемое при планировании производства, зависит от заданных норм времени, параметров КОИД и ЕН, а также от количества обрабатываемых деталей в рамках операций [1], [3], [4].

Данные параметры задаются для каждой технологической операции маршрутной карты. Также на основании маршрутной карты заполняются для операций в этапе производства.

Для каждой операции можно задать следующие нормы времени:

- время выполнения,
- подготовительно-заключительное время,
- время наладки.

При планировании необходимо корректно распределить подготовительно-заключительное время ( $t_{пз}$ ) и время наладки ( $t_n$ ) между партиями операции.

Если операция не разбивается на партии, то подготовительно-заключительное время и время наладки учитывается один раз [5], [6], [7].

Если операция разбивается на партии, то должны быть выполнены следующие условия:

1. Если на рабочем центре непрерывно выполняются партии одной операции, то подготовительно-заключительное и время наладки необходимо учитывать только на первой партии этой операции.

Если для партии операции не учитывается время наладки и подготовительно-заключительное время, то время выполнения этой партии рассчитывается из того, что  $t_{пз}$  и  $t_n$  равны нулю.

2. Если обработка партий операции разбивается выполнением другой операции на РЦ (рабочий центр), либо партии операции выполняются на разных РЦ, то время наладки и подготовительно-заключительное время необходимо учитывать для каждой партии [8].

Целью данной работы является улучшение качества расчета планового времени выполнения операции, предназначенного для алгоритма планирования производства.

### Материал и методы

Представленный алгоритм предназначен для дискретного типа производств. Апробация предложенного решения происходила на данных холдинга «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ», отрасль машиностроения. Алгоритм приведен на примере: слесарной, сверлильной, сварочной, сборочной, покрасочной, заготовительной, токарной, фрезерной, шлифовальной и т.д. операции.

### Время выполнения операции для планирования

Изначально в разрабатываемой системе время выполнения операции высчитывалось иначе. В графике производства КОИД сравнивался с количеством партии и в зависимости от результата либо учитывался при расчете времени выполнения, либо нет (1). Традиционно в системе используется коэффициент поправки КОИД = 0,49. Однако нет достаточного обоснования использования такого значения коэффициента.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{КОИД} = 0 \rightarrow T_{\text{оп}} = t_{\text{вып}} * \frac{N_{\text{п}}}{\text{ЕН}} \\ \text{КОИД} > N_{\text{п}} \rightarrow T_{\text{оп}} = t_{\text{вып}} \\ \text{КОИД} \leq N_{\text{п}} \rightarrow T_{\text{оп}} = t_{\text{вып}} * \frac{\left[ \frac{N_{\text{п}}}{\text{КОИД} + 0,49} \right]}{\text{ЕН}} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $T_{\text{оп}}$  – общее время выполнения операции, используемое при планировании;

$N_{\text{п}}$  – количество обрабатываемых деталей в партии;

КОИД – количество одновременно изготавливаемых деталей на операции;

ЕН – единица нормирования;

$t_{\text{вып}}$  – время выполнения операции, включающее штучное время обработки детали и смену деталей.

В таком случае получается, что время выполнения операции рассчитывается на неправильное количество деталей или количество вообще не рассматривается.

Далее в графике учитывается подготовительное и заключительное время. В данном алгоритме правильно установлено место, где должно добавляться время, и правильно определено условие. Если при выбранном рабочем центре установлен предыдущий интервал работы у данного оборудования, окончание предыдущего интервала равно началу подходящего интервала для планирования рассчитываемой партии, а предыдущая операция и подготовительное и заключительное время не учитываются, так как оборудование уже настроено на данную операцию. Во всех остальных случаях время на дополнительные работы добавляется.

Все время в расчетах переводится в секунды. Так как время на дополнительные работы не зависит от количества деталей по операции, оно вычисляется заранее при выборке данных для планирования. Формула является достаточно простой, состоит из слагаемых: время подготовительное и время заключительное (2). Каждое время перед сложением переводится в секунды, если в системе указан час, то время умножается на 3600, если минута – на 60.

$$t_{\text{пз}} = t_{\text{п}} * t_{\text{пед}} + t_{\text{з}} * t_{\text{зед}} \quad (2)$$

где  $t_{\text{п}}$  – подготовительное время операции;

$t_{\text{з}}$  – заключительное время операции;

$t_{\text{пед}}$  – число, позволяющее перевести время выполнения в секунды, если сутки – умножение на 86400, если час – 3600, если минута – 60;

$t_{\text{зед}}$  – число, позволяющее перевести время выполнения в секунды, если сутки – умножение на 86400, если час – 3600, если минута – 60;

$t_{\text{пз}}$  – подготовительно-заключительное время операции.

Расписание производства отличается от графика. Оно рассчитано на выбор оптимальной модели планирования, рассматривается каждый рабочий центр, рассчитывается на небольшой диапазон времени и, в отличие от графика, сразу при выборке данных рассчитывается время выполнения операции (3).

$$T_{\text{оп}} = (t_{\text{вып}} * (N_{\text{з}} - N_{\text{в}} - N_{\text{н}}) + t_{\text{п}} + t_{\text{з}}) * t_{\text{вед}} \quad (3)$$

где  $N_{\text{з}}$  – запланированное количество операций;

$N_{\text{в}}$  – выполненное количество операций;

$N_{\text{н}}$  – начатое количество операций;

$t_{\text{вед}}$  – число, позволяющее перевести время выполнения в секунды, если сутки – умножение на 86400, если час – 3600, если минута – 60.

Расчет опирается на регистр сведений, хранящий в себе информацию в упрощенном виде по технологической операции, а также информацию о выполнении операции. Как видно из формулы, поправка на КОИД не задействована. А подготовительное и заключительное время не приведено к секундам. Даже если в технологической операции дополнительное время указано в разных единицах измерения времени, отличных от штучного времени выполнения операции, то по формуле все грубо приводится к единице измерения штучного времени. Далее, если операция была

разделена на партии, то вычисленное время делится на общее количество деталей и умножается на размер партии, если партий не было, то при планировании учитывается все время (4). При размещении на рабочем центре время выполнения операции умножается на коэффициент времени работы рабочего центра и округляется (5).

$$\begin{cases} N = N_{\text{п}} \rightarrow T_{\text{оп}} \\ N \neq N_{\text{п}} \rightarrow T_{\text{оп}} = \frac{T_{\text{оп}}}{N} * N_{\text{п}} \end{cases} \quad (4)$$

где  $N$  – количество обрабатываемых деталей в операции;

$N_{\text{п}}$  – количество обрабатываемых деталей в партии.

$$T_{\text{оп}} = [T_{\text{оп}} * K_{t_e}] \quad (5)$$

где  $K_{t_e}$  – коэффициент времени работы оборудования.

В таком случае в расписании не учитывается дополнительное время при расчете выполнения партий в рамках операции на разных рабочих центрах. Подготовительное и заключительное время в сумме с временем работы умножается на коэффициент работы оборудования, что неправильно. Дополнительное время, по большей части, является временем работы сотрудника, а не оборудования.

#### Распределение плановых норм времени между технологическими операциями в графике

В рамках доработок алгоритма планирования было решено изменить расчет времени выполнения операций, сделать его более точным и гибким для партий [9], [10]. Для вычисления времени выполнения была предложена следующая формула (6).

$$T_{\text{оп}} = \left[ \frac{N_{\text{п}}}{\text{КОИД}} \right] * \frac{t_{\text{вып}} * t_{\text{вед}}}{\text{ЕН}} \quad (6)$$

Далее с помощью алгоритма определяется оборудование, на котором можно разместить интервал. Затем проверяется, есть ли у данного рабочего центра предыдущий занятый интервал, если окончание интервала равно началу выбранного интервала и операции равны между собой, то дополнительное время не добавляется, в противном случае добавляется не только подготовительное и заключительное время, но и время наладки. Формула расчета дополнительного времени (7).

$$t_{\text{пзн}} = t_{\text{п}} * t_{\text{пед}} + t_{\text{з}} * t_{\text{зед}} + t_{\text{н}} * t_{\text{нед}} \quad (7)$$

где  $t_{\text{пзн}}$  – подготовительно-заключительное время и время наладки операции;

$t_{\text{н}}$  – время наладки рабочего центра для выполнения операции;

$t_{\text{нед}}$  – число, позволяющее перевести время выполнения в секунды, если сутки – умножение на 86400, если час – 3600, если минута – 60.

#### Распределение плановых норм времени между технологическими операциями в расписании

В Расписании производства операция будет размещена длительностью, рассчитанной по формуле, так как дополнительного влияния на длительность (например, округление в час) не происходит.

Разработанный алгоритм расписания даже в схематичном виде выглядит довольно сложно (см. рисунок 1). Это обусловлено тем, что для планирования необходимо рассчитывать каждый вариант и среди них выбирать лучший.

- Цикл по вариантам расписания
    - Цикл по операциям из варианта
      - Цикл по количеству операции (партии)
        - Цикл по рабочим центрам (группа заменяемости)
          - Цикл по времени выполнения операции
            - Работа с поиском подходящих интервалов и заполнением результата поиска
            - Конец цикла по времени выполнения операции
            - Запись результата по РЦ с интервалами
        - Конец цикла по РЦ
        - Выбор лучшего варианта расположения интервала среди РЦ на партию операции
      - Запись варианта расписания
      - Конец цикла по количеству операции (партии)
    - Конец цикла по операции из варианта
  - Конец цикла варианта расписания
  - Выбор лучшего варианта расписания
- ➔ Запись в таблицу расписания и переход на следующий такт планирования по приоритету

Рис. 1 – Схема разработанного алгоритма планирования расписания

Задача состоит в том, чтобы не только исправить расчет времени выполнения, но и правильно разместить алгоритм вычисления в сложной структуре алгоритма планирования.

Таким образом можно сказать, что алгоритм вычисления времени должен располагаться в нескольких местах. Расчет времени выполнения самой операции должен происходить в момент определения оборудования для планирования. То есть уже после того, как определен размер партии, пройдены проверки по оборудованию (цикл по рабочим центрам). Используется такая же формула расчета времени операции, как и в графике (8), но без ЕН. В типовом функционале присутствует такой параметр как «Коэффициент работы оборудования». Этот параметр показывает, как работает оборудование. Поэтому было принято решение основную часть времени выполнения операции умножать на данный коэффициент (5), а подготовительное, заключительное время и время на наладку прибавлять в другом месте алгоритма. На данное время не должен влиять коэффициент работы оборудования, потому что подготовительное, заключительное время и время на наладку – по большей части являются временем работы исполнителя операции на оборудовании.

$$T_{\text{оп}} = \left[ \frac{N_{\text{п}}}{\text{КОИД}} \right] * t_{\text{вып}} * t_{\text{вед}} \quad (8)$$

Работа по поиску подходящих интервалов и заполнению результата поиска представляет собой три последовательные процедуры. Первая процедура позволяет определить возможный свободный интервал оборудования, вторая – позволяет разместить интервал, а третья процедура обеспечивает сохранение интервала, если получилось размещение. После каждой процедуры идет проверка на выполнение, если условие не выполняется, система переходит к новому поиску следующего доступного интервала.

В первой процедуре при поиске подходящего интервала было добавлено условие: проверка на возможность размещения хотя бы одной единицы партии (9).

$$t_{\text{ок}} - t_{\text{нач}} \geq 1 * t_{\text{вып}} * t_{\text{вед}} + (t_{\text{п}} * t_{\text{пед}} + t_{\text{з}} * t_{\text{зед}} + t_{\text{н}} * t_{\text{нед}}) \quad (9)$$

где  $t_{\text{ок}}$  – дата окончания найденного интервала;

$t_{\text{нач}}$  – дата начала найденного интервала.

Во второй процедуре была предусмотрена проверка на то, какой по счету интервал в рамках операции рассчитывается, какие предыдущие операции выполнялись на данном рабочем центре. Если в варианте расписания уже есть такой этап производства и партии этой операции, тогда проводится проверка на непрерывность операции. То есть, есть ли между партиями свободное время или же партии выполняются на разных рабочих центрах, если условия не выполняются, то дополнительное время на подготовку, наладку и завершение партии не добавляется. Если условие выполняется, то дополнительное время добавляется (10).

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{оп}} + t_{\text{пзн}} \quad (10)$$

Другими словами, если операции в варианте расписания нет, то проверяется, есть ли занятые под эту операцию интервалы на выбранном рабочем центре. Если таких интервалов нет или окончание предыдущего интервала и начало выбранного не равны, то добавляется дополнительное время (10). Если это первый вариант расписания, также идет проверка по интервалам выбранного рабочего центра. Так как алгоритм обеспечивает возможность полного расположения времени операции на интервалах выбранного оборудования, не имеет смысла делать большое количество проверок на совпадение. Если не удастся разместить всю партию операции на выбранном оборудовании, в системе подключается следующий подходящий рабочий центр. В случае, если рабочий центр всего один или ни один из вариантов не подошел, система выведет сообщение пользователю о возникшей проблеме, не учтет такую партию и соответственно всю операцию в расчете и перейдет к следующей операции из списка планируемых.

### Заключение

Таким образом, в системе IC:MES был доработан расчет времени выполнения операции и партии в графике и расписании производства. Добавлено дополнительное время. Разработан откорректированный алгоритм поиска подходящего интервала для размещения в расписании. Рассмотрено условие на добавление дополнительного времени к партии в зависимости от того, была ли это первая партия или нет, в случае, если партия не первая, определено, как связана с ней предыдущая партия или предыдущий интервал.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Teo C.C. Setting planned lead times for a make-to-order production system with master schedule smoothing / R. Bhatnagar, S. Graves // *Iie Transactions*. – 2011. – Vol. 43. – P. 399-414.
2. Baker K. Sequences rules and due date assignments in a job shop / K. Baker // *Management Science*. – 1984. – Vol. 30. – P. 349-360.
3. Holly, Sean M. Lean Manufacturing in a Semiconductor Environment: Use of Variation Analysis to Focus Continuous Improvement Efforts / Holly, Sean M.. - S.M. Thesis, Leaders for Manufacturing Program, MIT, Cambridge MA, 2006. – 58 p.
4. Ипатова М.И. Организация и планирование машиностроительного производства: Учебник / В.И. Постникова, М.Н. Захаровой. – М.: Высш. шк., 1988. – 367 с.
5. Hollywood J. Performance Evaluation and Optimization Models for Processing Networks with Queue-Dependent Processing Quantities / J.Hollywood . - Ph.D. Thesis Operations Research Center, MIT, Cambridge MA, 2000. – 253 p.
6. Ryan, Sarah M. Determining Inventory Levels in a CONWIP Controlled Job Shop / B. Baynat, F. Choobineh // *IE Transactions*. – 2000. - Vol. 32. – P. 105 – 114.
7. Сафронова Е.М. Проблема качества производственной логистики как проблема качества исходных данных в информационных системах / Е.М. Сафронова, О.Ф. Биченкова // *Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Сборник научных статей по итогам седьмой международной научной конференции*. - 2019. - С. 121-123.
8. Almeder, C. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? / C. Almeder, M. Preusser, R.F. Hartl // *OR Spektrum*. – 2009. – Vol. 31. – P. 95–119.
9. Bhaba R. Sarker Production Planning. / D. B. Webster, T. G. Ray // *Mechanical Engineers' Handbook: Manufacturing and Management*. – 2005. – Vol. 3. - P. 54 – 78.
10. Биченкова О.Ф. Оперативное управление дискретным производством при помощи полиномиального алгоритма / О.Ф. Биченкова, Л.Г. Потапова, Л. В. Черненькая // *Системный анализ в проектировании и управлении. сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*. - 2019. - С. 119-124.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Teo C.C. Setting planned lead times for a make-to-order production system with master schedule smoothing / R. Bhatnagar, S. Graves // *Iie Transactions*. – 2011. – Vol. 43. – P. 399-414.
2. Baker K. Sequences rules and due date assignments in a job shop / K. Baker // *Management Science*. – 1984. – Vol. 30. – P. 349-360.
3. Holly, Sean M. Lean Manufacturing in a Semiconductor Environment: Use of Variation Analysis to Focus Continuous Improvement Efforts / Holly, Sean M.. - S.M. Thesis, Leaders for Manufacturing Program, MIT, Cambridge MA, 2006. – 58 p.
4. Ipatova M.I. Organizacija i planirovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva: Uchebnik [Organization and planning of mechanical engineering production: Textbook] / M.I. Ipatova, V.I. Postnikova, M.N. Zakharova. – М.: Vysshaja shkola, 1988. – 367 p. [in Russian]
5. Hollywood J. Performance Evaluation and Optimization Models for Processing Networks with Queue-Dependent Processing Quantities. - Ph.D. Thesis Operations Research Center, MIT, Cambridge MA, 2000. – 253 p.
6. Ryan, Sarah M. Determining Inventory Levels in a CONWIP Controlled Job Shop / B. Baynat, F. Choobineh // *IE Transactions*. – 2000. - Vol. 32. – P. 105 – 114.
7. Safronova E.M. Problema kachestva proizvodstvennoj logistiki kak problema kachestva ishodnyh dannyh v informacionnyh sistemah [The problem of the quality of production logistics as a problem of the quality of initial data in information systems] / E.M. Safronova, O. F. Bichenkova // *Peredovye innovacionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovaniya, problemy vnedrenija v proizvodstvo. Sbornik nauchnyh statej po itogam sed'moj mezhdunarodnoj nauchnoj*

konferencii [Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production. Collection of scientific articles on the results of the seventh international scientific conference]. – 2019. – P. 121-123. [in Russian]

8. Almeder, C. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? / M. Preusser, R.F. Hartl // OR Spektrum. – 2009. – Vol. 31. – P. 95–119.

9. Bhaba R. Sarker Production Planning. / D. B. Webster, T. G. Ray // Mechanical Engineers' Handbook: Manufacturing and Management. – 2005. – Vol. 3. - P. 54 – 78.

10. Bichenkova O.F. Operativnoe upravlenie diskretnym proizvodstvom pri pomoshhi polinomial'nogo algoritma [Operational control of discrete production using a polynomial algorithm] / O.F. Bichenkova, L.G. Potapova, L.V. Chernenkaya // Sistemnyj analiz v proektirovanii i upravlenii. sbornik nauchnyh trudov XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet Petra Velikogo [System analysis in design and management. collection of scientific papers of the XXIII International Scientific and Practical Conference. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. – 2019. – P. 119-124. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.020>**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЭТАНОЛА НА СВОЙСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ**

Научная статья

**Сиппель И.Я.<sup>1,\*</sup>, Магдин К.А.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2635-2296;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-6679-6580;<sup>1,2</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Россия

\* Корреспондирующий автор (irina.sippel[at]yandex.ru)

**Аннотация**

В связи с ужесточением экологических требований к свойствам автомобильных топлив и необходимостью перехода к применению альтернативных топлив не нефтяного происхождения актуальным становится использование оксигенатов, из которых наиболее перспективными являются органические гидроксильные соединения и диалкиловые эфиры. Подробно исследованы добавки оксигенатов к бензинам и применение их в двигателях с искровым зажиганием, что связано с высокими октановыми числами спиртов и эфиров. В то же время использование их в дизельных топливах изучено недостаточно. В данной статье рассматривается получение топливно-спиртовых эмульсий на основе автомобильного дизельного топлива и этанола с содержанием спирта от 3 до 10 % об., в качестве стабилизатора применялся изопропанол. Исследовано влияние концентрации этанола на физико-химические свойства полученных этанола-топливных смесей.

**Ключевые слова:** оксигенат, автомобильное дизельное топливо, этанол, топливно-спиртовая эмульсия.

**EFFECT OF ETHANOL ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF AUTOMOTIVE DIESEL FUELS**

Research article

**Sippel I.Ya.<sup>1,\*</sup>, Magdin K.A.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2635-2296;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-6679-6580;<sup>1,2</sup> Kazan Federal University, Kazan, Russia

\* Corresponding author (irina.sippel[at]yandex.ru)

**Abstract**

With environmental requirements for the properties of automobile fuels become stricter along with the necessity to transition to the use of alternative fuels of non-oil origin, the use of oxygenates is becoming more relevant. Out of oxygenates, organic hydroxyl compounds and dialkyl esters are the most promising. The study explores in detail the additives of oxygenates to gasoline and their use in spark-ignition engines, which is associated with high octane numbers of alcohols and esters. At the same time, their use in diesel fuels has not been sufficiently studied. This article discusses the preparation of fuel-alcohol emulsions based on automotive diesel fuel and ethanol with an alcohol content of 3 to 10% vol., isopropanol was used as a stabilizer. The study conducts an analysis of the effect of ethanol concentration on the physicochemical properties of the resulting ethanol-fuel mixtures.

**Keywords:** oxygenate, automobile diesel fuel, ethanol, fuel-alcohol emulsion.

Автомобильный транспорт является одним из главных загрязнителей атмосферного воздуха городов. Так, в городе Набережные Челны на автомобильный транспорт приходится более 62 % от общего объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, что составляет 37,4 тыс. т в год. В среднем автомобильным транспортом выбрасывается примерно по 74 кг загрязняющих веществ на каждого жителя нашего города, в то время как выбросы промышленных предприятий примерно вдвое меньше [1]. При этом более опасным является транспорт предприятий, парк личного автотранспорта обновляется регулярно и меньше загрязняет окружающую среду.

Одним из способов уменьшения вредного воздействия автотранспорта на окружающую среду, наряду с поиском оптимальных конструкторских решений, является применение экологически чистых топлив и масел. В настоящее время ежегодное потребление автомобильных бензинов в нашей стране превысило 40 млн. т, дизельных топлив – 78 млн. т, и рост производства и потребления автомобильных топлив в обозримом будущем будет продолжаться [2], поэтому улучшение их свойств является приоритетной задачей. Для совершенствования экологических свойств автомобильных топлив в мировой химмотологической практике, наряду с другими методами, используются оксигенаты – высокооктановые синтетические добавки, вырабатываемые из альтернативного сырья. Введение оксигенатов увеличивает полноту сгорания углеводородов топлива и уменьшает токсичность отработавших газов. В частности, оксигенаты позволяют уменьшить стехиометрическое соотношение топлива и воздуха в зоне сгорания, что приводит к уменьшению образования оксида углерода (II) и суммарных углеводородов. Однако применение оксигенатов в избыточных количествах может привести к ухудшению мощностных и экономических характеристик двигателя, а также к несовместимости их с материалами топливной системы автомобиля. Введение оксигенатов более актуально для бензинов, так как повышает их детонационную стойкость [3], [6], [7]. В качестве оксигенатов могут применяться диалкиловые эфиры: метил-трет-бутиловый (МТБЭ), этил-трет-бутиловый (ЭТБЭ), диизопропиловый (ДИИПЭ), – а также моноспирты с температурой кипения, соответствующей фракционному составу бензинов: этанол, изо-пропанол, трет-бутанол. Применение метанола, который привлекает внимание исследователей своей обширной сырьевой базой, ограничивается его высокой токсичностью, летучестью, гигроскопичностью. Одним из наиболее распространенных оксигенатов является этанол, в настоящее время все ведущие автомобилестроительные фирмы допускают применение в своих двигателях бензинов с содержанием этанола до 10%. В то же время добавки оксигенатов к дизельным топливам изучены недостаточно, что связано, прежде всего, с низкими цетановыми числами этих соединений. Изучалось влияние

добавок некоторых гидроксильных соединений и диалкиловых эфиров на токсичность отработавших газов дизельных двигателей и выбросы суммарных углеводородов, оксида углерода (II), сажи [8], [10], [11].

В данной работе исследованы физико-химические свойства эмульсий на основе автомобильного дизельного топлива и этанола. В качестве исходного было взято товарное дизельное топливо сорта Е с величиной предельной температуры фильтруемости  $t_f$  = минус 15 °С. Путем интенсивного механического перемешивания были приготовлены смеси указанного топлива с этанолом, в которых содержание кислорода составляло от 3 до 10 % об. Для повышения устойчивости полученных эмульсий использовались добавки изопропанола в количестве 1 % об. Смеси с более высокой концентрацией этанола оказались нестабильными в условиях эксперимента, и их свойства не изучались.

Было исследовано влияние содержания этанола на основные физико-химические свойства полученных эмульсий. Процессы распыла и смесеобразования в дизельном двигателе зависят в значительной степени от вязкости и плотности топлива. В соответствии с требованиями стандарта [12], плотность при 15 °С должна находиться в пределах 820-845 кг/м<sup>3</sup>, и уменьшение её ниже минимального значения, установленного стандартом, может вызвать искажение геометрии факела распыла и негативно сказаться на процессах смесеобразования и сгорания. Плотность топлива и топливно-спиртовых смесей была определена пикнометрическим методом после длительного термостатирования при указанной температуре. Показано, что повышение содержания этанола в топливных эмульсиях от 3 до 10 % об. приводит к снижению плотности, но в допустимых пределах (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Характеристики топливно-этанольных эмульсий

Образец	Вязкость кинематическая, при 40°С, мм <sup>2</sup> /с,	Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	Плотность в градусах API	Цетановое число
ДТ товарное	2,65	831	38,8	51,0
ДТ + 3% этанола	2,59	830	39,0	49,8
ДТ + 5% этанола	2,54	829	39,2	48,9
ДТ + 7% этанола	2,48	828	39,4	48,1
ДТ + 10% этанола	2,39	826	39,8	46,9

Плотность в градусах API (American Petroleum Institute), специальная функция относительной плотности, определялась при температуре 15 °С (60 °F) и рассчитывалась по формуле:

$$\text{Плотность в градусах API} = \frac{141,5}{\text{удельный вес, } 60^{\circ}\text{F}} - 131,5 \quad (1)$$

Максимальное значение плотности, равное 39,8 °API, имеет топливно-спиртовая эмульсия с содержанием этанола 10% об.

Одной из важнейших характеристик дизельного топлива, в значительной степени определяющей возможности его практического использования, является вязкость, а также её зависимость от температуры. Кинематическая вязкость исходного дизельного топлива и полученных на его основе этанолосодержащих эмульсий была определена капиллярным вискозиметром после термостатирования при 40 °С. По стандарту [12] и EN 590 диапазон изменения кинематической вязкости дизельных топлив при 40 °С составляет 2,00-4,50 мм<sup>2</sup>/с. Значительное уменьшение вязкости приводит к увеличению просачивания топлива через форсунки и плунжерные пары, ухудшению смазывающих свойств и возрастанию износа, изменению геометрии факела распыла и формированию укороченного факела, ухудшению смесеобразования и сгорания. При заметном увеличении вязкости ухудшается прокачиваемость топлива, особенно в условиях зимней эксплуатации, формируется грубый распыл, что так же приводит к ухудшению смесеобразованию и уменьшению полноты сгорания топлива. Введение этанола в испытуемое дизельное топливо приводит к некоторому понижению кинематической вязкости топливно-спиртовых эмульсий, минимальное значение имеет композиция, содержащая 10% кислорода (см. таблицу 1). Полученные значения вязкости соответствуют требованиям стандарта, и введение этанола не приведет к ухудшению вязкостных и смазывающих свойств топливно-спиртовых смесей.

Так как в ДВС с воспламенением от сжатия полнота сгорания и, следовательно, экологические характеристики топлива, зависят в значительной степени от его самовоспламеняемости, было исследовано влияние добавок этанола на цетановое число и дизельный индекс. Цетановое число товарного дизельного топлива определялось расчетным методом на основании эмпирических характеристик топлива, цетановые числа этаноло-топливных эмульсий определялись расчетным методом [13]. Результаты представлены в таблице. Уменьшение ЦЧ ниже 40 приводит к жесткой работе двигателя, нарушению процессов смесеобразования и сгорания, увеличению выбросов вредных веществ с отработавшими газами, поэтому недопустимо. Для всех рассмотренных топливно-спиртовых смесей ЦЧ превышает 46. Повысить ЦЧ можно путем введения присадок, уменьшающих период задержки воспламенения, к которым относятся, например, органические производные азотной кислоты, диалкиловые эфиры.

График зависимости величины дизельного индекса от объемной доли этанола кислорода в топливно-этанольных смесях представлен на рисунке 1.



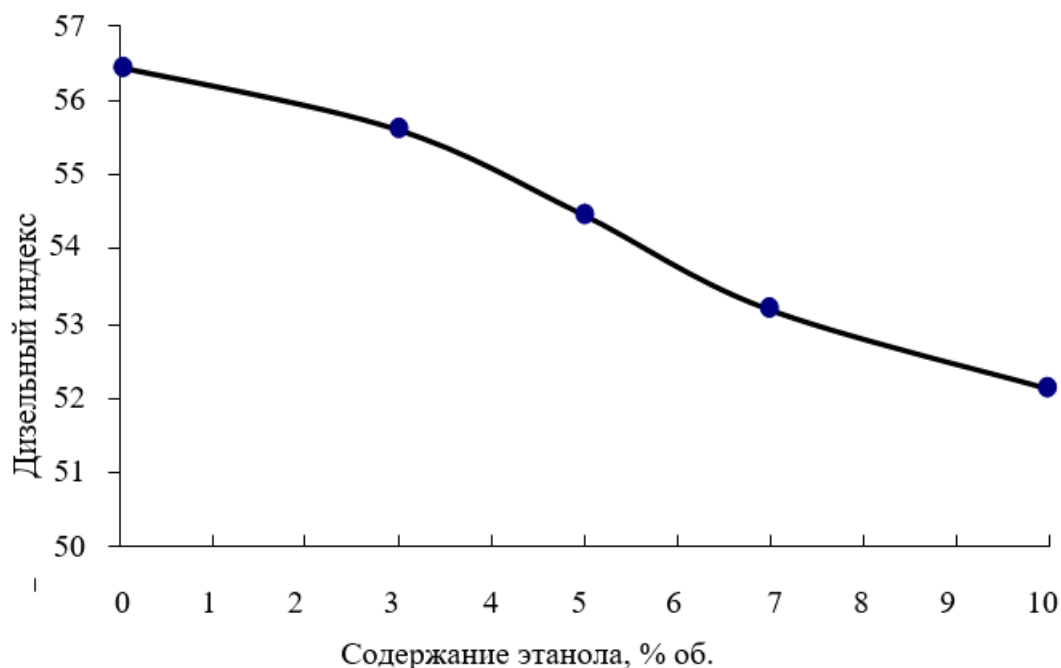


Рис. 1 – Зависимость дизельного индекса этанола-топливных эмульсий от содержания этанола

Величина дизельного индекса для всех образцов составляет не менее 52.

#### Заключение

Методом интенсивного механического перемешивания были получены эмульсии на основе товарного автомобильного дизельного топлива сорта Е, содержащие от 1 до 10 % об. этанола.

Были исследованы влияние концентрации этанола на физико-химические свойства полученных этанола-топливных смесей. Показано, что при введении этанола уменьшаются кинематическая вязкость, плотность, топливных композиций, в допустимых пределах уменьшаются также цетановое число и дизельный индекс. Снижение указанных показателей находится в соответствии с требованиями стандарта на автомобильное дизельное топливо и не окажет заметного влияния на процессы распыла и смесеобразования. Применение этанола в качестве оксигентаной добавки к дизельному топливу обеспечит экономию природной нефти и внедрение альтернативных автомобильных топлив из возобновляемого сырья.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды в Республики Татарстан в 2019 г. [Электронный ресурс] – URL: <http://eco.tatarstan.ru> (дата обращения 09.12.2020).
2. IEA. World Energy Outlook 2019. Paris: International Energy Agency
3. Опарина Л.А. Оксигенатные добавки к топливу на основе возобновляемого сырья / Л.А. Опарина, Н.А. Колыванова, Н.К. Гусарова, В.Н. Сапрыгина // Известия вузов. Прикладная биотехнология. – 2018. – Т. 8. – №1. – С. 19–33.
4. Жмаева Е.В. Исследование влияния добавок этанола и условий хранения на свойства автомобильных бензинов / Е.В. Жмаева, С.А. Антонов, С.В. Заглядова // Башкирский химический журнал. – 2018. – Т. 25. – №4. – С. 85–93.
5. Niven R. K. Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article / R. K. Niven // Renewable and Sustainable Energy Reviews– 2005. – vol .9 – P. 535–555.
6. Карпов С.А. Алифатические как компоненты топлив для двигателей внутреннего сгорания / С.А. Карпов // Химия и технология топлив и масел. – 2008. – №4. – С. 31–35.
7. Карпов С.А. Этанол как высокооктановый экологически чистый компонент автомобильных топлив / С.А. Карпов // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – №5. – С. 3–7.
8. Sendilvelan S. Effect of butanol-diesel blends in a compression ignition engine to reduce emission / Sendilvelan S. and Rajan K. // Rasayan Journal of Chemistry (India). – 2017. – vol .10 (1) – P. 190–194.
9. Abbasov A.R. N-butanol based emulsified diesel fuel production / A.R. Abbasov // Chemical problems. – 2020. – №1 (18) – P. 68–74.
10. Nivesh-Vijayan Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled With Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends // International Journal of Science and Research – 2014. – vol .3 (10) – P. 2435–2452.
11. Марков В.А. Спиртовые топлива для дизельных двигателей / В.А. Марков, П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.В. Бирюков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – №11. – С. 39–52.
12. ГОСТ 32511 (EN 590:2009) Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия.
13. ASTM D976-06 Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii prirodnih resursov i ob ohrane okruzhayushchej sredy v Respublike Tatarstan v 2019 g [State report on the state of natural resources and environmental protection in the Republic of Tatarstan in 2019] [Electronic resource] - URL: <http://eco.tatarstan.ru> (accessed 09.12.2020). [in Russian]
2. IEA. World Energy Outlook 2019. Paris: International Energy Agency
3. Oparina L. A. Oksigenatnye dobavki k toplivu na osnove vozobnovlyаемого syr'ya [Oxygenate additives to fuel based on renewable raw materials] / L. A. Oparina, N. A. Kolyvanova, N. K. Gusarova, V. N. Saprygina // Izvestiya vuzov. Prikladnaya biotekhnologiya [Izvestiya vuzov. Applied biotechnology]. - 2018. - Vol. 8. - No. 1. -pp. 19-33. [in Russian]
4. Imaeva E. V. Issledovanie vliyaniya dobavok etanola i uslovij hraneniya na svoystva avtomobil'nyh benzinov [study of the influence of ethanol additives and storage conditions on the properties of motor gasoline] / EV Imaeva, S. A. Antonov, S. V. Zaglyadova // Bashkirskij himicheskij zhurnal [Bashkir chemical journal]. - 2018. - Vol. 25. - No. 4. - P. 85-93. [in Russian]
5. Niven R. K. Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article / R. K. Niven // Renewable and Sustainable Energy Reviews- 2005. - vol .9-P. 535-555.
6. Karpov S. A. Alifaticheskie kak komponenty topliv dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Aliphatic as components of fuels for internal combustion engines] / S. A. Karpov // Himiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and technology of fuels and oils]. - 2008. - No. 4. - pp. 31-35. [in Russian]
7. Karpov, S. A., Etanol kak vysokooktanovyy ekologicheskij chistyy komponent avtomobil'nyh topliv [Ethanol as high-octane environmentally clean component of automotive fuels] / Karpov S. A. // Himiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and technology of fuels and oils]. - 2007. - No. 5. - P. 3-7. [in Russian]
8. Sendilvelan S. Effect of butanol-diesel blends in a compression ignition engine to reduce emission / Sendilvelan S. and Rajan, K. // Journal of Chemistry Rasayan (India). - 2017. - vol .10 (1) - P. 190-194.
9. Abbasov A.R. N-butanol based emulsified diesel fuel production / A.R. Abbasov // Chemical problems. - 2020. - №1 (18) - P. 68-74.
10. Nivesh-Vijayan Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled With Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends // International Journal of Science and Research - 2014. - vol .3 (10) - P. 2435-2452.
11. Markov V. A. Spirtovye topliva dlya dizel'nyh dvigatelej [Alcohol fuels for diesel engines] / V. A. Markov, P. R. Vallejo Maldonado, V. V. Biryukov // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mechanical engineering]. - 2015. - No. 11. - pp. 39-52. [in Russian]
12. GOST 32511 (EN 590:2009) Toplivo dizel'noe EVRO. Tekhnicheskie usloviya [GOST 32511 (EN 590: 2009) EURO diesel fuel. Technical conditions]. [in Russian]
13. ASTM D976-06 Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.021>**ИЗУЧЕНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КРИСТАЛЛИТОВ В ПОЛИКРИСТАЛЛАХ  
С ГПУ-СТРУКТУРОЙ**

Научная статья

**Степаненко А.В.\***

ORCID: 0000-0001-7804-8918,

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

\* Корреспондирующий автор (avstep[at]mail.ru)

**Аннотация**

Кристаллографическая текстура оказывает определяет анизотропию физических свойств металлов и сплавов. На практике распространен метод расчета анизотропии физических свойств поликристаллов, основанный на использовании функции распределения ориентировок кристаллитов. Основной математический метод получения функции распределения ориентировок кристаллитов связан с разложением функции распределения в ряд по обобщенным шаровым функциям и с разложением полюсных фигур в ряд по сферическим функциям (метод Роу-Бунге). Однако, функция распределения по ориентировкам кристаллитов принципиально не может быть однозначно определена по полюсным фигурам. Предложен простой способ получения  $f(\theta)$  функции углового распределения кристаллитов по ориентировкам в поликристаллах, которые имеют текстуру базисного типа. Базисная текстура приводит к изотропии свойств в плоскости прокатки металлов с ГПУ-структурой. Поэтому представляет интерес угловое распределение кристаллитов  $f(\theta)$  относительно нормали к плоскости прокатки (распределение по полярному углу  $\theta$ ). Функция распределения кристаллитов  $f(\theta)$  может быть использована для расчетов анизотропных физических свойств поликристалла.

**Ключевые слова:** поликристаллы, текстура, анизотропия, структура, деформация, редкоземельные металлы, рентгеновский анализ, дифракция.

**A STUDY OF ANGULAR DISTRIBUTIONS OF CRYSTALLITES IN POLYCRYSTALS  
WITH HCP-STRUCTURE**

Research article

**Stepanenko A.V.\***

ORCID: 0000-0001-7804-8918,

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

\* Corresponding author (avstep[at]mail.ru)

**Abstract**

The crystallographic texture determines the anisotropy of the physical properties of metals and alloys. In practice, a widespread method for calculating the anisotropy of the physical properties of polycrystals, based on the use of the distribution function of crystallite orientations. The main mathematical method for obtaining the distribution function of crystallite orientations is associated with the expansion of the distribution function in a series in generalized spherical functions and with the expansion of pole figures in a series in spherical functions (the Roe-Bunge method). However, the distribution function by crystallite orientations, in principle, cannot be unambiguously determined from the pole figures. A simple method is proposed for obtaining  $f(\theta)$  of the angular distribution function of crystallites over orientations in polycrystals with a basic texture. The basic texture leads to isotropy of properties in the rolling plane of metals with an hcp structure. Therefore, the angular distribution of crystallites  $f(\theta)$  relative to the normal to the rolling plane (distribution over the polar angle  $\theta$ ) is of interest. The crystallite distribution function  $f(\theta)$  can be used to calculate the anisotropic physical properties of a polycrystal.

**Keywords:** polycrystals, texture, anisotropy, structure, deformation, rare-earth metals, X-ray analysis, diffraction.

**Introduction**

The crystallographic texture has a decisive effect on the level of anisotropy of physical and mechanical properties (magnetic susceptibility, electrical resistance, etc.) of polycrystalline metals and alloys [1], [2]. Taking into account the anisotropy of physical and mechanical properties makes it possible to reduce the metal consumption and hang the level of service properties of industrial materials [3].

The texture is capable of forming with any thermomechanical methods of processing materials, while its type and degree of intensity significantly depend on the purity of the samples used, depends on the previous state of the material [4]. X-ray texture studies are the most common methods used in factory laboratories. Such methods are more accessible than neutron diffraction, and more informative than ultrasonic and metallographic methods [5], [6].

In practice, various methods are used for calculating the properties of metals based on texture data [3], [7], [10]. There are methods for calculating the anisotropic properties of polycrystalline materials based on the determination of experimental texture macro-parameters (calculation of the orientation factors  $\Delta_i$  [3], [7]). Such methods make it possible to evaluate the anisotropy of the physical and mechanical properties of metal samples, but do not provide accurate information on the distribution of crystallite orientations and their relationship with the anisotropy of the physical properties of the material.

The calculation of the anisotropic properties of polycrystals can be performed on the basis of the experimental distribution function of crystallite orientations (ODF). This method was proposed by Viglin [1] and then developed by Roe [12] and Bunge [13], [14]. In the Roe-Bunge method, it was proposed to calculate the distribution function of crystallite orientations based on the expansion of the distribution function in a series in generalized spherical functions and on the expansion of pole figures in a series in spherical functions.

The distribution function of crystallite orientations cannot be obtained as a result of direct measurement [15]. Only pole figures can be measured. Therefore, the main task of quantitative texture analysis is the problem of calculating the distribution function of crystallites by orientation based on a finite number of experimental pole figures.

### Methods and materials

This paper presents a method for determining the angular distribution of crystallites in polycrystals, based on the use of experimental data of X-ray texture analysis. The texture of the metal sample was investigated on a DRON-0.5 X-ray diffractometer by the method of reverse pole figures [6]. Figure 1 shows the positions of the crystallographic orientations on the reverse pole figure for hcp metals.

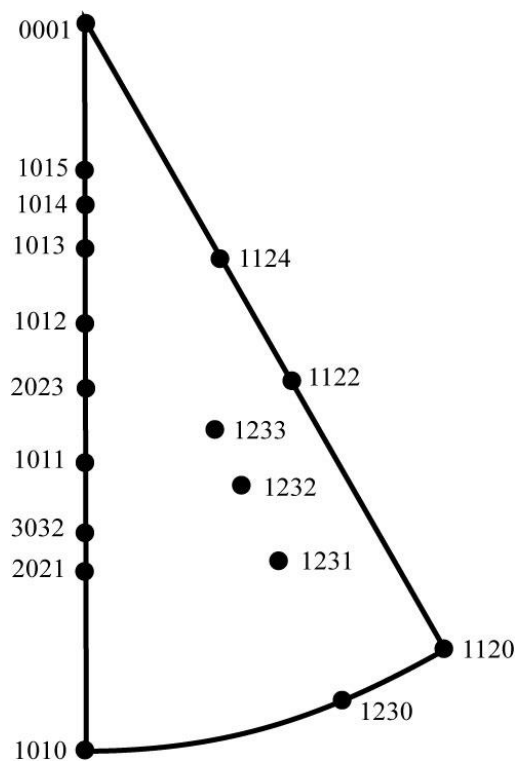


Fig. 1 – Pole distribution on a reverse pole figure

The pole densities  $P_{hkl}$  on the stereographic triangle were determined using the Morris method:

$$P_{hkl} = \frac{\frac{I_{hkl}}{I_{hkl}^{st}}}{\sum_{\Delta} A_{hkl} \cdot \frac{I_{hkl}}{I_{hkl}^{st}}},$$

where  $I_{hkl}$  – integrated intensity of X-ray reflection for the  $\{hkl\}$  orientation of crystallites of the sample under study,  $I_{hkl}^{st}$  – integrated intensity of X-ray reflection for the  $\{hkl\}$  orientation of the crystallites of the standard sample,  $A_{hkl}$  – Morris coefficients.

For the majority of metals with an hcp structure, 17 crystallographic orientations are studied to construct reverse pole figures.

The calculation of crystallite fractions was carried out for the case of sharp textures, taking into account the Morris coefficients and the repeatability factor:

$$F_{hkl} = \frac{M_{hkl} \cdot \frac{I_{hkl}}{I_{hkl}^{st}}}{\sum_n M_{hkl} \cdot \sum_{\Delta} \frac{I_{hkl}}{I_{hkl}^{st}}},$$

where  $F_{hkl}$  – fraction of crystallites that corresponds to the orientation  $\{hkl\}$ ,

$M_{hkl}$  – repeatability factor for orientation  $\{hkl\}$ ,

$n$  – number of investigated crystallographic orientations.

In metal samples with an hcp crystal lattice, after plastic deformation by rolling, a basic type crystallographic texture is often formed [16–18]. In this case, the rolling plane is the isotropy plane of tensor physical quantities of the second rank [3]. Therefore, of interest is the angular distribution of crystallites relative to the normal to the rolling plane (distribution over the polar angle  $\theta$ ). Determination of this distribution can be considered the first stage of restoration of a three-dimensional ODF.

A polar angle  $\theta$  corresponds to each crystallographic orientation. Therefore, not only the distribution of the pole density  $P_{hkl}$  over the crystallographic orientations is of interest, but also the angular distribution of the crystallite fractions  $F(\theta)$  over the polar angle  $\theta$ .

On the basis of the inverse pole figures, one can obtain the angular distribution of the crystallite fractions  $F(\theta)$  over the polar angle  $\theta$ . The experimental dependence  $F(\theta)$  can be used to calculate the crystallite distribution function  $f(\theta)$  over the polar angle  $\theta$ . This calculation can be done using polynomial regression.

The crystallite distribution function  $f(\theta)$  can be used to calculate the anisotropic physical properties of a polycrystal [3]:

$$S_p = S_{\perp} + (S_{\parallel} - S_{\perp}) \int_{\theta} f(\theta) \cdot \cos^2(\theta) d\theta,$$

where  $S_{\perp}, S_{\parallel}$  – the single-crystal parameters of the hcp metal.

High-purity dysprosium (polycrystalline material with a hexagonal crystal structure:  $a = 0,35915 \text{ nm}$ ,  $c = 0,56501 \text{ nm}$ ) was selected as samples for the study. To obtain a crystallographic texture, the sample under study was deformed by cold rolling without using recrystallization annealing.

### Results and their discussion

After plastic deformation by cold rolling with a degree of deformation  $\varepsilon = 50\%$ , a sharp crystallographic texture of the basic type  $(0001)[10\bar{1}0]$  was formed in a sample of polycrystalline Dy (see Fig. 2).

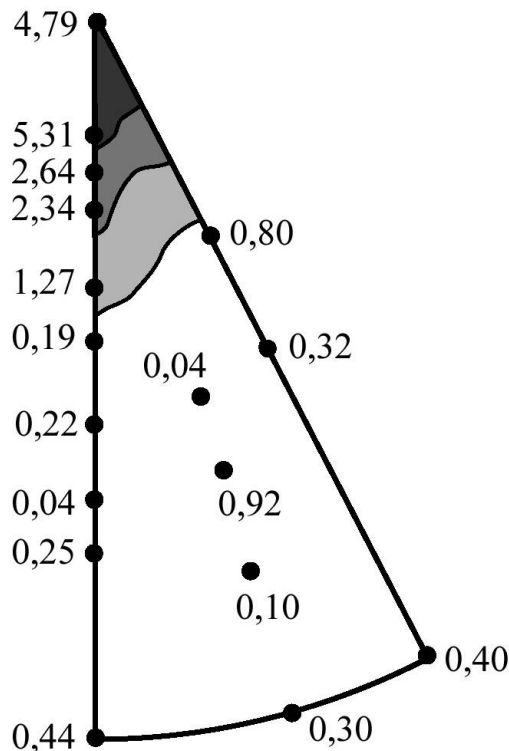


Fig. 2 – Reverse pole figure of a deformed polycrystal

On the reverse pole figure of dysprosium, the basic  $(0001)$  and pyramidal  $\{10\bar{1}5\}$  crystallite orientations are distinguished, which have a small scattering of the pole density. This feature of the rolling texture of the sample under study indicates that the main mechanism of deformation in the material is slip along the basic system  $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . The slipping of a dislocation along the prismatic system  $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$  for the sample under study is a secondary deformation mechanism.

A similar deformation texture is observed in other metals with an hcp structure [1], [16], [17]. The sharp basic component of the rolling texture in samples of hcp metals leads to isotropy of physical and mechanical properties in the rolling plane and anisotropy of physical properties in the plane perpendicular to the rolling direction.

Figure 3 shows the obtained distributions of the pole density on the reverse pole figure and the distribution of the fraction of crystallites in the dysprosium sample by orientations. To determine the distribution function of crystallites over the polar angle  $f(\theta)$ , polynomial regression was used, which gives local approximations by segments of second-degree polynomials.

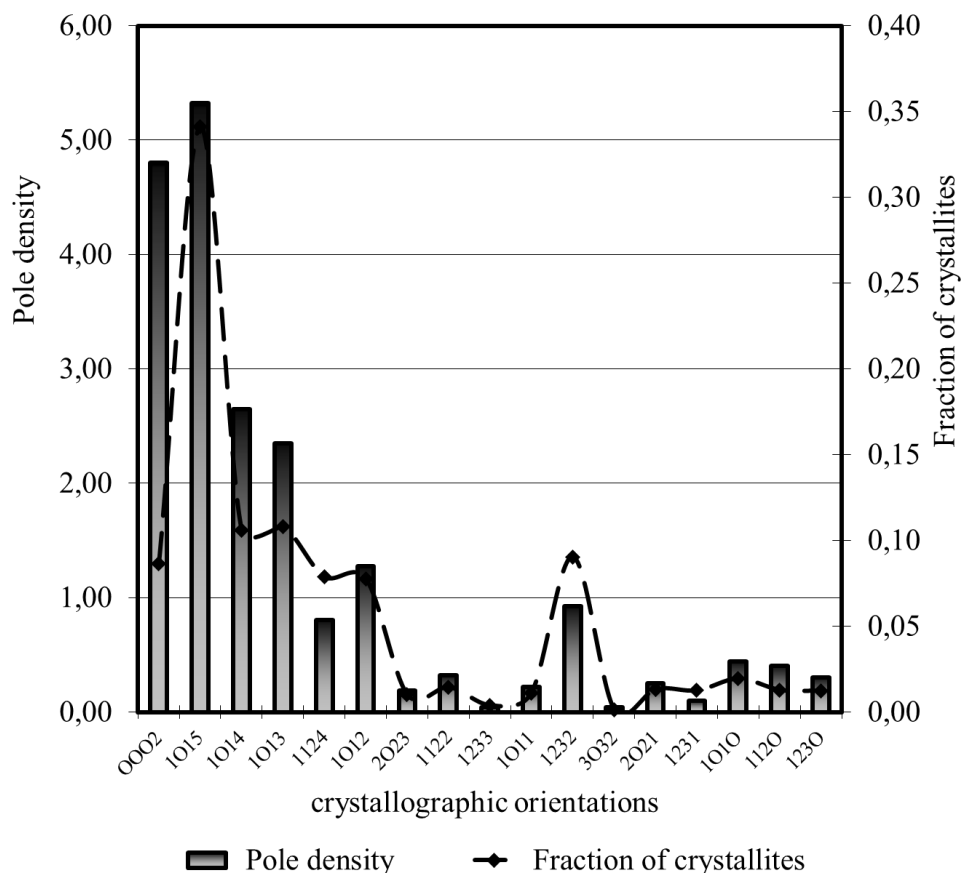


Fig. 3 – Distribution of pole density and fraction of crystallites by crystallographic orientations

Figure 4 compares the distribution of crystallite fractions over the polar angle  $\theta$  and the graph of the function  $f(\theta)$  for a metal sample.

The angular distribution functions  $f(\theta)$  obtained on the basis of the inverse pole figure were used to determine the  $S_p$  values of the anisotropic physical properties Dy.

Calculations of the magnetic susceptibility  $\chi$  of a deformed sample Dy show that for the rolling direction  $\chi_{rd}$  and for the normal direction to the rolling plane  $\chi_{nd}$ , the value of anisotropy  $\frac{\chi_{rd} - \chi_{nd}}{\chi_{nd}} \cdot 100\% \cong 18\%$ , which agrees with the experimental results of determining the magnetic susceptibility of the studied polycrystal.

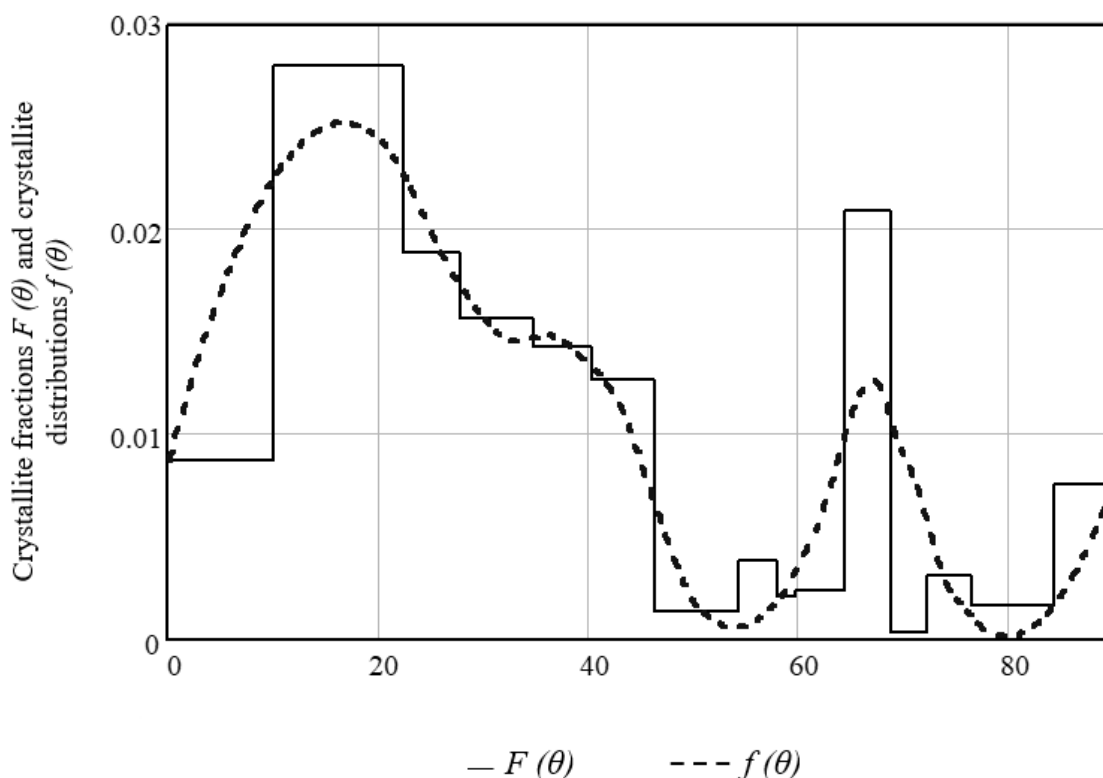


Fig. 4 – Distribution of crystallite fractions by polar angle  $\theta$  and graph of the function  $f(\theta)$  for the sample

**Conclusions**

The method for calculating the distribution function of crystallite orientations based on the expansion of the distribution function of crystallites by orientations in a series of generalized spherical functions, is mathematically complex, ambiguous, and difficult to use in practice. The proposed method for the experimental study of the distribution of crystallites by orientations simplifies the problem. Using polynomial regression for experimental data allows you to quickly obtain the function  $f(\theta)$ , which makes it possible to calculate the anisotropic physical properties of a polycrystal.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Кудрявцев И. П. Текстуры в металлах и сплавах / И. П. Кудрявцев. – М.: Металлургия, 1965. – 292 с.
2. Kocks F. Texture and Anisotropy. Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effect on Material Properties / Kocks Fred & Tomé, Carlos & Wenk H-R. – Cambridge University Press, 2000. – 676 p.
3. Адамеску Р.А. Анизотропия физических свойств металлов / Р. А. Адамеску, П. В. Гельд, Е. А. Митюшов. – М.: Металлургия, 1985. – 137 с.
4. Вишняков Я. Д. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабарэко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 344 с.
5. Лобанов М. Л. Методы исследования текстур в материалах / М. Л. Лобанов, А. С. Юровских, Н. И. Кардонина, Г. М. Русаков. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. – 115 с.
6. Бородкина М. М. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов / М. М. Бородкина, Э. Н. Спектор. – М.: Металлургия, 1981. – 271 с.
7. Митюшов Е. А. Формальная схема расчета эффективных упругих свойств текстурированных металлов / Е. А. Митюшов, Н. Ю. Одинцова, С. А. Берестова // Математическое моделирование систем и процессов. – 2003. – №11. – С. 76–80.
8. Яковлев С. С. Анизотропия механических свойств и кристаллографическая текстура гексагональных плотноупакованных металлов / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып.1. – С. 41–49.
9. Perlovich Yu. Three laws of substructure anisotropy of textured metal materials, revealed by X-ray method of generalized pole figures / Yu. Perlovich, M. Isaenkova, V. Fesenko // Materials Processing and Texture, Ceramic Transactions. – 2008. – Vol. 200. – P. 539–546.
10. Betsofen S. Ya. Texture and anisotropy in the mechanical properties of titanium alloys caused by the mechanism of plastic deformation / S. Ya. Betsofen, A. A. Ilyin, V. V. Plikhunov, A. D. Plotnikov, A. A. Filatov // Russian Metallurgy (Metally). – 2007. – Vol. 2007. – Iss.5. – P. 387–393.
11. Степаненко А. В. Исследование анизотропии свойств поликристалла на основе текстурных данных / А. В. Степаненко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №9. – С. 46–51.
12. Roe R. J. Description of Crystallite Orientation in Polycrystalline Materials / R. J. Roe // Journ. Appl. Phys. – 1965. – V. 36. – №6. – P. 2024–2031.
13. Bunge H. I. Zur Darstellung allgemeiner Texturen / H. I. Bunge // Z. Metallkunde. – 1965. – Bd.56. – P. 872–874.
14. Bunge H. I. The basic concepts of texture investigation in polycrystalline materials / H. I. Bunge // Steel Res. – 1991. – Vol. 62. – №12. – P. 530–541.
15. Matthies S. Study of the ghost phenomena in mathematical texture analysis by means of standard functions / S. Matthies, F. Wagner // Phys. stat. sol. B. – 1981. – Vol. 102. – №2. – P. 591–601.
16. Золоторевский Н. Ю. Фрагментация и текстурообразование при деформации металлических материалов / Н. Ю. Золоторевский, В. В. Рыбин // СПб.: Издательство Политехнического университета, 2014. – 208 с.
17. Степаненко А. В. Определение текстурных параметров поликристаллов с острой однокомпонентной текстурой / А. В. Степаненко // Успехи современной науки и образования. – 2016. – №9. – Т. 4. – С. 149–153.
18. Дзунович Д. А. Методические аспекты количественного текстурного анализа листовых полуфабрикатов из ГПУ-сплавов (Ti, Zr) / Д. А. Дзунович, С. Я. Бецоффен, П. В. Панин // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – №11. – С. 8–16.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Kudryavcev I. P. Tekstury v metallah i splavah [Textures in metals and alloys] / I. P. Kudryavtsev. – М.: Metallurgy, 1965. – 292 p. [in Russian]
2. Kocks F. Texture and Anisotropy. Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effect on Material Properties / Kocks Fred & Tomé, Carlos & Wenk H-R. – Cambridge University Press, 2000. – 676 p.
3. Adamesku R.A. Anizotropiya fizicheskikh svojstv metallov [Anisotropy of the physical properties of metals] / R. A. Adamesku, P. V. Gel'd, E. A. Mityushov. – М.: Metallurgy, 1985. – 137 p. [in Russian]
4. Vishnyakov YA. D. Teoriya obrazovaniya tekstur v metallah i splavah [The theory of texture formation in metals and alloys] / YA. D. Vishnyakov, A. A. Babareko, S. A. Vladimirov, I. V. Egiz. – М.: Nauka, 1979. – 344 p. [in Russian]
5. Lobanov M. L. Metody issledovaniya tekstur v materialah [Methods for studying textures in materials] / M. L. Lobanov, A. S. YUrovskih, N. I. Kardonina, G. M. Rusakov. – Yekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2014. – 115 p. [in Russian]
6. Borodkina M. M. Rentgenograficheskij analiz tekstury metal-lov i splavov [X-ray analysis of the texture of metals and alloys] / M. M. Borodkina, E. N. Spektor. – М.: Metallurgy, 1981. – 271 p. [in Russian]
7. Mityushov E. A. Formal'naya skhema rascheta effektivnyh uprugih svojstv teksturirovannyh metallov [Formal scheme for calculating the effective elastic properties of textured metals] / E. A. Mityushov, N. YU. Odincova, S. A. Berestova //

Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov [Mathematical modeling of systems and processes]. – 2003. – No. 11. – 76–80. [in Russian]

8. YAkovlev S.S. Anizotropiya mekhanicheskikh svoystv i kristallo-graficheskaya tekstura geksagonal'nyh plotnoupakovannykh metallov [Anisotropy of mechanical properties and crystallographic texture of hexagonal close-packed metals] / S. S. YAkovlev, V. D. Kuhar' // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of TulSU. Technical science]. – 2011. – Issue 1. – P. 41–49. [in Russian]

9. Perlovich Yu. Three laws of substructure anisotropy of textured metal materials, revealed by X-ray method of generalized pole figures / Yu. Perlovich, M. Isaenkova, V. Fesenko // Materials Processing and Texture, Ceramic Transactions. – 2008. – Vol. 200. – P. 539–546.

10. Betsofen S. Ya. Texture and anisotropy in the mechanical properties of titanium alloys caused by the mechanism of plastic deformation / S. Ya. Betsofen, A. A. Ilyin, V. V. Plikhunov, A. D. Plotnikov, A. A. Filatov // Russian Metallurgy (Metally). – 2007. – Vol. 2007. – Iss.5. – P. 387–393.

11. Stepanenko A. V. Issledovanie anizotropii svoystv polikristalla na osnove teksturnykh dannykh [Investigation of the anisotropy of polycrystal properties based on texture data] / A. V. Stepanenko // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory laboratory. Diagnostics of materials]. – 2019. – Vol. 85. – No. 9. – P. 46–51. [in Russian]

12. Roe R. J. Description of Crystallite Orientation in Polycrystalline Materials / R. J. Roe // Journ. Appl. Phys. – 1965. – V. 36. – №6. – P. 2024–2031.

13. Bunge H. I. Zur Darstellung allgemeiner Texturen / H. I. Bunge // Z. Metallkunde. – 1965. – Bd. 56. – P. 872–874.

14. Bunge H. I. The basic concepts of texture investigation in polycrystalline materials / H. I. Bunge // Steel Res. – 1991. – Vol. 62. – №12. – P. 530–541.

15. Matthies S. Study of the ghost phenomena in mathematical texture analysis by means of standard functions / S. Matthies, F. Wagner // Phys. stat. sol. B. – 1981. – Vol. 102. – №2. – P. 591–601.

16. Zolotarevskij N. YU. Fragmentatsiya i teksturoobrazovanie pri deformatsii metallicheskih materialov [Fragmentation and texture formation during deformation of metal materials] / N. YU. Zolotarevskij, V. V. Rybin // Saint Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2014. – 208 p. [in Russian]

17. Stepanenko A. V. Opredelenie teksturnykh parametrov polikristallov s ostroj odnocomponentnoy teksturoj [Determination of texture parameters of polycrystals with a sharp one-component texture] / A. V. Stepanenko // Uspekhi sovremennoj nauki i obrazovaniya [Advances in modern science and education]. – 2016. – No. 9. – Vol. 4. – P. 149–153. [in Russian]

18. Dzunovich D. A. Metodicheskie aspekty kolichestvennogo teksturnogo analiza listovykh polufabrikatov iz GPU-splavov (Ti, Zr) [Methodological aspects of quantitative texture analysis of sheet semi-finished products made of hcp alloys (Ti, Zr)] / D. A. Dzunovich, S. YA. Becofen, P. V. Panin // Deformatsiya i razrushenie materialov [Deformation and destruction of materials]. – 2016. – No. 11. – P. 8–16. [in Russian]



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.022>**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СЪЕМКЕ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ИСХОДНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПРОЕКТА**

Научная статья

**Федоров С.А.<sup>1, \*</sup>, Хромченко А.В.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-5410-3916;<sup>1, 2</sup> Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

\* Корреспондирующий автор (fedoroff27[at]mail.ru)

**Аннотация**

При практических работах с применением геодезического спутникового оборудования на объектах линейного типа могут быть ситуации, когда по каким-либо причинам не удастся выполнить измерения с соблюдением единой технологии производства работ или когда дополнительные определения были выполнены после проведения основных измерений.

В статье сделан анализ качества измерений, получаемых с помощью геодезических спутниковых приёмников при автономных и относительных определениях для характеристики протяжённости трассы сооружений линейного типа.

Авторами предложена методика вставки дополнительных спутниковых определений в исходную систему координат проекта с целью объединения результатов измерений для повышения их точности.

**Ключевые слова:** геодезическое спутниковое оборудование; система координат проекта; государственная геодезическая сеть; базовая линия; режим «Stop-and-Go»; аффинное преобразование.

**A STUDY OF THE CONDITIONS FOR THE USE OF ADDITIONAL SATELLITE MEASUREMENTS WHEN CAPTURING FOOTAGE OF OUTSIDE PLANT IN THE ORIGINAL COORDINATE SYSTEM OF A PROJECT**

Research article

**Fedorov S.A.<sup>1, \*</sup>, Khromchenko A.V.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-5410-3916;<sup>1, 2</sup> Pacific National University, Khabarovsk, Russia

\* Corresponding author (fedoroff27[at]mail.ru)

**Abstract**

When using geodetic satellite equipment on outside plant properties, there may be situations when it is not possible to perform measurements in compliance with the common approaches, or when additional definitions were made after the main measurements.

This article analyzes the quality of measurements obtained using geodetic satellite receivers with autonomous and relative definitions to characterize the length of the route of the outside plant.

The authors propose a method for including additional satellite definitions into the original coordinate system of the project in order to combine the measurement results with the aim of improving their accuracy.

**Keywords:** geodetic satellite equipment; project coordinate system; state geodetic network; baseline; Stop-and-Go method; affine transformation.

**Введение**

При съёмке автомобильной дороги или автозимника основные измерения проводят по методике относительных спутниковых определений от базовой станции (базы), привязанной к пунктам государственной геодезической сети (ГГС), а дополнительные – без привязки базы к исходным пунктам из-за их недоступности. В другом случае первая часть кинематических определений могла быть выполнена с использованием базового приёмника, связанного с ГГС, тогда как последующие измерения проводились одним приёмником по методике автономных спутниковых определений.

Все названные выше комбинации видов спутниковых определений требуют объединения (увязки) разнородных по качеству измерений для их последующей обработки в единой системе координат, принятой для данного объекта. Эту задачу можно решать методом вставки одной координатной системы, где были сделаны дополнительные измерения, в другую исходную (основную) систему координат проекта (СКп) [1], [2].

Для практических целей также представляют интерес исследования по оценке точности определения отдельных расстояний или протяжённости трассы автозимника, автомобильной дороги и других линейных сооружений по значениям плоских прямоугольных координат, измеренным геодезическими спутниковыми приёмниками в автономном режиме или относительным методом с образованием базовых линий без трансформирования координат в государственную (СК-42, СК-95) или в местную системы координат [3]. Возможность использования автономных определений и результатов обработки базовых линий без перехода к СК-42 упрощает технологию получения необходимых геодезических данных для линейных сооружений большой протяжённости при отсутствии, недоступности или значительной удалённости исходных геодезических пунктов от района работ [2], [4], [5].

**Основные результаты**

Пост-обработку спутниковых измерений, выполненных с помощью геодезических приёмников, осуществляют в определённой последовательности (см. рисунок 1). В качестве СКп наиболее часто используется зональная система плоских прямоугольных координат СК-42, параметры перехода к которой от WGS-84 заключены в настройках программы, предназначенной для обработки спутниковых измерений. В дальнейшем окончательные результаты

обработки измерений могут быть трансформированы в любую другую локальную систему координат по значениям совместных параметров связи систем.

При импорте «сырых» данных из приёмников осуществляется объединение разрозненных автономных спутниковых измерений в единый массив и устанавливаются направления условных базовых линий  $D_A$  между точками статических и кинематических определений (см. рисунок 2.а), если использовался метод относительных спутниковых измерений с образованием базовой станции. В итоге формируется списки точек  $A_j$  и плоских прямоугольных координат, значения которых смещены на  $\square$  3-7 м по отношению к их истинным координатам в СК-42.

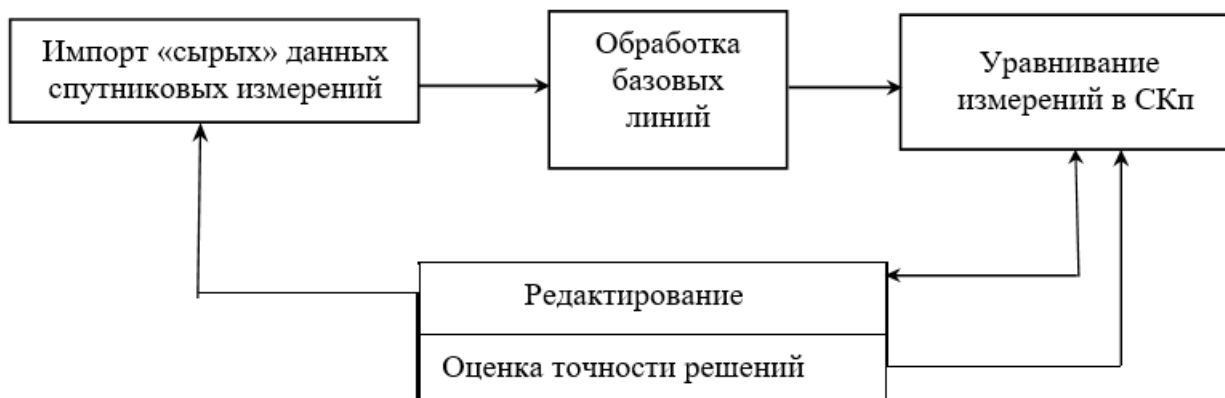


Рис. 1 – Схема обработки геодезических спутниковых измерений

На втором этапе обработки базовых линий производятся вычисления проложений (базовых линий) для расстояний  $D_B$ , измеренных от базовой станции до подвижного приёмника (см. рисунок 2.а), и осуществляется уточнение на  $\pm 1-4$  м прямоугольных координат определяемых точек  $B_j$  относительно их «сырых» значений. Базовая станция и съёмочные точки по-прежнему смещены относительно своего истинного положения в СКп.

При уравнивании измерений на третьем этапе процесса обработки данных, присваивают базовой станции её истинные значения координат, известные, например, в СК-42, и вычисляют окончательные плоские прямоугольные координаты определяемых точек  $C_j$  в системе координат проекта (см. рисунок 2.б). Вычисление отметок для съёмочных точек выполняют в системе высот проекта (СВп), для чего опорным точкам задают исходные отметки в СВп, затем подгружают геоидальные поправки и повторяют процесс уравнивания измерений.

В таблице 1 приведены результаты съёмки оси автомобильной дороги в отдельных точках, полученные методом висячих кинематических определений в режиме «Stop-and-Go». Съёмка велась подвижным приёмником Trimble-4600LS, установленном на автомобиле. Обработка измерений произведена в Trimble Geomatic Office. Съёмка выполнена на объекте, расположенном в 100 км к югу от г. Якутска [6].

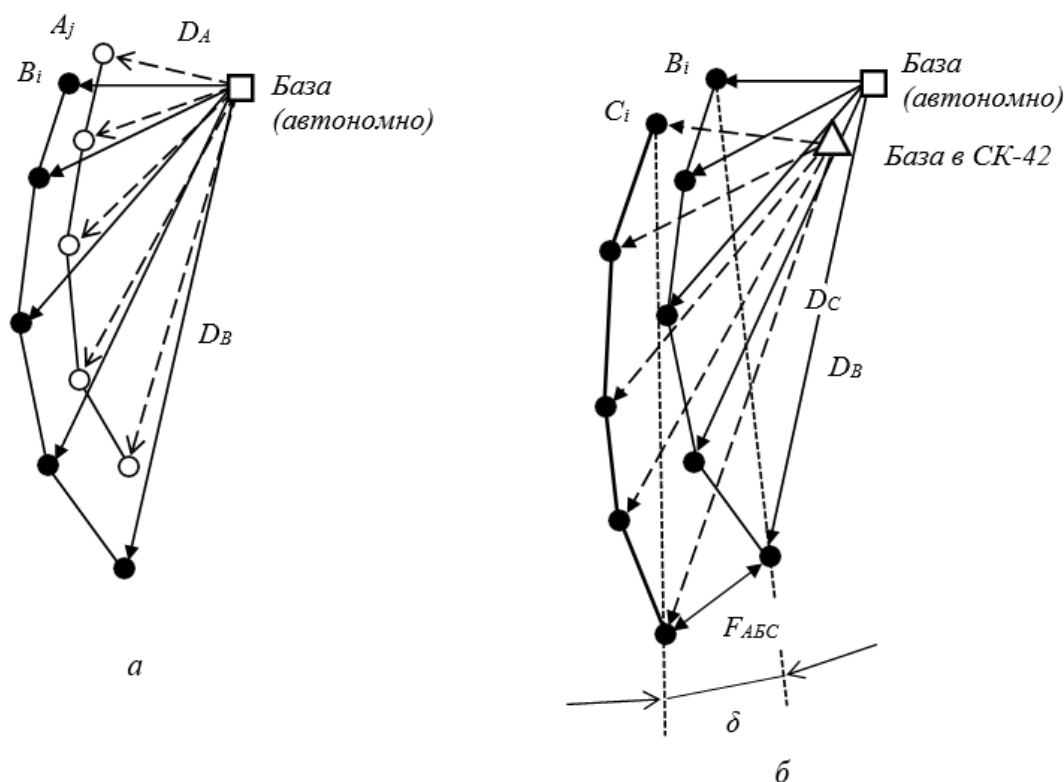


Рис. 2 – Схемы взаимного расположения точек трассы при автономных определениях и обработанных базовых линиях (а) и при обработанных базовых линиях и в СК-42 (б)

Анализ значений приращений координат в таблице 1 свидетельствует о наличии закономерностей в характере изменения местоположения определяемых точек после перехода от координат обработанных базовых линий к координатам в СК-42. Действительно, в результате уравнивания базовых линий в СКп происходит не только параллельный сдвиг точек на величину поправок  $\Delta X_{II}$  и  $\Delta Y_{II}$ , присваиваемых координатам базовой станции при их трансформировании в СК-42, но и разворот трассы относительно базы на величину угла  $\delta \approx +4,0''$ . Это приводит к увеличению размеров вектора  $F_{ABC}$  поправок в координаты определяемых точек на величину порядка 1,5 см/км.

Таблица 1 – Динамика изменения приращений координат при обработке спутниковых измерений

№ точки	Длина базовой линии $D$ , м	Приращения координат определяемых точек				
		на стадии обработки базовых линий		на стадии уравнивания в СК-42		
		$(X_B - X_A)$ , м	$(Y_B - Y_A)$ , м	$(X_C - X_B)$ , м	$(Y_C - Y_B)$ , м	$F_{ABC}$ , м
База	0	0	0	$\Delta X_{II} = -2,121$	$\Delta Y_{II} = -3,462$	4,060
781	116,579	0,488	-2,868	-2,120	-3,460	4,058
770	2975,698	2,941	-3,578	-2,076	-3,498	4,068
745	6136,498	1,179	-2,569	-2,084	-3,576	4,139
737	8931,342	1,666	-2,501	-2,074	-3,629	4,180
717	11936,190	0,570	-1,444	-2,105	-3,698	4,255
697	15028,888	0,828	-0,812	-2,114	-3,754	4,308
681	17576,580	1,657	-0,341	-2,104	-3,803	4,346

В таблице 2 представлены результаты наших экспериментов, характеризующие динамику изменения расстояний  $D_A$ ,  $D_B$  и  $D_C$  от базовой станции до подвижного приёмника (см. рисунок 2), вычисленных на плоскости при обработке спутниковых определений по схеме «автономные измерения – базовые линии – уравнивание в СК-42». Спутниковые определения координат подвижного приёмника выполнены методом кинематики в режиме «Stop-and-Go». Подвижный приёмник по-прежнему устанавливался на автомобиле.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что при переходе от автономных измерений к обработанным базовым линиям и к линиям в СК-42, расстояния между базой и подвижным приёмником изменяются существенно в особенности на коротких базовых линиях. В свою очередь, обработанные и уравненные в СК-42 базовые линии в пределах одной станции различаются между собой незначительно и хорошо коррелируют с расстояниями до подвижного приёмника. Для метода кинематики погрешности измерения линий с точностью порядка 1/100000-1/200000 могут квалифицироваться как безошибочные.

Таблица 2 – Динамика изменения проложений базовых линий

№ объекта (базы)	Направление трассы	Автономные измерения, $D_A$ , м	Разности длин базовых линий			$(D_C - D_B)$ $D$
			$(D_B - D_A)$ , м	$(D_C - D_A)$ , м	$(D_C - D_B)$ , м	
1	юго-запад 20° от базовой станции	116,579	1,942	1,941	0,000	0
		2975,698	0,730	0,728	-0,003	1/992000
		6136,498	-0,491	-0,498	-0,007	1/876600
		8931,342	-1,094	-1,104	-0,010	1/893000
		11936,190	-0,596	-0,610	-0,013	1/918170
		15028,888	-0,854	-0,871	-0,017	1/884000
		17576,580	-1,660	-1,681	-0,020	1/878800
2	северо-восток 30° от базовой станции	14365,494	-0,919	-0,860	0,059	1/243470
		9061,708	0,882	0,919	0,037	1/244900
		6933,383	0,261	0,290	0,029	1/239070
		3867,110	-0,344	-0,328	0,016	1/241690
		1586,806	-0,485	-0,479	0,007	1/226570
		109,485	-1,385	-1,385	0,001	1/109460
		1514,688	-0,792	-0,786	0,006	1/252330
	юго-запад 15° от базовой станции	3457,192	-0,594	-0,579	0,014	1/246930
		5463,624	-1,120	-1,096	0,023	1/237520
		7454,299	-0,370	-0,288	0,032	1/232940

Таким образом, следует вывод, что для измерения длины трассы методом кинематики в режиме «Stop-and-Go» с продолжительностью сеансов измерений на точках равной 30 с, можно не производить трансформирование базовых линий в СК-42, так как точные значения протяжённости трассы могут быть вычислены по обработанным базовым линиям. Более того, статистические данные о расстояниях между смежными точками на трассе, полученные нами для названных выше двух объектов, свидетельствуют о равнозначности вычисления проложений между смежными точками кинематики как по координатам своих обработанных базовых линий, так и по координатам урavnенных базовых линий в СК-42. Также установлено, что расстояния между смежными точками трассы на плоскости могут быть рассчитаны со средней квадратической погрешностью порядка  $\pm 0,3-0,4$  м по измеренным «сырым» координатам автономных спутниковых определений, полученных с применением одного спутникового приёмника. Эти значения характеризуют точность взаимного положения точек, определяемых при автономных измерениях.

При проведении паспортизации или диагностики автомобильных дорог определяют геометрические характеристики плана трассы автодороги и производят съёмку сооружений и устройств в системе пикетажа дороги. Для получения геодезических данных о местоположении объектов съёмки и протяжённости автодорог целесообразно использовать методы спутниковых определений координат подвижного приёмника, установленного на автотранспортном средстве. В данных условиях наибольшую эффективность проведения съёмочных работ могут обеспечить кинематические спутниковые определения, выполненные в режиме «Stop-and-Go». При этом особую значимость приобретает анализ условий использования автономных определений, выполненных одним подвижным приёмником.

В таблице 3 представлены результаты эксперимента по оценке точности определения протяжённости трассы, рассчитанной по координатам кинематических измерений. Результаты оценки получены путём сопоставления по участкам величин протяжённости трассы, вычисленных по координатам автономных измерений и по данным обработанных базовых линий относительно их соответствующих значений в СК-42.

Для повышения точности автономных определений следует увеличивать продолжительность сеанса спутниковых измерений и максимально исключать колебания (вибрацию) подвижного приёмника при его установке на автомобиле [7]. На коротких участках необходимо уменьшать интервал между определяемыми точками на трассе.

Таблица 3 – Оценка точности определения протяжённости трассы

№ участка	Количество точек кинематики при съёмке трассы, шт.	Среднее расстояние между точками кинематики, м	Протяжённость трассы в СК-42, м	Погрешность длины трассы по данным автономных измерений	Погрешность длины трассы по данным обработки базовых линий
1	13	248	3732, 676	1/2860	1/1244200
2	38	165	8668,068	1/37200	1/866800
3	46	198	11403,851	1/24850	1/877200
4	63	192	16098,962	1/13240	1/847250
5	86	234	19954,446	1/20829	1/1108600
6	101	225	22589,955	1/15644	1/1254900

Предложенная нами технология объединения в СКп дополнительных и основных спутниковых определений основана на использовании параметров для перехода от одной координатной системы к другой, вычисленных по координатам совмещённых точек. То есть, параметры трансформирования координат из системы в систему рассчитываются по одноимённым точкам, чьи координаты известны в двух системах. Для расчёта параметров по трём и более совмещённым точкам на плоскости применяют метод Хельмерта или аффинное преобразование.

На рисунке 3 показаны наиболее типичные схемы вставки автономных спутниковых измерений, выполненных методом кинематики, в систему координат ранее созданных проектов. В качестве основной (исходной) системы рассматривается система координат СК-42. Для вычисления параметров трансформирования на весь район производства работ или на территорию за его пределами используют координаты автономных определений и урavnенные прямоугольные координаты одноимённых точек  $C_i$ , полученные при первоначальном формировании основного проекта (см. рисунок 3).

Целью вставки в СКп точек  $A_i$  по известным из автономных определений координатам является вычисление для них новых значений прямоугольных координат, которые станут определять положение точек  $N_i$  в исходной СК-42, принятой для основного проекта.

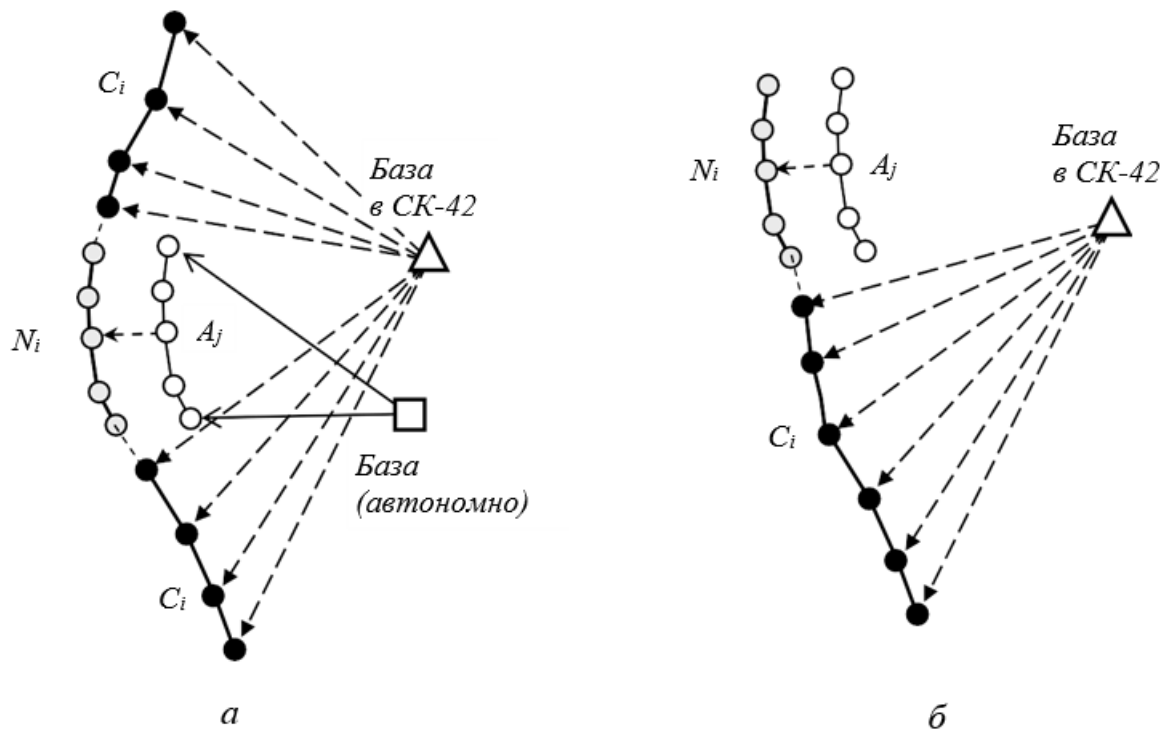


Рис. 3 – Схемы вставки автономных измерений в систему координат проекта в пределах района ранее выполненных спутниковых определений (а) и за пределами района предыдущих спутниковых определений (б)

При трансформировании координат в другую систему по известным параметрам, вычисленным по Хельмерту, используются следующие известные зависимости [8], [9]:

$$X = X_2 + M \cdot dX \cdot \cos \alpha - M \cdot dY \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

$$Y = Y_2 + M \cdot dX \cdot \sin \alpha - M \cdot dY \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $dX = X - X_1$ ,  $dY = Y - Y_1$

В выражениях (1) и (2) параметры  $M$  и  $\alpha$  характеризуют соответственно масштаб преобразований для расстояний и угол взаимного разворота осей координатных систем. При таком преобразовании расстояния изменяются по всем направлениям в соответствии с масштабом  $M$ , тогда как углы между направлениями остаются постоянными.

Аффинное преобразование из одной прямоугольной системы в другую производится по следующим известным общим формулам [10]:

$$X' = X_2 + a_1 * dX + b_1 * dY,$$

$$Y' = Y_2 + a_2 * dX + b_2 * dY.$$

При аффинном преобразовании в зависимости от положения исходного пункта меняются расстояния и углы между направлениями.

В таблице 4 приведены результаты вставки автономных спутниковых определений, выполненных одним приёмником, в исходную систему СК-42. Измерения соответствуют схеме, показанной на рисунке 3.а, согласно которой автономные определения могли быть выполнены в одном случае без установки базовой станции, а во втором случае – от новой базы, но без последующей обработки базовых линий.

Таблица 4 – Погрешности вставки автономных определений в СК-42

Количество совмещённых точек для определения параметров	Средняя квадратическая погрешность согласованности координат совмещённых точек при вычислении параметров преобразования, $m_K$ , м		Количество дополнител ьных точек для вставки  в СКп	Средние квадратические погрешности определения координат при вставке точек в СК42			
				по Хельмерту		аффинное преобразование	
	по Хельмерту	аффинное преобразование		$m_x$ , м	$m_y$ , м	$m_x$ , м	$m_y$ , м
51	±0,672	±0,563	50	±0,750	±0,332	±1,201	±0,352
40	±0,587	±0,447	50	±0,862	±0,376	±1,070	±0,379
30	±0,299	±0,236	50	±1,029	±0,375	±1,023	±0,404
20	±0,169	±0,153	50	±1,016	±0,351	±1,017	±0,481
10	±0,109	±0,111	50	±0,885	±0,371	±0,911	±0,455
6	±0,060	±0,052	50	±0,816	±0,372	±0,828	±0.620
4	±0,035	±0,044	50	±0,789	±0,379	±0,744	±0,799
2	±0,000	-	50	±0,789	±0,369	-	-

**Заключение**

Процесс объединения дополнительных автономных определений с измерениями в СКп выполнялся в два этапа. Первоначально по одноимённым

точкам кинематических определений, выполненных автономно и затем уравненных в СКп, были вычислены параметры преобразований из системы координат автономных определений в систему СК-42. Количество совмещённых точек изменялось симметрично относительно области вставки, причём использовались ближайшие к объекту точки. Далее, по параметрам преобразования из системы автономных измерений в основную СКп рассчитывались координаты 50 новых точек, измеренных автономно без базовой станции. Полученные координаты «подгружаемых» в СКп точек  $N_j$  сравнивались с координатами этих точек, известными в СК-42.

В случае вставки дополнительных точек, координаты которых уточнены в процессе обработки базовых линий от новой базовой станции (см. рисунок 3.а), преобразования в систему СК-42 выполняются с погрешностями  $m_X = m_Y = 0$  при масштабе  $m = 0,99999886$  и угле  $\alpha = 4,0''$ .

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Генике А. А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М.: Картогеоцентр. – Геодезиздат, 1999. – 271 с.
2. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – Введ. 18 декабря 2008. – М.: Стандартинформ, 2009. – 62 с.
3. Кафтан В. И. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений / В. И. Кафтан, П. А. Докукин // Геодезия и картография. – 2007. – № 9. – С. 18-21.
4. Об утверждении Порядка установления местных систем координат. Приказ Министерства экономического развития РФ № 383 от 28 июля 2017 года [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/436761004>. (дата обращения 12.12.2020)
5. Миннимухаметова А. А. Особенности геодезических измерений спутниковыми методами / А. А. Миннимухаметова, В. Ю. Матросов // Международный академический вестник. – 2015. – № 6 (12). – С. 60-61.
6. Касанов М. В. Принципы выбора мест расположения спутниковых базовых станций / М. В. Касанов // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России : материалы IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 20-22 мая 2015 г., Волгоград / Министерство образования и науки Российской Федерации; Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. – Волгоград, 2015. – С. 187-191.
7. Батищева Е. Н. Исследование точности спутниковых наблюдений локальной геодезической сети / Е. Н. Батищева, Д. Ю. Феклисов, Д. И. Парпура и др. // Науки о земле. – 2015. – № 4. – С. 97-108.
8. Кафтан В. И. Геодезические спутниковые измерения и их обработка: учебное пособие для бакалавров по направлению 120700 «Землеустройство и кадастр» / В. И. Кафтан. – Московский государственный университет путей сообщений, 2013. – 111 с.
9. Закатов И. С. Курс высшей геодезии / И. С. Закатов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 511 с.
10. Поклад Г. Г. Геодезия: учебное пособие для вузов / Г. Г. Поклад, С. П. Гриднев. – М.: Академический Проект, 2007. – 592 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Genike A. A. Global'naya sputnikovaya sistema opredeleniya mestopolozheniya GPS i yeye primeneniye v geodezii [Global satellite positioning system GPS and its application in geodesy] / A. A. Genike, G. G. Pobedinskij. – M.: Kartgeotsentr. – Geodezizdat, 1999. – 271. p. [in Russian]
2. GOST R 51794-2008. Global'nyye navigatsionnyye sputnikovyie sistemy. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniy koordinat opredelyayemykh tochek [Global navigation satellite systems. Coordinate systems. Methods for transforming the coordinates of the determined points]. – Intr. 18 dec. 2008. – M.: Standartinform, 2009. – 62 p. [in Russian]
3. Kaftan V. I. Opredeleniye smeshcheniy i deformatsiy po dannym sputnikovykh geodezicheskikh izmereniy [Determination of displacements and deformations according to satellite geodetic measurements] / V. I. Kaftan, P. A. Dokukin // Geodeziya i kartografiya. – 2007. – № 9. – P. 18-21. [in Russian]
4. Ob utverzhdenii Poryadka ustanovleniya mestnykh sistem koordinat. Prikaz Ministerstva ekonomicheskogo razvitiya RF № 383 ot 28 iyulya 2017 goda [On the approval of the Procedure for the establishment of local coordinate systems. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation No. 383 dated July 28, 2017] [Electronic resource]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/436761004>. (accessed 12.12.2020) [in Russian]
5. Minnimukhametova A. A. Osobennosti geodezicheskikh izmereniy sputnikovymi metodami [Features of geodetic measurements by satellite methods] / A. A. Minnimukhametova, V. Yu. Matrosov // Mezhdunarodnyy akademicheskij vestnik. – 2015. – № 6 (12). – P. 60-61. [in Russian]
6. Katasonov M. V. Printsipy vybora mest raspolozheniya sputni-kovykh bazovykh stantsiy [Principles of choosing the location of satellite base stations] / M. V. Katasonov // Molodezh' i nauchno-tehnicheskij progress v dorozhnoy otrasli yuga Rossii : materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. 20-22 maya 2015 g., Volgograd / Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy federatsii; Volgogradskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet. – Volgograd, 2015. – P. 187-191. [in Russian]
7. Batishcheva E. N. Issledovaniye tochnosti sputnikovykh nablyudeniy lokal'noy geodezicheskoy seti [Study of the accuracy of satellite observations of the local geodetic network] / E. N. Batishcheva, D. Yu. Feklistov, D. I. Parpura et al. // Nauki o zemle. – 2015. – № 4. – P. 97-108. [in Russian]
8. Kaftan V. I. Geodezicheskiye sputnikovyie izmereniya i ikh obrabotka : uchebnoye posobiye dlya bakalavrov po napravleniyu 120700 «Zemleustroystvo I kadastr» [Geodetic satellite measurements and their processing] / V. I. Kaftan. – Moskovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniy, 2013. – 111 p. [in Russian]
9. Zakatov I. S. Kurs vysshey geodezii [Course of higher geodesy] / I. S. Zakatov. – 4th edition pererab. i dop. – M.: Nedra, 1976. – 511 p. [in Russian]
10. Poklad G. G. Geodeziya: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Geodesy] / G. G. Poklad, S. P. Gridnev. – M.: Akademicheskij Proyekt, 2007, – 592 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.023>**УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ХАРБАЛАХСКОМ УГОЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ ОАО «ТЕЛЕН»**

Научная статья

**Халыева А.С.<sup>1,\*</sup>, Чемезов Е.Н.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8116-8395;<sup>1,2</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

\* Корреспондирующий автор (nastinka9876[at]gmail.com)

**Аннотация**

Статья посвящена Харбалахскому угольному предприятию ОАО «Телен». Обеспечение безопасного труда и охраны здоровья на работе – это не только разумная экономическая политика, но одно из конституционных прав человека. На угледобывающих предприятиях страны осуществляются меры по снижению травматизма, надзорные органы и работники предприятий проводят определенную работу по соблюдению требований безопасности. Однако существенного успеха добиться, пока не удастся. Несмотря на имеющие жертвы и аварии, вопрос безопасности горняков не становится приоритетным. Мероприятия по охране труда финансируются зачастую по остаточному принципу, поэтому остаются невыполненными. Многие руководители не уделяют достаточного внимания вопросам обеспечения безопасности, слабо контролируют намеченные мероприятия в этой области. Поэтому в статье показаны состояния и план мероприятий по охране труда ОАО «ТЕЛЕН» на 2020 год. Приводятся основные задачи производственного контроля на объектах данного предприятия, анализ несчастных случаев, профессиональной заболеваемости и анализ расходов охраны труда за 2018-2020 годы. В качестве заключения представлены основные рекомендации по улучшению условий труда на Харбалахском угольном предприятии ОАО «Телен».

**Ключевые слова:** безопасность, охрана труда, промышленность, травматизм, аварийность, несчастные случаи, профессиональные заболевания, рекомендации, угледобыча, риски, нарушения.

**IMPROVEMENT OF WORKING CONDITIONS AT THE "OAO TELEN" KHARBALAKH COAL ENTERPRISE**

Research article

**Khalyeva A.S.<sup>1,\*</sup>, Chemezov E.N.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8116-8395;<sup>1,2</sup> M. K. Ammosov North-Eastern Federal Universal Yakutsk, Russia

\* Corresponding author (nastinka9876[at]gmail.com)

**Abstract**

The article discusses the "OAO Telen" coal enterprise in Kharbalakh. Ensuring a safe and healthy working environment is not only a reasonable economic policy but also one of the Russian constitutional rights. The Russian coal mining enterprises take measures to reduce injuries, the supervisory authorities and employees are taking necessary actions to comply with safety requirements. However, significant success has not yet been achieved. Despite the number of victims and accidents, miner safety has yet to become a priority. Occupational safety measures are often funded on a residual basis, consequently remaining unfulfilled. Many employers do not pay enough attention to security issues and have little control over the planned activities in this area. Therefore, the article illustrates the state and plan for the 2020 work safety measures of "OAO Telen". The study presents the main tasks of production control at the facilities of the enterprise, an analysis of accidents, occupational diseases and the analysis of labor protection costs for 2018-2020. As a conclusion, the study outlines key recommendations for improving working conditions at the "OAO Telen" Kharbalakh coal enterprise.

**Keywords:** safety, work safety, industry, injuries, accidents, occupational diseases, recommendations, coal mining, risks, violations.

**Введение**

Угледобывающая промышленность является одной из традиционных базовых отраслей экономики Республики Саха (Якутия); в структуре объема производства промышленных отраслей угледобывающая промышленность занимает третье место после нефтяной и алмазодобывающей отраслей, на ее долю приходится до 8,3% промышленного производства. По объему добычи угля республика Саха (Якутия) занимает первое место среди регионов Дальнего Востока, на долю республики приходится более трети (35%) добываемого угля на востоке страны. Основы государственного регулирования в области добычи и использования угля заложены Федеральным Законом Российской Федерации "О государственном регулировании в области добычи и использования угля, об особенностях социальной защиты работников организаций угольной промышленности" [2], [4].

Открытое акционерное общество "Телен" является юридическим лицом и осуществляет свою деятельность в соответствии с федеральным законом от 26 декабря 1995 года № 208-ФЗ "Об акционерных обществах", иными нормативными правовыми актами Российской Федерации и Уставом.

Общество создано без ограничения срока деятельности, зарегистрировано 7 декабря 2002 года, регистратором является Межрайонная инспекция Федеральной налоговой службы № 4 по Республике Саха (Якутия). Полное наименование предприятия - Открытое акционерное общество "Телен".

Харбалахское месторождение расположено в зоне вечной мерзлоты мощностью 273-300 м. Толщина активного слоя составляет 0,6-1,5 м и напрямую зависит от экспозиции откоса. Для него характерно широкое развитие пучинных насыпей, понижения и понижения различной конфигурации и глубины (до 2,5 м). Широко распространена линза льда толщиной 5-7 м, верхний край которой обычно находится на глубине 0,6-1,0 м в глинистых отложениях. С 2010 года в государственные филиалы ГУП ЖКХ Республики Саха (Якутия) поступает угольный щебень для механизированных котельных, что составляет 75% от общего объема производства, остальное - частные предприятия, население [5].



В целях работы является, обеспечения соблюдения требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах ОАО "Телен" разработан план работ и мероприятий по обеспечению требований промышленной безопасности на 2020 год. План был выполнен в соответствии с намеченными сроками исполнения.

В 2011 году в соответствии с утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 10.03.1999 № 263. "Правила организации и осуществления производственного контроля соблюдением требований промышленной безопасности опасных производственных объектов" при численности работников, занятых на ГПО 68 человек, функции лица, ответственного за осуществление производственного контроля возлагаются на заместителя Главного инженера по технике безопасности и охране труда О. В. Кондакова [9].

Целью этой статьи является улучшение условий труда и производственного контроля, предотвращение аварий и обеспечение готовности ОАО «Телен» к локализации и ликвидации последствий аварий на тепловых электростанциях путем реализации комплекса организационных и технических мероприятий.

Основными задачами производственного контроля на объектах ОАО «Телен» являются: обеспечение требований промышленной безопасности; анализ состояния промышленной безопасности на всех объектах; разработка мер, направленных на уменьшение и предотвращение экологического ущерба; контроль соблюдением требований промышленной безопасности, установленных федеральными законами и нормативными правовыми актами, а также нормативными и техническими документами; координация работ по предотвращению аварий на опасных объектах и контроль готовности к локализации аварий и ликвидации их последствий; контроль своевременности испытаний и технических осмотров технических устройств, используемых в микроволновых печах, ремонт и поверка контрольно-измерительных приборов; контроль соблюдением технологической дисциплины.

Директор отвечает за организацию производственного контроля соблюдением требований промышленной безопасности в ОАО «Телен».

Главный инженер отвечает за осуществление производственного контроля соблюдением требований промышленной безопасности.

В целях принятия согласованных решений по обеспечению промышленной безопасности гифов по результатам производственного контроля ОАО "Телен" была создана комиссия производственного контроля (МПК), в состав которой вошли основные специалисты предприятия.

В соответствии с "Положением о регистрации объектов в государственном реестре опасных производственных объектов и ведении государственного реестра" ОАО "Телен" зарегистрировало 2 опасных объекта:

1. Разрез угольный «Харбалахский».

Зарегистрирован 20.09.2000г. № А 73-00165-001.

2. Склад взрывчатых материалов. Зарегистрирован 20.09.2000г.

№ А 73-00165-0003.

Завершены мероприятия по совершенствованию взрывного дела на 2020 год.

### **Материалы и результаты исследования**

Число смертельно травмированных на добыче угля ежегодно составляет около 50 при общем травматизме 300-400 человек. Почти все случаи смертельно травматизма происходят на объектах 1 и 2-го класса опасности, где должны приниматься максимальные меры обеспечения безопасности [1], [7].

Травматизм и аварийность при ведении подземных горных работ в несколько раз выше, чем на разрезах [7]; 80% несчастных случаев происходит из-за несоблюдения элементарных правил безопасности.

Основным принципом технологического обеспечения безопасности труда является создание новых безопасных технологий, модернизация существующих, выведение человека из зоны действия опасностей техносферы путем внедрения автоматизации и дистанционного управления, роботизации и рациональной организации труда [1], [8], [11].

Каждый работник в условиях аварийной ситуации должен быть готов к активному противодействию опасностям, что должно быть отражено в специальных инструкциях. Несмотря на обилие опасностей, их можно предвидеть и предотвратить.

Научно – методическая база обеспечения безопасности, содержащаяся, в нормативных актах должна быть доведена, непосредственно до рабочего путем их обучения, инструктажа и т.д., только тогда будет иметь реальный результат.

Любая техническая система потенциально опасна и может выйти из строя, как в результате, так и по вине самого человека, его ошибочных действий, неверных решений. Именно из-за этого знание опасностей, исходящих от самих технических систем, так и операторов, а также способов защиты от этих опасностей, - первое условие безопасности человека на производстве [2], [4], [5].

Причиной роста техногенной опасности выступают просчеты в технической политике проектирование, низкое качество прикладных исследований, технологическая отсталость производства, значительный износ средства производства, достигающий в некоторых случаях предаварийного состояния. Следует отметить также снижение профессионального уровня работников, культуры производства, ответственности должностных лиц, уровня производственной и технологической дисциплины [2], [3], [5].

### **Анализ несчастных случаев и профессиональных заболеваний за 2017-2020 годы ОАО «Телен»**

С 2017 по 2020 год было 4 случая с легким исходом и 8 случаев профессиональных заболеваний.

Анализ травматизма на предприятии проводился на основании протоколов расследования несчастных случаев и журнала несчастных случаев.

Таблица 1 – Несчастные случаи и профессиональные заболевания 2017-2020 гг.

№	Наименование	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
1.	Общее количество несчастных случаев	2	1	1	-
	в т. ч. легких	2	1	1	-
	в т. ч. тяжелых	-	-	-	-
	в т. ч. со смертельным исходом	—	—	—	—
2.	Профессиональных заболеваний	3	2	2	1

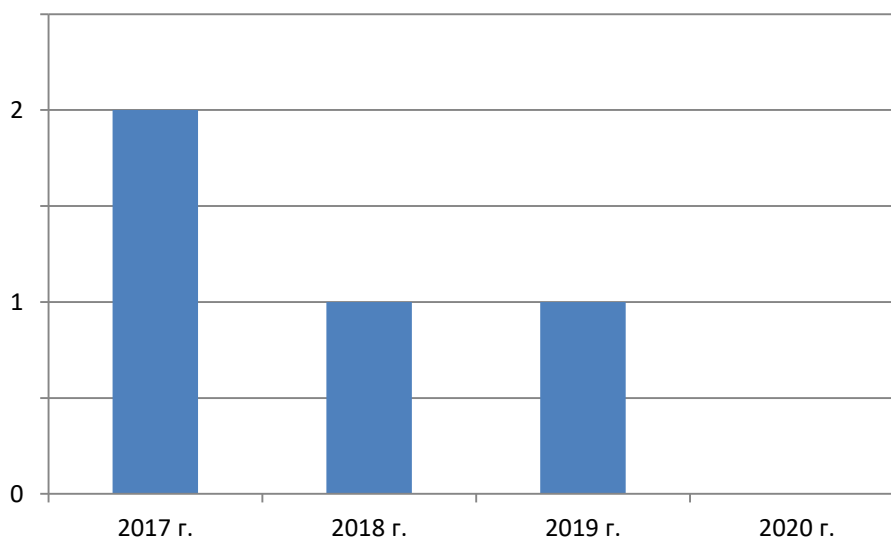


Рис. 1 – Количество несчастных случаев

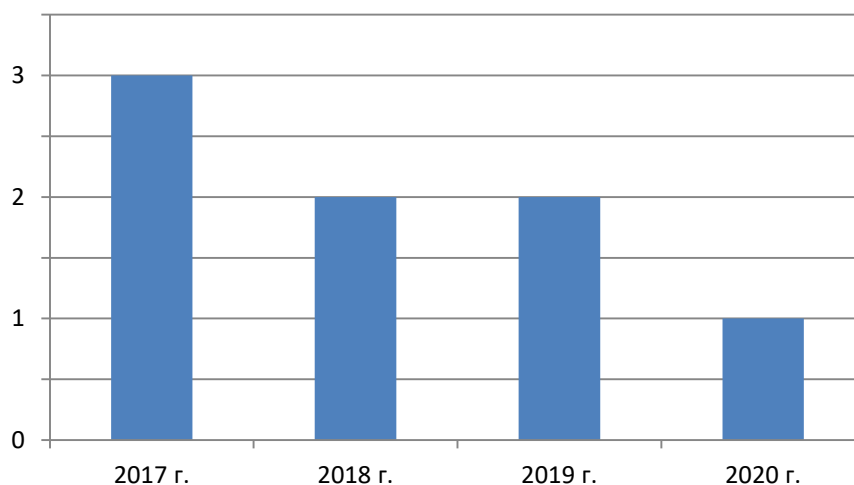


Рис. 2 – Профессиональные заболевания

Таблица 2 – Причины несчастных случаев

Код	Причины н/с	Кол-во н/с
03	Воздействие машин и механизмов	1
06	Наземный транспорт	1
08	Падение предметов, техники	2

Анализ видов и причин несчастных случаев показывает, что основной причиной травматизма сотрудников является:

- Неудовлетворительная организация труда. Это свидетельствует о преобладании в организации неквалифицированных и недостаточно подготовленных в области охраны труда инженерно-технических работников (главные специалисты, начальники цехов, мастеров, мастеров), организации или полном отсутствии должного контроля со стороны ИАС;

- Отсутствие специально разработанных мероприятий для производства особо опасных работ;
- Воспламенение горючих материалов в местах ведения огневых работ;
- Отсутствия контроля над работой и состоянием технологического оборудования;
- Несоответствие проектов паспортов крепления выработок фактическим горно-геологическим условиям;
- Низкая производственная дисциплина;
- Отсутствие ограждений движущихся частей и механизмов;

- Недостаточный уровень квалификации непосредственных исполнителей;
- Слабая организация трудового процесса;
- Отсутствие четкой системы управления безопасностью труда, не соблюдения правил и недостаточный уровень требований;
- Запланированные мероприятия по охране труда не всегда обеспечены финансово, поэтому остаются только на бумаге;
- Отсутствие современного конкурентоспособного российского горнопромышленного машиностроения и вызванная с этим зависимость от западных поставщиков по закупу оборудования, техники и запасных частей;
- Не разрабатываются и не внедряются специальные мероприятия для выполненных огневых работ и по обращению с горючими и легковоспламеняющимися материалами;
- Несвоевременная уборка и отсутствие подавления угольной пыли повышает опасность взрывов в шахте;
- Для снижения травматизма следует организовать на всех участках своевременные работы по обслуживанию механизмов, электрооборудования и других технических устройств;
- На некоторых предприятиях имеет место сокрытие несчастных случаев, что прикрывает реальную картину, создавая иллюзию улучшения их состояния.

### Профессиональная заболеваемость

В процессе трудовой деятельности в угольном разрезе подвергается воздействию широкого спектра неблагоприятных для здоровья факторов.

Перечень из них достаточно обширен: пылевые заболевания органов дыхания, профессиональная тугоухость, вибрационная болезнь, болезни суставов и мышц.

Профилактика заболеваемости представителей угольных разрезов должна обеспечиваться комплексом мероприятий: технических медицинских, организационных. На сегодняшний день в целях уменьшения воздействия вредных условий труда приоритетным в профилактике заболеваемости является увеличение путевок санаторно-курортного лечения работников, сделать рацион более питательной (витаминизированной), учащение периодичность производственного контроля на данных рабочих местах (необходима ежеквартальная оценки уровня действия ВПФ).

### План мероприятий по охране труда ОАО «ТЕЛЕН» на 2020 год

Таблица 3 – План мероприятий по охране труда ОАО «ТЕЛЕН» на 2020 год

Наименование мероприятий	Срок исполнения	Ответственный за исполнение	Отметка об исполнении
Проводить совместно с профкомом рабочие собрания с отчетом директора разреза о состоянии ОТ, производственного травматизма и аварийности за истекший период	I квартал	Директор, главный инженер, заместитель главного инженера по ОТ и ПБ, начальник ПТО	выполнено
Приобрести приборы контроля за режимом труда и отдыха - тахографы для водителей, осуществляющих пассажирские и грузовые перевозки (4 шт.)	IV квартал	Главный инженер, заместитель главного инженера по ОТ и ПБ, главный механик	выполняется
Приобрести аптечки для оказания первой помощи	IV квартал	Заместитель главного инженера по ОТ и ПБ	выполнено
Провести отчет о результатах проверки состояния ОТ и ПБ объектах ОАО «Телен»	Конец I квартала	Директор	выполнено
Провести анализ причин производственного травматизма на разрезе и разработать меры, направленные на устранение причин несчастных случаев и аварий	Конец I квартала	Заместитель главного инженера по ОТ и ПБ	выполнено
Провести анализ профзаболеваний за год, разработать мероприятия по их снижению	I квартал	Главный инженер	выполнено

Продолжение таблицы 3 – План мероприятий по охране труда ОАО «ТЕЛЕН» на 2020 год

Наименование мероприятий	Срок исполнения	Ответственный за исполнение	Отметка об исполнении
Разработать мероприятия по ОТ и ПБ	II квартал	Директор, заместитель главного инженера по ОТ и ПБ	выполнено
Провести медосмотр рабочих, занятых на вредных условиях труда	IV квартал	Директор	выполнено
Провести проверку расходования средств на мероприятия по ОТ и ТБ	II, IV кварталы	Главный инженер, главный бухгалтер	выполнено
Отправить работников, занятых на работах с вредными и (опасными) производственными факторами на санаторно-курортное лечение	III квартал	Главный инженер, заместитель главного инженера по ОТ и ПБ	отменено
Мероприятий по предупреждению распространения новой коронавирусной инфекции (COVID-19) (приобретение СИЗ, средства дезинфекции)	IV квартал	Директор	выполняется

«ГОСТ 12.0.004-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения» (вместе с "Программами обучения безопасности труда") (введен в действие Приказом Росстандарта от 09.06.2016 N 600-ст)

Результаты проверки оформляются в протоколе заседания комиссии и регистрируются в журнале проверки знаний и требований охраны труда. При успешной сдаче экзамена по охране труда выдается "свидетельство о проверке знаний требований охраны труда" установленного образца.

#### Анализ затрат на охрану труда за 2018 - 2020 годы ОАО «Телен»

Трудовым кодексом Российской Федерации (статья 226) предусмотрено, что финансирование мероприятий по улучшению условий труда и охране труда осуществляется в рамках федеральных, отраслевых и территориальных целевых программ. Улучшение условий труда и охраны труда за счет средств федерального бюджета, бюджета субъектов Российской Федерации, местных бюджетов, внебюджетных источников в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, субъектов Российской Федерации и нормативными правовыми актами представительных органов местного самоуправления. Финансирование мероприятий по охране труда осуществляется за счет прибыли предприятия. Работники не несут никаких расходов по финансированию охраны труда.

Состояние условий труда и охраны труда существенно влияет на экономические показатели деятельности предприятия [1].

Таблица 4 – Расходы на охрану труда за 2018-2020 года

№	Наименование мероприятий	Расходы за 2018 г., тыс. рублей	Расходы на 2019 год, тыс. рублей	Расходы на 2020 год, тыс. рублей
1	Обеспечение работников спецодеждой, спецобувью и другими средствами индивидуальной защиты.	1229	1972,00	1550
2	Предоставление работникам льгот и компенсаций по условиям труда (доплата за вредность)	509,23	1002,83	1522,83
3	Обеспечение работников специпитанием или равноценными продуктами за вредные условия труда	942,40	272,24	310,669
4	Страхование работников от несчастных случаев на производстве и профзаболеваний	459,99	578,12	799,337
5	Проведение СУОТ (аттестации рабочих мест по условиям труда)	450	10	5

Окончание таблицы 4 – Расходы на охрану труда за 2018-2020 года

№	Наименование мероприятий	Расходы за 2018 г., тыс. рублей	Расходы на 2019 год, тыс. рублей	Расходы на 2020 год, тыс. рублей
6	Проведение ежегодных и периодических медицинских осмотров работников с оформлением паспорта здоровья.	210	350	175
7	Обследование работников, занятых во вредных условиях труда в проф. центре	0	0	0
8	Санаторно-курортное лечение оздоровление работников отрасли.	230	177	0
9	Приобретение нормативно-правовых актов и методических пособий по охране труда.	5	5	5
10	Оснащение кабинетов по охране труда.	25,702	15,39	15
11	Обучение по охране труда и проверка знаний требований охраны труда	10	15	20
12	ИТОГО:	4,071322	4,396750	4,402836

В среднем на мероприятия по охране труда ежегодно тратится около 4 000 тысяч рублей. В соответствии со статьей 226 Трудового кодекса Российской Федерации работодатели финансируют мероприятия по улучшению условий труда и охраны труда в размере не менее 0,2 процента от стоимости производства продукции (работ, услуг). Для ОАО «Телен» этот процент составляет примерно 250 тысяч.

### Заключение

Следует отметить, что действующий карьер «Харбалахский» маломощный, он обеспечивает углем в населенных пунктах Таттинский и Чурапчинский улусы.

На протяжении всего периода деятельности компании комплексно решают вопросы повышения производительности труда за счет внедрения нового оборудования и новых технологий, модернизации производства, улучшения здоровья сотрудников, создания благоприятного морально-психологического климата в едином коллективе.

Социальная составляющая бизнеса достойна внимания, она выражается в значительных затратах на улучшение здоровья сотрудников и подрастающего поколения, обучение специалистов, дает уверенность в будущем сотрудников.

Компания постоянно сотрудничает с производителями для улучшения параметров горнотранспортного оборудования и адаптации его к сложным горно-геологическим и суровым климатическим условиям Якутии [14].

На основе выполненного анализа предлагаются наиболее важные мероприятия улучшения состояния безопасности на Харбалахском угольном предприятии ОАО «Телен»:

- Один раз в квартал проводить повторное обучение и проверку знаний работников и должностных лиц требований системы управления охраной труда.

- Посещать вебинары ведущих международных и отечественных организаций по охране труда.

- Не реже 2 раз в месяц проводить организационно-техническое обучение инженеров и техников по охране труда и эксплуатации нового оборудования

- . Ежедневно разъяснять рабочим план ликвидации аварий и аварийных выходов из шахты.

- Обеспечение профессиональной переподготовки, повышение квалификации специалистов, качества обучения горнорабочих безопасным приемам работ;

- Руководство горных предприятий должно осуществлять программу обеспечения в области безопасности труда шахтеров, распределять ответственность, полномочие руководителей, разного уровня лиц, управляющих, выполняющих и проверяющих работы в этой сфере, доводить ее до всех работников;

- Обеспечение приоритета безопасности на всех производственных процессах своевременно принятие управленческие решения по обеспечению безопасности горнорабочих

- Идентификация профессиональных рисков на объектах угледобычи, определение их характера и масштаба

- Обеспечение неотвратимости наказания за нарушения требований правил безопасности, повышение трудовой дисциплины, культуры производства

- Усиление надзора за потенциально опасными объектами и профилактики аварий и чрезвычайных ситуациях

- Повышение качества проектно-технологических документации, выполнения требований паспортов крепления и проведения выработок

Главное – нужна постоянная забота о здоровье и благополучие человека труда. Любой травматизм и профессиональные заболевания можно предупредить, устранить или свести до минимума.[12], [14], [15]

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

**Список литературы / References**

1. Акимов В.А. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В.А.Акимов, В.В.Лесных, Н.Н. Радаев. - М.: Деловой Экспресс, 2004.-352 с.
2. Артемьев В.Б. Организационный аспект обеспечения безопасности уголедобычи / В.Б. Артемьев, В.А Галкин. – Уголь, 2009. - №7. - С. 20-22.
3. Галкин А.В. Система обеспечения безопасности производства: компетический подход / А.В. Галкин, М.Г. Голубев, И.Л. Кравчук. - Ваша безопасность: Информационно-аналитический бюллетень, 2002. - № 7(3). - С. 12-17.
4. Правила организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте. – [Электронный ресурс] URL: <https://www.ruspromexpert.ru/law/449/594.html> (дата обращения 13.11.2020).
5. Лисовский В.В. Об оперативном управлении рисками травмирования персонала: удержание опасностей производственной ситуации наприемлимом уровне риска / В.В Лисовский, В.Ю Грешин, И.Л.Кравчук, А.В Галкин. – Уголь, 2013. - №11.
6. Об утверждении порядка обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда работников организаций. - Справочник по законодательству «Наука, законодательство и право». – [Электронный ресурс] URL: <https://elementy.ru/Library6/p1.htm>. (дата обращения 13.11.2020)
7. Постановление Минтруда РФ и Минобразования РФ от 13.01.2003 N 1/29 «Об утверждении Порядка обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда работников организаций» (с изменениями и дополнениями). – ГАРАНТ. - [Электронный ресурс] URL: <http://base.garant.ru/185522/>. (дата обращения 13.11.2020)
8. Волков Н.И. Разграничение ответственности персонала при обеспечении безопасных условий / Н.И Волков, А.А Дружинин, М.Г. Голубев. - Безопасность труда в горнодобывающей промышленности, 2005. - №12. - С. 31-33.
9. Короткий А.А. Риск – ориентированный подход к организации надзорной деятельности в области промышленной безопасности / А.А. Короткий, А.А. Кинжибалов, А.В. Панфилов, Д.А. Курилкин. - Безопасность труда в промышленности, 2016. - №2. - С. 58-63.
10. РД 04-355-00 Методические рекомендации по организации производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах. –[Электронный ресурс] URL: <http://www.gosthelp.ru/text/RD0435500Metodicheskierrek.html>. (дата обращения 13.11.2020)
11. Ст. 226 ТК РФ. Финансирование мероприятий по улучшению условий и охраны труда. – [Электронный ресурс] URL: <https://rulaws.ru/tk/CHAST-TRETYA/Razdel-X/Glava-36/Statya-226/>. (дата обращения 13.11.2020)
12. Чемезов Е.Н. Безопасность ведения открытых горных работ / Е.Н. Чемезов. - М: Недра, 2008. - 290 с.
13. Чемезов Е.Н. Безопасность подземных горных работ / Е.Н. Чемезов. – Якутск: Изд-во СВФУ, 2010. - 35 с.
14. Чемезов Е.Н. Безопасность производства на предприятиях РС(Я) / Е.Н. Чемезов, Н.И .Андреев, С.Е. Чемезова. - Горный журнал, 2016. - №9. - С. 91-95.
15. Чемезов Е.Н. Вопросы безопасности в техносфере РС(Я) / Чемезов Е.Н. - Якутск: Изд-во СВФУ, 2013. - С.10-38.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Akimov V. A. Riski v prirode, tekhnosfere, obshhestve i ehkonomike [Risks in Nature, Technosphere, Society and Economy] / V.A.Akimov, V.V.Lesnykh, N.N. Radaev. - М.: Delovoj Ehkspress, 2004.- 352 p. [in Russian]
2. Artem'ev V.B. Organizacionnyj aspekt obespechenija bezopasnosti ugledobychi [Organizational Aspect of Ensuring the Safety of Coal Mining] / V.B. Artem'ev, V.A Galkin. – Ugol' [Coal], 2009. - No. 7. - pp. 20-22 [in Russian]
3. Galkin A.V. Sistema obespechenija bezopasnosti proizvodstva: kompeticheskij podkhod [System of Ensuring Production Safety: Competency Approach] / A.V. Galkin, M.G. Golubev, I.L. Kravchuk. - Vasha bezopasnost': Informacionno-analiticheskij bjulleten' [Your Security: Information and Analytical Bulletin], 2002. - No. 7(3). - pp. 12-17 [in Russian]
4. Pravila organizacii i osushhestvlenii proizvodstvennogo kontrolja za sobljudeniem trebovanij promyshlennoj bezopasnosti na opasnom proizvodstvennom ob'ekte [Rules for the Organization and Implementation of Production Control Over Compliance With Industrial Safety Requirements at a Hazardous Production Facility] [Electronic resource] – URL: <https://www.ruspromexpert.ru/law/449/594.html> (accessed 13.11.2020) [in Russian]
5. Lisovskij V.V. Ob operativnom upravlenii riskami travmirovaniya personala: uderzhanie opasnostej proizvodstvennoj situacii napriemlimom urovne riska [On Operational Risk Management of Personnel Injury: Keeping the Hazards of the Production Situation at an Acceptable Level of Risk] / V.V Lisovskij, V.Ju Greshin, I.L.Kravchuk, A.V Galkin. – Ugol' [Coal], 2013. - №11 [in Russian]
6. Ob utverzhdenii porjadka obuchenija po okhrane truda i proverki znaniij trebovanij okhrany truda rabotnikov organizacij [On the Approval of the Order of Training on Labor Protection and Verification of Knowledge of Requirements of Labor Protection of Employees of the Organizations] [Electronic resource]. - Spravochnik po zakonodatel'stvu «Наука, zakonodatel'stvo i pravo» [Reference Book on Legislation "Science, Legislation and Law"] – URL: <https://elementy.ru/Library6/p1.htm> (accessed 13.11.2020) [in Russian]
7. Postanovlenie Mintruda RF i Minobrazovaniya RF ot 13.01.2003 N 1/29 «Ob utverzhdenii Porjadka obuchenija po okhrane truda i proverki znaniij trebovanij okhrany truda rabotnikov organizacij» (s izmenenijami i dopolnenijami) [The Resolution of Ministry of Labor and Ministry of Education of the Russian Federation Dated 13.01.2003 N 1/29 "on Approval of Order of Training on Labour Protection and Checks of Knowledge of Requirements of Labor Protection of Employees of Organizations" (With Changes and Additions)] [Electronic resource] – GARANT. - URL: <http://base.garant.ru/185522/> (accessed 13.11.2020) [in Russian]
8. Volkov N.I. Razgranichenie otvetstvennosti personala pri obespechenii bezopasnykh uslovij [Delineation of Personnel Responsibility in Ensuring Safe Conditions] / N.I Volkov, A.A Druzhinin, M.G. Golubev. - Bezopasnost' truda v gornodobyvajushhejj promyshlennosti [Labor Safety in the Mining Industry], 2005. - No.12. - pp. 31-33 [in Russian]

9. Korotkijj A.A. Risk – orientirovannyj podkhod k organizacii nadzornoj dejatel'nosti v oblasti promyshlennoj bezopasnosti [Risk-Oriented Approach to the Organization of Supervisory Activities in the Field of Industrial Safety] / A.A. Korotkijj, A.A. Kinzhibalov, A.V. Panfilov, D.A. Kurilkin. - Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Labor Safety in Industry], 2016. - №2. - pp. 58-63 [in Russian]
10. RD 04-355-00 Metodicheskie rekomendacii po organizacii proizvodstvennogo kontrolja za sobljudeniem trebovanij promyshlennoj bezopasnosti na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh [Methodological Recommendations for the Organization of Production Control Over Compliance With Industrial Safety Requirements at Hazardous Production Facilities] [Electronic resource] – URL: <http://www.gosthelp.ru/text/RD0435500Metodicheskie.html> (accessed 13.11.2020) [in Russian]
11. St. 226 TK RF. Finansirovanie meroprijatij po uluchsheniju uslovijj i okhrany truda. [Article 226 of Labor Code of the Russian Federation. Financing of Measures to Improve Working Conditions and Occupational Safety] [Electronic resource] – URL: <https://rulings.ru/tk/CHAST-TRETYA/Razdel-X/Glava-36/Statya-226/> (accessed 13.11.2020) [in Russian]
12. Chemezov E.N. Bezopasnost' vedenija otkrytykh gornyx rabot [Safety of Conducting Open-Pit Mining Operations] / E.N. Chemezov. - M: Nedra, 2008. - 290 p. [in Russian]
13. Chemezov E.N. Bezopasnost' podzemnykh gornyx rabot [Safety of Underground Mining Operations] / E.N. Chemezov. – Yakutsk: SVFU Publishing house, 2010. - 35 p. [in Russian]
14. Chemezov E.N. Bezopasnost' proizvodstva na predpriyatiyakh RS(Ja) [Production Safety at Enterprises of the Republic of Sakha (Yakutia)] / E.N. Chemezov, N.I. Andreev, S.E. Chemezova. - Gornyy zhurnal [Mining Magazine], 2016. - №9. - pp. 91-95 [in Russian]
15. Chemezov E.N. Voprosy bezopasnosti v tekhnosfere RS(Ja) [Safety Issues in the Technosphere of the Republic of Sakha (Yakutia)] / Chemezov E.N. - Yakutsk: SVFU Publishing house, 2013. - pp. 10-38 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.024>**ПОЛУЧЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СВИНЦОВОГО БАББИТА, АРМИРОВАННОГО КВАЗИКРИСТАЛЛАМИ  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$** 

Научная статья

**Юдин Г.А.<sup>1</sup>, Абузин Ю.А.<sup>2</sup>, Тюрина С.А.<sup>3,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6671-1337;<sup>1,3</sup> Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Россия;<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (tyurina\_s[at]mirea.ru)

**Аннотация**

Баббиты представляют собой мягкие антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе применяемые в узлах трения скольжения транспортных и энергетических установок. Серьезным недостатком баббитов, ограничивающим их применение, является низкая усталостная прочность.

В работе рассматривается возможность создания антифрикционного композиционного материала, армированного частицами квазикристалла (КК) системы Al-Cu-Fe жидкофазной технологией, существенно отличающегося от широко используемых антифрикционных материалов на основе свинца (баббитов), своими повышенными механическими характеристиками при сохранении низкого уровня коэффициента трения.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, квазикристаллы, баббиты, трибологические свойства, антифрикционные материалы, жидкофазная технология.

**OBTAINING AN ANTI-FRICTION COMPOSITE MATERIAL BASED ON LEAD BABBITT REINFORCED WITH  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$  QUASICRYSTALS**

Research article

**Yudin G.A.<sup>1</sup>, Abuzin Yu.A.<sup>2</sup>, Tyurina S.A.<sup>3,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6671-1337;<sup>1,3</sup> MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia;<sup>2</sup> National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

\* Corresponding author (tyurina\_s[at]mirea.ru)

**Abstract**

Babbitt metals are soft anti-friction alloys based on tin or lead that are used in the sliding friction units of transport and power plants. A serious disadvantage of babbitts, which limits their use, is the low fatigue limit.

The paper considers the possibility of creating an anti-friction composite material reinforced with quasicrystal particles of the Al-Cu-Fe system by liquid-phase technology, which significantly differs from the widely used anti-friction materials based on lead (babbitts) because of an increase in its mechanical characteristics while maintaining a low level of friction coefficient.

**Keywords:** composite materials, quasicrystals, babbitts, tribological properties, anti-friction materials, liquid-phase technology.

**Введение**

В связи с активным развитием современной техники существует потребность в создании материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред и высоких давлений. Одним из эффективных путей решения этой задачи является создание композиционных материалов, которые, как известно, состоят из матрицы и распределенных в ней армирующих элементов, благодаря чему композиционные материалы приобретают качественно новые, зачастую уникальные свойства [1], [2].

Следует отметить, что разработка новых композиционных материалов является, в настоящее время, ключевым направлением развития современного материаловедения.

Разрабатываемый материал существенно отличается от широко используемых антифрикционных материалов на основе свинца (баббитов), своими повышенными механическими свойствами при сохранении низкого уровня коэффициента трения. Всё это достигается благодаря уникальным свойствам квазикристалла: низкие поверхностная энергия, коэффициент трения и абразивная способность, высокие антиприхватывающие свойства, твердость и термостабильность [3], [4].

Антифрикционные свойства баббитов соответствуют требованиям для работы в высоконагруженных узлах трения [5], [6], [7], но постоянное увеличение нагрузок на узлы трения вынуждает отказываться от использования баббитов из-за их низких механических свойств. Эффективным способом повышения служебных свойств этих сплавов является их дискретное армирование высокопрочными фазами различной природы, морфологии и размера.

Введение квазикристалла (КК) в матрицу из баббита позволит создать опорный каркас баббита, обладающий собственными антифрикционными свойствами, что повысит ресурс и работоспособность нового материала как в традиционных областях применения баббитов, так и в высоконагруженных узлах трения новой техники.

КК-структуры представляют собой новый класс аperiодических структур, характеризующихся наличием дальнего порядка и отсутствием трансляционной симметрии. Благодаря своим особенностям локальной атомной и электронной структуры КК имеют низкие теплопроводность, электронный вклад в удельную теплоемкость, а также низкий коэффициент трения, следует отметить, что для КК системы Al-Cu-Fe характерна твердость сопоставимая с твердостью корунда, но не имеет высокой абразивной способности.

Таким образом, создание материала, обладающего низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью и высокой удельной прочностью, является весьма перспективно для их использования в узлах трения в приборостроении.



В работе рассматривается возможность создания антифрикционного композиционного материала, армированного частицами квазикристалла системы Al-Cu-Fe жидкофазной технологией, который имеет повышенные механические характеристики при малом коэффициенте трения.

### Экспериментальная часть

В качестве упрочняющей фазы композиционного материала (КМ) использовали квазикристаллы  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$  с твердостью не менее 7 ГПа, а в качестве матричного сплава баббит типа Б16. Матричный Б16 имеет предел прочности при сжатии 147 МПа, предел текучести при сжатии 84 МПа и относительное сжатие 14,7%, Рабочая температура материала Б16 при работе в подшипнике может достигать 70 С [8].

На рис. 1 представлена картина фотоснимка поверхности образца баббита Б16, где видна его микроструктура, которая состоит из граненых кристаллов олова и сурьмы ( $\beta$ -фаза светлые области) на фоне пестрой структурной составляющей с ярко выраженным эвтектическим строением ( $\gamma$ -фаза темная).

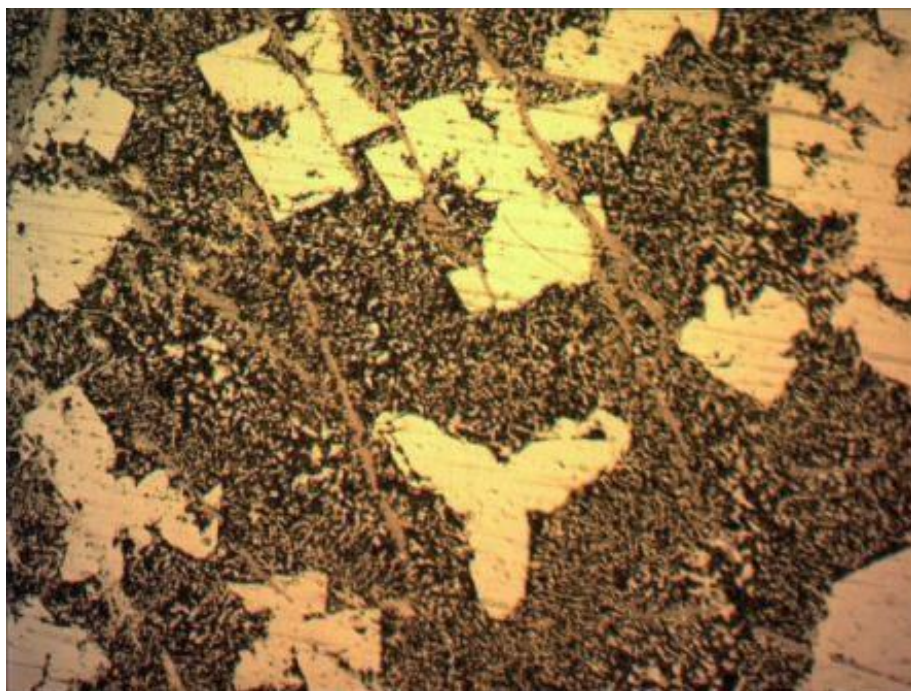


Рис. 1 – Микроструктура баббита (увеличение - x200)

Для пропитки порошка КК состава  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$  расплавом баббита Б16 применялся метод принудительной пропитки на гидравлическом прессе. Диаметр внутренней полости матрицы 10 мм при глубине 52 мм. В качестве армирующего наполнителя использовался полидисперсный порошок КК с основной фракцией в диапазоне 1...5 мкм. Пропитка осуществлялась, при температуре расплава Б16  $P_{пр.}$  470 °С и температуре матрицы  $P_{мат.}$  330°С.

В процессе работы в узле трения скольжения при вращения стального вала подшипника антифрикционный материал баббит Б16 испытывает достаточно большие динамические нагрузки на сжатие. Поэтому определялись физико-механические свойства КМ баббит Б16 -  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$  на сжатие. Испытания проводились на испытательной машине типа ДТС-06-50. Все образцы разрушались, как хрупкий материал, при этом не наблюдалась заметная их пластическая деформация. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические параметры КМ при испытании на сжатие

Материал образца	Предел прочности при сжатии $\sigma_{в}$ , МПа	Предел текучести при сжатии $\sigma_{т}$ , МПа	Твердость по Бринеллю НВ	Относительное сжатие $\epsilon$ , %.
Баббит Б16 ГОСТ 1320-74	147	84	30	14,7
КМ Б16 - $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$	210	186	72	4,3

Также в работе определялась твердость КМ, которая составила 72 НВ.

Из результатов механических испытаний видно, предел прочности при сжатии повысился на 42 %, предел текучести при сжатии и твердость увеличились более чем в два раза, а относительное сжатие  $\chi$  снизилось практически в 3,5 раза.

Следует отметить, что структура КМ, армированного порошком КК, закладывается на начальном этапе засыпки порошка и зависит от размера, количества и характера распределения частиц КК в материале.

Учитывая, что объем баббита Б16 был в три раза больше объема порошка КК, пропитка материала протекала полностью. Композиционный материал имеет две макрообласти (рис. 2):

- 1) образовавшийся КМ;
- 2) избыток чистого баббита марки Б16.

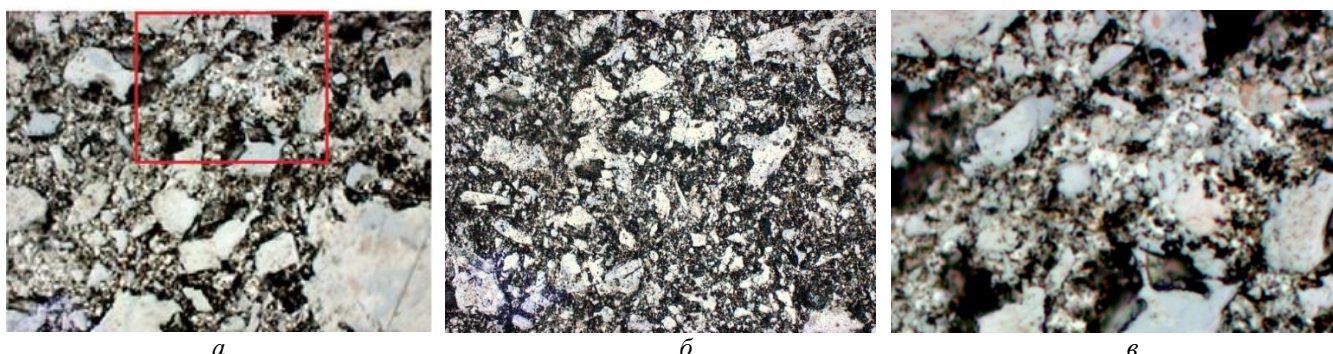
Рис. 2 – Граница КМ - баббит (увеличение -  $\times 100$ )

Известно, что баббит Б16 является широкоинтервальным сплавом с температурой плавления  $240...410\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температуре  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$  начинается расплавление эвтектики, а далее с повышением температуры начинают расплавляться более тугоплавкие фазы. Однако при температуре  $410\text{ }^{\circ}\text{C}$  полного расплавления тугоплавких фаз не происходит [9]. Таким образом, в расплаве частично присутствуют некоторая часть включений твердых тугоплавких фаз, которые практически не оказывают влияния на жидкотекучесть расплава. Полное растворение компонентов в сплаве происходит только при температуре  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Поскольку температура плавления  $\beta$ -фазы ( $\text{SnSb}$ ) составляет  $425\text{ }^{\circ}\text{C}$  [10], то при такой температуре заливки твердые кристаллы  $\beta$ -фазы неизбежно частично отфильтровываются на границе каркаса из КК. Особые температурные режимы кристаллизации в зоне баббит-КК дают возможность интенсивного роста количества кристаллов  $\beta$ -фазы. Причем изменение температуры заливки приводит к интенсивному росту кристаллов при практически полном заполнении границы раздела (рис. 2).

Следует отметить, что изменение температурных режимов приводит к измельчению кристаллов  $\beta$ -фазы на границе раздела баббит-КМ.

На рис. 3 представлена картина изображения микроструктуры поверхности полученных образцов композиционного материала. Здесь на фотоснимках (Рис. 3, а, б) четко просматривается каркасная структура КМ с дефектами материала в виде пустот. Большинство пустот формировались также в процессе подготовки исследуемого образца (механической шлифовки), из-за того, что в этих пустотах были собраны конгломераты с достаточно плотной упаковкой из мелких частиц. Такая упаковка не позволила обеспечить пропитку этих конгломератов. Известно, что объемную долю наполнителя от 70 % и более достаточно сложно пропитать расплавом.

Рис. 3 – Микроструктура полученного композиционного материала: а, б - микроструктура КМ баббит Б16 -  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$   $\times 1000$ ; в - кристаллы  $\beta$ -фазы ( $\text{SnSb}$ )  $\times 1000$ , укрупнение 200 %

На рис. 3 в отчетливо просматриваются кристаллы  $\beta$ -фазы ( $\text{SnSb}$ ) размерами  $1...3\text{ мкм}$ , а игольчатые кристаллы интерметаллида  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  практически не визуализируются. Это говорит о том, что условия кристаллизации, после пропитки, были таковы что кристаллы  $\beta$ -фазы образовались повсеместно, во всем объеме, а последующая кристаллизация расплава происходила быстро и квазикристаллы не получили возможности роста. Объемная доля частиц КК в КМ составила около 67 %. Учитывая, что  $\beta$ -фаза и интерметаллид являются естественной упрочняющей фазой баббита Б16 с твердостью 100 МПа и 570 МПа соответственно, они также будут являться элементом каркасной



структуры КМ. Поэтому, принимая в расчет объемную долю этих кристаллов, процентное содержание армирующих элементов увеличилось до 75...80 %.

Коэффициент трения на сухую сталь о баббит в зависимости от марки и химического состава баббита (оловянные или свинцовистые) колеблется от 0,14 до 0,21 [11]. Коэффициент сухого трения КК составляет 0,2.

Исследования на трение проводились на установке, обеспечивающей возвратно-поступательные движения образца по подложке, в качестве пары трения к КМ баббит Б16 -  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$  с размерами частиц 5...10 мкм, использовалась закаленная сталь марки 40ХН, нагрузка на образец составляла  $P = 7$  кг.

В результате проведенных испытаний был определен коэффициент трения, значение которого составило 0,2. Так после приработки пары трения в контакте работали частицы КК и сталь марки 40ХН.

### Заключение

Согласно полученным экспериментальным данным можно сделать вывод, что полученные антифрикционные композиционные материалы на основе свинцового баббита, армированного КК  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{22}\text{Fe}_{13}$  по антифрикционным свойствам не уступают свинцовым баббитам, а в ряде случаев и превышают их.

Композиционные материалы на основе баббита, армированные частицами квазикристаллов обладают повышенной износостойкостью особенно в высоконагруженных узлах трения. Такой материал может заменить использующийся в настоящее время оловянный баббит, который используется в узлах трения при больших нагрузках и высоких скоростях скольжения.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Анциферов В.Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. // М.: Металлургия, 1987, 792 стр.
2. Абузин Ю.А. Функциональные металлические композиционные материалы и технологии в машиностроении. / Ю.А. Абузин // Материалы в машиностроении, 2009 № 6(69), с. 52-54.
3. Dubois J.-M. Properties and applications of quasicrystals and complex metallic alloys / J.-M. Dubois // Chem. Soc. Rev. - 2012. - No 41. - P. 4760-6777.
4. Trebin H. R. Quasicrystals. Structure and properties. / H. R. Trebin // Weinheim: Wiley: VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. - 665 p.
5. Черновол М.И. Способы формирования антифрикционных покрытий на металлические поверхности трения. / М.И. Черновол, И.В. Шепеленко // Техника в сельскохозяйственном производстве, автоматизация. 2012. № 7, стр. 25-27. ч.1.
6. Зелинский В.В. Обоснование и разработка новой триботехнологии для антифрикционных материалов. / В.В. Зелинский, Д.Н. Сучилин // Литье и металлургия. 2015, №3, стр. 32-36.
7. Тарельник В.Б. Прирабочные покрытия подшипников скольжения. / В.Б. Тарельник, Б. Антошевский, В.С. Марцинковский // Вестник ХНТУСГ им. П. Василенко. Выпуск №159, 2015. стр. 90-104.
8. ГОСТ 1320-74. Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001
9. Шайтура Д. С. Композиты, армированные квазикристаллическими частицами  $\text{Al-Cu-Fe}$ , с медной матрицей и их трибологические свойства. / Д. С. Шайтура, А. А. Теплов, Е. А. Чикина и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2010, № 11, стр. 1-5.
10. Арзамасов Б.Н. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьёва, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Арзамасова Б.Н., Соловьёвой Т.В. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н.Э., 2005.- 640 с.
11. Машков Ю.К. Трение и модифицирование материалов трибосистем. / Ю.К. Машков, К.Н. Полещенко, П.В. Орлов // М. Наука, 2000. - 280 стр.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Anciferov V.N. Poroshkovaya metallurgiya i napylenyye pokrytiya [Powder Metallurgy and Sprayed Coatings]. / V.N. Anciferov, G.V. Bobrov, L.K. Druzhinin et al. // М.: Metallurgiya, 1987, 792 p. [in Russian]
2. Abuzin Ju.A. Funkcional'nye metallicheskie kompozicionnye materialy i tekhnologii v mashinostroenii [Functional Metal Composite Materials and Technologies in Mechanical Engineering]. / Ju.A. Abuzin // Materialy v mashinostroenii, 2009 № 6(69), pp. 52-54. [in Russian]
3. Dubois J.-M. Properties and applications of quasicrystals and complex metallic alloys / J.-M. Dubois // Chem. Soc. Rev. - 2012. - No 41. - P. 4760-6777.
4. Trebin H. R. Quasicrystals. Structure and properties. / H. R. Trebin // Weinheim: Wiley: VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. - 665 p.
5. Chernovol M.I. Spособy formirovaniya antifrikcionnykh pokrytij na metallicheskie poverkhnosti treniya [Methods of Forming Antifriction Coatings on Metal Friction Surfaces]. / M.I. Chernovol, I.V. Shepelenko // Tekhnika v sel'skokhozjajstvennom proizvodstve, avtomatizacija [Technique in Agricultural Production, Automation]. 2012. № 7, pp. 25-27. ch.1. [in Russian]
6. Zelinskij V.V. Obosnovanie i razrabotka novoj tribotekhnologii dlja antifrikcionnykh materialov [Justification and Development of New Tribotechnologies for Antifriction Materials]. / V.V. Zelinskij, D.N. Suchilin // Lit'jo i metallurgija [Casting and Metallurgy]. 2015, №3, pp. 32-36. [in Russian]
7. Tarel'nik V.B. Prirabotochnye pokrytiya podshipnikov skol'zhenija [The Running-in Coating Bearings]. / V.B. Tarel'nik, B. Antoshevskij, V.S. Marcinkovskij // Vestnik KhNTUSG im. P. Vasilenko [Bulletin of Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture]. Volume №159, 2015. pp. 90-104. [in Russian]

8. GOST 1320-74. Babbity olovjannye i svincovyje. Tekhnicheskie uslovija. [Tin and lead babbits. Technical Conditions.] M.: IPK standart publishing house, 2001 [in Russian]
9. Shajjtura D. S. Kompozity, armirovannye kvazikristallichesкими chasticami Al–Cu–Fe, s mednoj matricej i ikh tribologicheskie svojstva [Composites Reinforced With Quasicrystalline Al–Cu–Fe Particles With a Copper Matrix and Their Tribological Properties]. / D. S. Shajjtura, A. A. Teplov, E. A. Chikina et al. // Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i nejtronnye issledovanija [Surface. X-Ray, Synchrotron and Neutron Studies], 2010, № 11, pp. 1–5. [in Russian]
10. Arzamasov B.N. Spravochnik po konstrukcionnym materialam: Spravochnik [Handbook of Structural Materials] / B.N. Arzamasov, T.V. Solov'jova, S.A. Gerasimov et al.; Edited by Arzamasov B.N., Solov'jova T.V. – M.: publishing house of MGTU im. Baumana N.Eh., 2005.- 640 p. [in Russian]
11. Mashkov Ju.K. Trenie i modifizirovanie materialov tribosistem [Friction and Modification of Tribosystem Materials]. / Ju.K. Mashkov, K.N. Poleshenko, P.V. Orlov // M. Nauka, 2000. - 280 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.025>**СОЗДАНИЕ КОМФОРТНОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ МАЛОГАБАРИТНОГО ЖИЛЬЯ**

Научная статья

**Пермяков М.Б.<sup>1</sup>, Краснова Т.В.<sup>2,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5685-4118;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1213-9005;<sup>1, 2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

\* Корреспондирующий автор (toma.krasnova.70[at]mail.ru)

**Аннотация**

Создание комфортной среды является многоплановой проблемой. Необходимость превращения малого по площади жилого пространства малогабаритной квартиры в полноценное, компактное, удобное жилье, которое должно соответствовать современным требованиям комфорта и уюта – актуальная задача для современных архитекторов и дизайнеров. Приведенные в статье разнообразные подходы и авторские концепции в данной области демонстрируют свою состоятельность, как с точки зрения обеспечения физического комфорта, так и с точки зрения формирования психологического комфорта. В статье авторы приходят к выводу, что гармония, комфорт и уют – факторы, которые позволяют рассматривать малогабаритное жильё не просто как вынужденный экономичный вариант существования, а как полноценный способ организации жизни в соответствии с современной Концепцией разумного потребления.

**Ключевые слова:** комфортная среда, малогабаритное жильё, концепция, дизайн, архитектура.

**CREATING A COMFORTABLE ENVIRONMENT IN SMALL-SCALE APARTMENTS**

Research article

**Permyakov M.B.<sup>1</sup>, Krasnova T.V.<sup>2,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5685-4118;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1213-9005;<sup>1, 2</sup> G. I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

\* Corresponding author (toma.krasnova.70[at]mail.ru)

**Abstract**

Creating a comfortable environment is a multifaceted problem. The need to transform a small living space into a full-fledged, compact, comfortable apartment that meets the modern comfort requirements is a relevant task for modern architects and designers. The various approaches and individual concepts in this area demonstrate their consistency from the point of view of providing both physical and mental comfort. The authors of the article come to the conclusion that harmony and comfort are key factors that allow for the consideration of small-scale apartments not only as an economically forced decision but as a full-fledged way of organizing life in accordance with the modern concept of reasonable consumption.

**Keywords:** a comfortable environment, small-scale apartment, concept, design, architecture.

**Введение**

Жилищная проблема по-прежнему остаётся актуальной на сегодняшний день во многих странах мира, что заставляет искать пути её решения, в том числе и путём уменьшения площади жилого пространства [1]. Актуальность темы создания проектов малогабаритного жилья продемонстрирована мировым опытом. Наглядным примером является Гонконг, с постоянно увеличивающейся численностью населения и большими ценами на недвижимость. Специалисты – архитекторы предлагают вариант создания новой типологической структуры малогабаритного жилья, «...которая позволит решать проблемы расселения людей и создаст полноценную, комфортную жилую среду. Есть радикальные примеры, как вариант Гонконгской студии James Law Cyberecture, демонстрирующий проект микро-жилья в бетонных трубах, трансформированных в дом шириной 2,5 м и площадью 9,29 м<sup>2</sup>» [2]. Предполагается размещение таких блоков в промежутках между городскими строениями. Архитекторы фирмы Affect-T спроектировали вариант временного жилья для людей, находящихся в сложной ситуации. Это бамбуковый жилой двухэтажный блок, который может устанавливаться в заброшенных фабриках и на неэксплуатируемых складах. Проект микро-жилья (квартира-студия площадью 14 м<sup>2</sup> с высотой потолка 3,7 м.) включает в себя спальное место, ванную комнату, кухонное оборудование, кладовую и скрытое пространство для хранения [2].

В России тема малогабаритного жилья тоже имеет своё развитие. Актуальность ситуации влияния потребительского спроса на сбытовую перспективность очевидна. В контексте неё так же нужно рассматривать технические и материальные возможности застройщика (генерального подрядчика). Еще десятилетие назад Языджян А.З. в ходе исследования, выявил, что суммарно, «...лишь 7% респондентов востребовали рыночные услуги по ремонту и новому строительству, так называемого, «элитного жилья», и «что наиболее многочисленные потребительские притязания граждан связаны с нуждаемостью 22,7% населения российских мегаполисов в улучшенном ремонте (включая переделку старых лоджий, смежных санузлов, тесных кухонь, тёмных прихожих и т.д.) типовых малогабаритных пятиэтажных домов постройки 60 годов XX века («хрущёвок»)» [3].

Несмотря на стремление специалистов к созданию уникальных жилых зданий с просторными комфортабельными квартирами, очевидна необходимость в строительстве доступного массового малометражного жилья. «В обстановке постоянного повышения уровня цен на квартиры создаются условия, в которых для некоторой части граждан малометражное жильё – единственный способ обзавестись собственной жилой площадью» [4]. Компактное жильё

малой площади – в границах 26–30 м<sup>2</sup> может эргономично включать: прихожую, кухню, совмещенный санузел с ванной или душевой кабиной, жилую комнату.

### Основная часть

В условиях строительства массового малометражного жилья чаще всего проявляются следующие закономерности: территориальное размещение за пределами географического центра города и на периферии, высокая плотность жилой застройки, развитая инфраструктура жилых районов, вариантность планировочных решений малометражных квартир, эстетическое качество жилой среды. Квартиры небольших размеров, так называемое «малогабаритное жилье», – это сравнительно новая концепция, изменяющая наши традиционные представления о жилом пространстве [1]. В понятие малогабаритное жилье исследователями Генераловым В. П., Петровой Е. А., Чернышевой И. В. предлагается включать два крупных типологических элемента: малометражное жилье и мини-жилье, а в типологической структуре мини-жилья, они выделяют три элемента: капсульное жилье, микро-жилье и мини-жилье [5]. Авторы предлагают градацию площадей между капсульным, микро- и мини-жильем (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Предлагаемая классификация малогабаритного жилья

Малогабаритное жилье			
Мини жилье			Малометражное жилье
капсульное	микро	мини	min 26 м <sup>2</sup>
2 – 8 (м <sup>2</sup> )	9 - 15 (м <sup>2</sup> )	16 – 25 (м <sup>2</sup> )	

Как только на рынке недвижимости появились мини-квартиры площадью 8-12 м<sup>2</sup> российские дизайнеры и архитекторы, уловив новые веяния, начали работу по созданию тщательно организованного пространства, специального дизайна мебели и инженерного оборудования. Например, дизайнер Гримович Ирина в своём проекте «Концепция проекта интерьера для малогабаритной квартиры и многофункционального кафе» демонстрирует, что создание доступного и удобного жилья для молодых семей и студентов, а также других социальных групп достигается небольшим метражом квартир, что позволяет существенно уменьшить цену. Продуманное зонирование и планировка, применение механизмов и способов трансформации систем мебели обеспечивает рациональное использование ограниченных ресурсов жилой площади и, вместе с тем, создаёт комфортные условия для каждого члена семьи [6].

«Проблема создания комфортной среды средствами архитектуры и дизайна, соответствующей потребностям современного человека, является многоплановой. При рассмотрении современных архитектурно-дизайнерских подходов можно прийти к выводу, что функция архитектуры поддерживается не только технологическими возможностями современного строительства, эргономикой и экологической безопасностью. Немаловажным является образно-идейная основа, транслирующая индивидуальность автора, его представление об «идеальном» в существующей действительности» [7]. «Существуют разнообразные подходы и авторские концепции в современном архитектурном творчестве, которые позволяют строительной отрасли постоянно развиваться и удовлетворять потребности современного человека» [8], [9]. «Формирование визуальной идеи - основы стиля, отраженного как в архитектуре зданий, малых архитектурных объектах, так и в предметах дизайна – гарантия создания гармоничного пространства, комфортного для проживания как с эстетической точки зрения, с точки зрения эргономики, так и функционально воспитательной, формирующей мировоззрение» [10]. «Комфорт архитектурной среды – это удовлетворение потребностей человека в архитектурной среде, которая, в первую очередь, должна обеспечить условия для его физического и психологического выживания. Конфигурация пространства между объектами и человеком (параметры, расстояния, объёмы), его освещение, цветовая гамма и текстура поверхностей – это те факторы, которые формируют восприятие среды и определяют её как комфортную или дискомфортную...» [11]. Сопутствующим понятием «комфарту» является «уют». По толковому словарю Ожегова: «Уют — это удобный порядок, приятная устроенность быта, обстановки» [12]. В ходе своего исследования Плыгун Г.В. и Васильева Н.А., выявляют следующие причины неуютных квартир: ощущение пустоты, ошибка допускается при расстановке мебели; нехватка освещения делает квартиру мрачной и холодной, залог удачного интерьера в наличие нескольких источников света; квартира кажется тоскливой, однообразной и скучной. Чтобы придать неординарность интерьеру необходимо добавить в него выразительных деталей [13]. Исследователи делают вывод, что все основные идеи организации комфортного жилища основываются на создании гармонии пространства, так как комфорт немислим без гармонии. Чтобы совместить эти два фактора, необходимо найти индивидуальный стиль будущего жилища. Только в определённом сочетании пропорций пространства и деталей интерьера, цвета и фактур можно создать гармоничное, а значит, уютное пространство для жизни современного человека [14].

«Распространенное понимание архитектуры и архитектурного дизайна можно сформулировать как: здание или сооружение - это есть системный набор функциональных элементов, воплощенных в форму» [15]. Конечно же, архитектурно-планировочное решение является важной частью проектирования здания, оно задается в первую очередь несущими конструкциями, а в последствии определяет функциональные структуры комнат. Квартиры-студии, в данном случае, – это современный подход в создании комфортного пространства малогабаритной квартиры, обеспечивающей хорошую освещенность и возможность вариативного зонирования. Малометражная квартира с длинным узким коридором – настоящая проблема для проживающих. Длинные и узкие коридоры или просторные проходы, площадь которых иногда бывает больше площади кухни или жилых комнат, отнюдь не функциональны, потому что в них проблематично устроить удобную систему хранения. В малогабаритных и компактных квартирах можно найти огромное количество идей, которые помогают расширению пространства. Лучше всего с этой задачей справляется анфиладный тип помещения, где все дверные проемы находятся на одной оси [16]. Дизайнерские приёмы могут решить проблему восприятия малого пространства узких коридоров. Рекомендуются использование минимального числа предметов компактной мебели вдоль одной стены; использование отражающих поверхностей и зеркал; использование

в отделке прочных материалов; применение единообразной стилистики межкомнатных дверей (возможно раздвижных) и использование ненасыщенных светлых оттенков прохладной цветовой гаммы (в то числе, с отражающей лицевой поверхностью); использование точечных потолочных светильников и светодиодной подсветки; использование вертикалей для оформления стен при невысоких потолках и горизонталей для расширения пространства; акцентирование противоположной от входа стены коридора при помощи цвета и подсветки. В дизайнерских решениях необходимо так же учитывать, что в современном мире люди все чаще задумываются о чистоте окружающей их среды и стараются обустроить свое жилище экологически чистыми материалами. Одной из главных задач дизайна малогабаритных квартир является создание видимости просторного интерьера. Приемы дизайна, расширяющие пространство малогабаритного жилья, являются средством формирования личного пространства для комфортного проживания в городской среде [17]. Исследователи Галяутдинова Е. Н., Милова Н. П. говорят о том, что трансформирующаяся мебель имеет высокий спрос среди владельцев малогабаритных квартир и часто применяется ими как способ «считывающегося» функционального зонирования, не загромождающего пространство [18]. Проблема визуального увеличения пространства малогабаритных квартир часто решается за счет использования отражающих поверхностей. Принято выделять пять типов оптических иллюзий, наиболее часто создаваемых в интерьере, посредством использования зеркал: иллюзии простора, изменения формы и объема, бесконечности, прозрачности и мимикрия. В таком интерьере необходимо помнить о правильном освещении и микроклимате – в комнате с зеркальными элементами не должно быть душно, нужно использовать кондиционеры и увлажнители, иначе весь эффект простора и свежести исчезнет [19]. Если рассматривать архитектурные аспекты решения пространства маленьких квартир, то необходимо обратить внимание на возможность корректировки. Сделать квартиру просторнее поможет демонтаж перегородок, если потолки не ниже 2,7 м, так как открытое пространство будет зрительно занижать потолок. Если избавиться от стен по каким-то причинам нельзя, то расширить квартиру можно путём замены дверей на стеклянные, раздвижные или их демонтажа. При помощи правильного освещения легко скрыть недостатки квартиры и подчеркнуть её сильные стороны. Чем больше окно, тем более просторной кажется комната. Если нет возможности изменить площадь окна, необходимо установить раму с минимумом перегородок и узким профилем, или цельное стекло [20; 21]. Так же рекомендуется функционально разделить каждую жилую комнату на три зоны: зону для хранения вещей, рабочую зону и спальную зону. В квартире необходимо определить тихую зону сна и отдыха и активную зону для работы, готовки и приёма пищи. Способом разделить пространство в квартире на функциональные зоны могут являться «трансформирующиеся» перегородки, которые могут складываться, разъезжаться и даже перемещаться по квартире [22]. «Умение совместить полярные подходы – «индивидуальный» и «коллективный» на различных этапах проектирования художественного образа объектов дизайна и архитектуры позволяет создавать эргономичные, функциональные и ярко индивидуальные завершённые формы, с продуманной коммуникационной средой, системным подходом к сценарию эксплуатации и обеспечением возможности применения передовых технологий дизайна и строительства» [23].

### Вывод

Тема малогабаритного жилья требует разностороннего рассмотрения. Аспекты эргономики и безопасности должны находить воплощение в индивидуальных грамотных эстетических решениях. Гармония, комфорт и уют – вот те факторы, которые позволяют рассматривать малогабаритное жильё не просто как вынужденный экономичный вариант существования, а как полноценный способ организации жизни в соответствии с новой Концепцией разумного потребления.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Чернышева И.В. "Малогабаритное жильё" как новый типологический элемент в структуре жилого комплекса / И.В.Чернышева // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн. Сборник статей. под редакцией: М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, Е.А. Ахмедовой; Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Самара, 2016. С. 140-144.
2. Дормидонтова А.А. Эксперименты в области проектирования микро-жилья в Гонконге/ А.А. Дормидонтова // В сборнике: Молодежь и наука: шаг к успеху. сборник научных статей 2-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 3 томах. Юго-Западный государственный университет; Московский политехнический университет. 2018. С. 69-73.
3. Языджан А.З. Принципы маркетингового контаминирования в отечественном градостроительстве мегаполисов/ А.З. Языджан // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 4 (18). С. 296-299.
4. Бобкова О.Н. Выявление характерных особенностей массового малометражного жилья для условий города Самары / О.Н. Бобкова // В сборнике: Устойчивое развитие городской среды. Сборник статей. под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, Е.А. Ахмедовой, Е.Г. Вышкина, Ф. Свитала ; АСИ СамГТУ. Самара, 2016. С. 117-119.
5. Генералов В.П. Мини-жильё как типологический элемент жилой ячейки/ В.П. Генералов, Е.А. Петрова, И.В. Чернышева //В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн. Сборник статей. под редакцией: М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, Е.А. Ахмедовой; Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Самара, 2016. С. 74-79.
6. Гримович И.Л. Концепция проекта интерьера для малогабаритной квартиры и многофункционального кафе/ И.Л. Гримович //Бизнес и дизайн ревью. 2016. № 1 (1). С. 11.
7. Permyakov M.B. Architectural and design approaches to the creation of a comfortable urban environment/ M.B. Permyakov, T.V. Krasnova// В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. С. 055062.

8. Пермяков М.Б. Технологии быстровозводимых зданий и сооружений: мировой опыт / М.Б. Пермяков, Т.В. Краснова// В сборнике: Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции. 2018. С. 98-102.
9. Пермяков М.Б. Аддитивные технологии в строительстве и дизайне архитектурной среды: настоящее и будущее/ М.Б. Пермяков, Т.В. Краснова, А.В. Дорофеев// Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2018. Т. 9. № 2. С. 2-5.
10. Permyakov M.B. Conceptual design of Russian modern monotowns architectural space/ M.B. Permyakov, T.V. Krasnova// В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. С. 012153.
11. Вторушина Т.В. Психологический комфорт проживания в малогабаритной квартире / Т.В. Вторушина //Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2017. № 1. С. 573-576.
12. Современный толковый словарь русского языка Ефремовой [Электронный ресурс]. – URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/efremova/260647/Уют> – 02.11.2016 (дата обращения 13.11.2020)
13. Плыгун Г.В. К вопросу о создании уютного интерьера в малогабаритной квартире/ Г.В. Плыгун //В сборнике: Молодёжь XXI века: шаг в будущее. Материалы XVIII региональной научно-практической конференции. 2017. С. 1322-1323
14. Васильева Н.А. Как создать уютный интерьер / Н.А. Васильева, Г.В. Плыгун// Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2018. Т. 3. С. 34-37.
15. Краснова Т.В. Творческие подходы в формировании имиджа городской среды средствами архитектуры и дизайна / Т.В. Краснова, М.Б. Пермяков// Современные наукоемкие технологии. 2019. № 2. С. 89-93.
16. Дементьева А.К. Современные архитектурно-планировочные решения / А.К. Дементьева, М.Е. Кульнева// В сборнике: Вузовская наука в современных условиях. сборник материалов 54-й научно-технической конференции. В 3 ч. Ульяновск, 2020. С. 36-39.
17. Сорокина В.Н. Дизайн малогабаритного жилья как средство формирования личного пространства для комфортного проживания в городской среде/ В.Н. Сорокина //В сборнике: Безопасность городской среды. материалы IV Международной научно-практической конференции. 2017. С. 296-298.
18. Галяутдинова Е.Н. Трансформирующаяся мебель как средство организации пространства интерьера малогабаритной квартиры / Е.Н. Галяутдинова, Н.П. Милова //Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2020. Т. 3. С. 96-103.
19. Базилевич М.Е. Зеркала в дизайне интерьера/ М.Е. Базилевич, А.А. Барабанова// Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1. № 2. С. 12-16.
20. Лютикова М.А. Дизайн малогабаритного жилого пространства и современные тенденции на рынке жилья/ М.А. Лютикова, С.Ю. Круталевич // В сборнике: Всероссийская научно-практическая конференция "ДИСК-2018". Сборник материалов. 2018. С. 110-112.
21. Пашков Е.И. Современные строительные теплоизоляционные материалы/ Е.И. Пашков, М.Б. Пермяков, Т.В. Краснова//Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2020. Т. 11. № 2. С. 15-19
22. Краснов Р.К. Проблемы малогабаритного жилья и пути их решения/ Р.К. Краснов// Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 12-2. С. 170-173.
23. Краснова Т.В. Технология разработки художественного образа в дизайне и архитектуре средствами графической дизайн-концепции/ Т.В. Краснова, М.Б. Пермяков// Современные проблемы науки и образования. 2018. № 1. С. 11.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Chernysheva I. V. "Malogabaritnoe zhil'e" kak novyyj tipologicheskij ehlement v strukture zhilogo kompleksa ["small-scale housing" as a new typological element in the structure of a residential complex]/ I. V. Chernysheva// Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arkhitekture. Arkhitektura i dizajn [Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Architecture and Design. A Collection of Articles]. Edited By M. I. Balzannikova, K. S. Galitskova, E. A. Akhmedova; Samara State University of Architecture and Civil Engineering. Samara, 2016. pp. 140-144 [in Russian]
2. Dormidontova A. A. Eksperimenty v oblasti proektirovaniya mikro-zhil'ja v Gonkonge [Experiments in the Design of Hong Kong Micro-Apartments ]/ A. A. Dormidontova // Molodezh' i nauka: shag k uspekhu. sbornik nauchnykh statej 2-jj Vserossijskoj nauchnoj konferencii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh [Youth and Science: A Step to Success. a Collection of Research Articles of the 2nd All-Russian Scientific Conference of Promising Developments of Young Scientists]. In 3 volumes. South-West State University; Moscow Polytechnic University. 2018, pp. 69-73 [in Russian]
3. Yazydzhan A. Z. Principy marketingovogo kontaminirovaniya v otechestvennom gradostroitel'stve megapolisov [Principles of Marketing Contamination in the Domestic Urban Planning of Megacities]/ A. Z. Yazydzhan// Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta [Science Vector of Togliatti State University]. 2011. No. 4 (18), pp. 296-299 [in Russian]
4. Bobkova O. N. Vyjavlenie kharakternykh osobennostej massovogo malometrazhnogo zhil'ja dlja uslovij goroda Samary [Identification of Characteristic Features of Mass Small-Scale Housing for the Conditions of the City of Samara]/ O. N. Bobkova// Ustojchivoe razvitie gorodskoj sredy. Sbornik statej [Sustainable Development of the Urban Environment. a Collection of Articles], Edited by M. I. Balzannikova, K. S. Galitskova, E. A. Akhmedova, E. G. Myskina, F. Svitala ; Architecture and Civil Engineering Academy, Samara State Technical University. Samara, 2016, pp. 117-119 [in Russian]
5. Generalov V. P. Mini-zhil'e kak tipologicheskij ehlement zhil'noj jachejki [Mini-Apartments as a Typological Element of a Residential Cell]/ V. P. Generalov, E. A. Petrova, I. V. Chernysheva// Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arkhitekture. Arkhitektura i dizajn. Sbornik statej [Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Architecture and Design. a Collection of Articles]. Edited by M. I. Balzannikova, K. S. Galitskova, E. A. Akhmedova; Samara State University of Architecture and Civil Engineering. Samara, 2016, pp. 74-79 [in Russian]



6. Grimovich I. L. Konceptija proekta inter'era dlja malogabaritnoj kvartiry i mnogofunkcional'nogo kafe [Interior Design Concept for a Small Apartment and a Multifunctional Cafe]/ I. L. Grimovich// *Biznes i dizajin revju* [Business and Design Journal]. 2016. No. 1 (1), p. 11 [in Russian]
7. Permyakov M.B. Architectural and design approaches to the creation of a comfortable urban environment/ M.B. Permyakov, T.V. Krasnova// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. p. 055062.
8. Permyakov M. B. Tekhnologii bystrovozvodimykh zdaniy i sooruzhenij: mirovoj opyt [Technologies of Prefabricated Buildings and Structures: World Experience]/ M. B. Permyakov, T. V. Krasnova// *Sovremennye dostizheniya universitetskikh nauchnykh shkol. Sbornik dokladov nacional'noj nauchnoj shkoly-konferencii* [Modern Achievements of University Scientific Schools. a Collection of Reports of the National Scientific School-Conference]. 2018, pp. 98-102 [in Russian]
9. Permyakov M. B. Additivnye tekhnologii v stroitel'stve i dizajine arkhitekturnoj sredy: nastojashhee i budushhee [Additive Technologies in Construction and Design of the Architectural Environment: Present and Future]/ M. B. Permyakov, T. V. Krasnova, A. V. Dorofeev// *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Topical Issues of modern science, technology and education]. 2018. Vol. 9. No. 2, pp. 2-5 [in Russian]
10. Permyakov M.B. Conceptual design of Russian modern monotonous architectural space/ M.B. Permyakov, T.V. Krasnova// In the collection: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. P. 012153.
11. Vtorushina T. V. Psikhologicheskij komfort prozhivaniya v malogabaritnoj kvartire [Psychological Comfort of Living in a Small Apartment] / T. V. Vtorushina// *Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* [Far East: Problems of Development of the Architectural and Construction Complex]. 2017. No. 1, pp. 573-576 [in Russian]
12. *Sovremennyyj tolkovyyj slovar' russkogo jazyka Efremovoj* [Contemporary Explanatory Dictionary of the Russian Language by T. F. Efremova] [Electronic resource]. – URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/efremova/260647/comfort> – 02.11.2016 (accessed 13.11.2020) [in Russian]
13. Plygun G. V. K voprosu o sozdanii ujutnogo inter'era v malogabaritnoj kvartire [On Creating a Comfortable Interior in Small Apartments] / G. V. Plygun// *Molodjozh' XXI veka: shag v budushhee. Materialy XVIII regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Youth of the XXI Century: A Step Into the Future. Proceedings of the XVIII Regional Scientific and Practical Conference]. 2017, pp. 1322-1323 [in Russian]
14. Vasilyeva N. A. Kak sozdat' ujutnyj inter'er [How to Create a Comfortable Interior]/ N. A. Vasilyeva, G. V. Plygun// *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU* [New ideas of the new century: proceedings of the international scientific conference of the Department of Architecture and Design of the Pacific National University]. 2018. Vol. 3, pp. 34-37 [in Russian]
15. Krasnova T. V. Tvorcheskije podkhody v formirovanii imidzha gorodskoj sredy sredstvami arkhitektury i dizajna [Creative Approaches in the Formation of the Image of the Urban Environment by Means of Architecture and Design]/ T. V. Krasnova, M. B. Permyakov// *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High-Tech Technologies]. 2019. No. 2, pp. 89-93 [in Russian]
16. Dementieva A. K. Sovremennye arkhitekturno-planirovochnye resheniya [Modern Architectural and Planning Solutions] / A. K. Dementieva, M. E. Kulneva// *Vuzovskaja nauka v sovremennykh usloviyakh. sbornik materialov 54-jj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [University Science in Modern Conditions. Collection of Materials of the 54th Scientific and Engineering Conference]. In 3 volumes. Ulyanovsk, 2020, pp. 36-39 [in Russian]
17. Sorokina V. N. Dizajin malogabaritnogo zhil'ja kak sredstvo formirovaniya lichnogo prostranstva dlja komfortnogo prozhivaniya v gorodskoj srede [Design of Small-Scale Housing as a Means of Forming Personal Space for Comfortable Living in an Urban Environment]/ V. N. Sorokina// *Bezopasnost' gorodskoj sredy. materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Safety of the Urban Environment. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference]. 2017, pp. 296-298 [in Russian]
18. Galyautdinova E. N. Transformirujushhajasja mebel' kak sredstvo organizacii prostranstva inter'era malogabaritnoj kvartiry [Transforming Furniture as a Means of Organizing the Interior Space of a Small Apartment]/ E. N. Galyautdinova, N. P. Milova // *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU* [New ideas of the New Century: proceedings of the international scientific conference the Department of Architecture and Design of the Pacific National University]. 2020. Vol. 3. pp. 96-103 [in Russian]
19. Bazilevich M. E. Zerkala v dizajine inter'era [Mirrors in Interior Design]/ M. E. Bazilevich, A. A. Barabanova// *problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* [Far East: Problems of Development of the Architectural and Construction Complex]. 2019. Vol. 1. No. 2. pp. 12-16 [in Russian]
20. Lyutikova M. A. Dizajin malogabaritnogo zhilogo prostranstva i sovremennye tendencii na rynke zhil'ja [Design of Small-Scale Residential Space and Current Trends in the Housing Market]/ M. A. Lyutikova, S. Yu. Krutalevich// *Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija "DISK-2018". Sbornik materialov* [All-Russian Scientific and Practical Conference "Disk-2018". A Collection of Materials]. 2018, pp. 110-112 [in Russian]
21. Pashkov E. I. Sovremennye stroitel'nye teploizoljacionnye materialy [Modern Building Thermal Insulation Materials]/ E. I. Pashkov, M. B. Permyakov, T. V. Krasnova// *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Topical Issues of Modern Science, Technology and Education]. 2020. Vol. 11. No. 2, pp. 15-19 [in Russian]
22. Krasnov, R. K. Problemy malogabaritnogo zhil'ja i puti ikh resheniya [Problems of Small-Scale Housing and Ways to Solve Them]/ R. K. Red// *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences]. 2018. No. 12-2, pp. 170-173 [in Russian]
23. Krasnova T. V. Tekhnologija razrabotki khudozhestvennogo obraza v dizajine i arkhitekture sredstvami graficheskoy dizajin-koncepcii [Technology of Developing an Artistic Image in Design and Architecture by Means of a Graphic Design Concept]/ T. V. Krasnova, M. B. Permyakov// *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Issues of Science and Education]. 2018. No. 1, p. 11 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.026>

## КОМПОЗИЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ КАК СРЕДСТВО ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНОВЛЕНИЯ СТУДЕНТА-АРХИТЕКТОРА

Научная статья

**Рябов Н.Ф.\***

ORCID: 0000-0002-3195-1840,

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

\* Корреспондирующий автор (ryabov.kazan[at]gmail.com)

### Аннотация

В статье рассматриваются смысловое насыщение одного из учебных заданий дисциплины «Композиционное моделирование» и ход работы над ним студентов группы 8АП04 (II курс) Института архитектуры и дизайна Казанского архитектурно-строительного университета в первом семестре 2019-2020 учебного года. Задание было основано на столкновении формальных геометрических парадоксов импоссибилизма с частными региональными сюжетами. Подобный подход оказался действенно-продуктивным в рамках формирования авторских почерков и подходов студентов-архитекторов начального этапа обучения. Результатом работы студентов стала выставка в одном из старейших музеев Казани – Доме-музее В. И. Ленина (август 2020 года). Получение подобного опыта для студента – возможность осознанного перехода от композиции формальной к композиции содержания. Именно на ее основании строится персонифицированный тип актуального архитектурного дискурса о городском пространстве как средовом.

**Ключевые слова:** качество образования, студент-архитектор начального этапа обучения, педагогические технологии, композиция содержания, импоссибилизм, анаморфоза.

## CONTENT COMPOSITION AS MEANS OF INTELLECTUALIZING THE PROFESSIONAL DEVELOPMENT OF AN ARCHITECTURE STUDENT

Research article

**Ryabov N.F.\***

ORCID: 0000-0002-3195-1840,

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia

\* Corresponding author (ryabov.kazan[at]gmail.com)

### Abstract

The article discusses the meanings of one of the educational tasks of the discipline "Compositional modeling" and the work process of the second-year students from the group 8АП04 of the Institute of Architecture and Design of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering in the first semester of 2019-2020. The task was based on the collision of formal geometric paradoxes of impossibilism with individual regional narratives. This approach proved to be effective and productive in the formation of individual styles and approaches of architecture students of the initial stage of training. As a result, the work of the students was displayed at an exhibition in one of the oldest museums in Kazan, the memorial house of V. I. Lenin (August 2020). Getting such an experience for a student is an opportunity for a conscious transition from a formal composition to a substance composition. It is on its basis that a personified type of current architectural discourse on urban space as a medium is built.

**Keywords:** quality of education, architecture students of the initial stage of training, pedagogical technology, composition of content, impossibilism, anamorphosis.

### Введение

В настоящее время федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования нового поколения (ФГОС ВО 3++), в том числе по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 070000 «Архитектура», в отличие от предыдущих (ФГОС ВО 3+, ФГОС ВО, ФГОС ВПО и, в особенности, ГОС ВПО) характеризуются большой гибкостью и вариативностью для образовательных организаций в формах, способах и методах организации и ведения образовательного процесса с целью формирования у обучающихся универсальных и общепрофессиональных компетенций.

На практике это означает наделение достаточной свободой профессорско-преподавательского состава, осуществляющего реализацию образовательной программы, наличие академической свободы в выборе конкретных образовательных технологий и педагогических практик. Данный факт дает большие возможности для создания авторских курсов, применения нестандартных подходов в преподавании. Возможно, именно в области архитектурной и художественной направленности подобные академические свободы в самостоятельном определении вузами содержания образовательных программ и используемых педагогических практик являются наиболее важными, востребованными и, более того, критически необходимыми. Таким образом, в образовательном процессе будущих архитекторов особую значимость приобретают вопросы поиска новых педагогических приемов их наставниками. Рассмотрению одного из таких приемов – использованию метода формальных геометрических парадоксов импоссибилизма в ходе выполнения учебно-творческих заданий по дисциплине «Композиционное моделирование» посвящена данная статья.

Архитектурная практика в силу ряда ограничений и включенности в процесс реального строительства не способна выразить всей полноты смыслов и допущений, доступных теории и образованию. Последние в силу универсальности архитектурного знания, обнаруживаемой еще в трактате Витрувия, стремясь к расширению своего оперативного поля и влияния способны на самые смелые допущения (особенно в рамках композиционного формотворчества) в трактовках и концептах пространственных преобразований.

Архитектор-универсал (теоретик, практик, педагог) Р. Колхас, развивая тему задач, решаемых в проектном бюро, расширение этого поля влияния определяет, как часть стратегии: «Архитекторы всегда были интеллектуалами, но их деятельность строго ограничивалась рамками дисциплины. У нас в офисе мы стараемся отойти от образа архитектора-интеллектуала и быть публичными интеллектуалами, которые приносят пользу за пределами архитектуры. Работу, которой мы занимаемся, мы рассматриваем не как отдельные проекты, а с точки зрения ее потенциальной способности порождать новые типы деятельности. Для этого мы накапливаем знания не только об архитектуре, а о мире вообще – со всеми его несообразностями» [1, С. 26].

Рассмотрение проектной работы в рамках расширенного знания о мире «со всеми его несообразностями» уподобляет проектное бюро архитектурной школе, функционирование которой авторы легендарным текстом, базирующего на «скромном студенческом исследовании», – «Learning from Las Vegas: The forgotten symbolism of architectural form» определяли схожим образом: «There is a perversity in the learning process: We look backward at history and tradition to go forward; we can also look downward to go upward. And withholding judgment may be used as a tool to make later judgment may be used as a tool to make later judgment more sensitive. This is a way of learning from everything» [2, P. 20]. Очевидно, то же целеполагание позволяет специалистам Исламского университета Азад в Мешхеде (Islamic Azad University in Mashhad, Iran) уподоблять структуру освоения компетенций проектно-творческих дисциплин кроссворду, заполнение которого позволяет студентам выявлять разнообразные связи отдельных частей одного целого: «According to crossword puzzle structure, all diagrams and sketches (which fill the puzzle) are highly interactive and interrelated and also complementary. It causes students to reorganize their thoughts while problem solving, and also, to discover the relations between different parts and dimensions of design problem in order to achieve a unique and integrated solution» [3, P. 11].

Подобные умозаключения и уподобления в определениях сути происходящего в различных сферах обнаружения архитектурного знания не случайны, а место его начального освоения обретает особый смысл и значение, как место «культивирования интеллектуальной функции будущих архитекторов, их рефлексии, понимания, мышления, коммуникативных и деятельных способностей» [4, С. 8]. Архитекторы-исследователи П. В. Капустин, Ю. И. Карамзин (ВГТУ), порицая модернистский тип проектного сознания как антигуманистический, «плотно сросшийся с инженерной деятельностью» акцентируют внимание на должных приоритетах: «Интеллектуализация должна начинаться, конечно, с образования, должно измениться само содержание архитектурного образования, в его специальной базовой части» [4, С. 5]. В рассуждениях о композиционной проблематике этой базы их коллега Т.А. Ушакова (УралГАХА) сущностные изменения определяет как осознанный переход от композиции формальной к композиции содержания, обеспечивающей «перевод» геометрических форм в пространство «адекватного поведения человека» – средовое и находящей свое выражение в выборе идей, образов, темы, построения сюжета, сценария. Объективный характер подобной композиции, по ее мнению, определяется здравомыслием сочинителя, базирующемся, очевидно, на все том же «извлечении уроков из всего» (соотнесением видимого со знаниями о реалиях окружающего нас мира, сравнением результатов творчества с опытом и вершинами в данном виде искусства) [5, С. 9-10].

На этапе начальной подготовки (I – II курсы) студента-архитектора здравомыслие это обеспечивается отношением преподавателей композиционной дисциплины к выбору тем учебных заданий, выстраиванию хода их выполнения. Данная работа – рассмотрение одного из заданий, проработанных студентами второго года обучения (I семестр 2019-2020 учебного года, группа 8АП04, преподаватели Н.Н. Абрамова, Н.Ф. Рябов) Института архитектуры и дизайна КГАСУ.

Цель исследования – выявить потенциальные возможности использования композиции содержания в ходе выполнения учебно-творческих заданий дисциплины «Композиционное моделирование», в частности – с использованием метода формальных геометрических парадоксов импоссибилизма.

Рабочая гипотеза – парадоксы городского «содержания», осознаваемые студентами как проблема несоответствия действительного и должного, могут быть выражены посредством парадоксальных композиционно-графических построений в импоссибилистическом стиле, что, в свою очередь, позволит более «объемно» и эффективно развить художественные компетенции обучающихся.

Задачи исследования:

- выстроить тематические связи композиционной дисциплины и учебно-ознакомительной практики;
- определить возможные к разработке темы, связанные с актуальной проблематикой средового места, обще-архитектурного дискурса;
- выявить аналоги, доступные для понимания и творческой «переработки» участников композиционного упражнения;
- в ходе графического анализа и обсуждений обнаружить графические модели с должным «потенциалом»;
- в ходе многовариантного поиска разработать авторские композиции;
- найти место и форму представления авторских композиций.

### Методы и принципы исследования

Для достижения поставленной исследовательской цели будет проведено всестороннее рассмотрение композиционного поиска студентов группы 8АП04 Института архитектуры и дизайна КГАСУ. В качестве объекта исследования выделяется архитектурно-графическая композиция как база многообразных архитектурных построений и концептов. Соответственно, предметом исследования выступает композиция содержания в виде органического выражения архитектурно-графической композиции в ее смыслопорождающей связанности с изобразительным наследием, региональными сюжетами, актуальной средовой проблематикой.

В качестве базовых методов исследования выбраны: аналогия, аспектный анализ разнообразного графического материала (натурных наблюдений и фиксаций студентов, работ мастеров импоссибилистического направления).

Как возможные пути решения проблемы культивирования интеллектуальной функции будущих архитекторов исследователи называют: «возвращение к культуре» – обращение к гуманитарному знанию и философско-методологической проблематике [4, С. 5]; согласованность тем курсового проектирования с системой практических

заданий смежных дисциплин, в частности – рисунка (В.Л. Ганзин, О.В. Пакалина (УралГАХА): «Исследовательская композиция в учебном рисунке позволяет подключить инновационные возможности мышления») [6, С.56]; предметную локализацию тематики творческой работы, а также – обращение в ходе ее выполнения к нетрадиционным методам рассмотрения и решения. Так, философ Т. Ю. Быстрова (УрФУ) определяет: «Время неоиндустриальных городов актуализирует интеллектуальный и умственный труд; гигантомания сменяется интересом к проблеме отдельного конкретного места, его «духу», истории, людям, занятиям» [7, С. 53]. Педагоги-лингвисты Э. А. Лазарева, М. А. Очеретина, говоря о новом типе культуры, базирующемся на визуальном способе представления информации, предлагают рассматривать подготовку студента-архитектора (особой профессиональной личности, которая отличается способом восприятия действительности – конкретно-образной визуализацией) как решение проблемы личностного формирования и ориентирования в пространстве действия нетривиальных креолизованных текстов: «Именно в области архитектуры существуют люди, которые нацелены на действия с креолизованными текстами и формируются они как личности, ориентированные на такие тексты, на существование среди этих текстов» [8, С. 106–107].

### Основная часть

Интерес к архитектурной тематике и проблематике представителей самых разных научных областей определяется многомерностью самого архитектурного знания, в частности его «пограничной» художественной составляющей – между интеллектуальным познанием и чувственным опытом (ее специфика соответствует тому, что Гегель называл «чувственным представлением Идеи», или представление идеи вещи средствами чувств [9, С. 237]). Очевидно, эта особенность и позволяет исследователям архитектурных феноменов последних десятилетий говорить о характерном для поэтики архитектуры особо чутком отношении к неустойчивому положению человека в мире, отношении, называемом постмодернистской чувствительностью. На ее основании строится персонифицированный тип архитектурного дискурса, характеризуемый повышенной ассоциативностью и метафоричностью, выводящий архитектурное сочинение к поиску сюжета. В категорию средств обеспечения его работы среди прочего включены постмодернистская метафора, парадокс, приемы двойного кодирования, коллажных склеек [10, С. 360–361]. Сам ход такой работы, определяемой как игра со смыслами, может рассматриваться как некое событие. Главный сюжет этой игры, определяемой диалогом полюсных умонстроений, обеспечивающих игровой накал, – сюжет противостояния (старого и нового, автора и архива) [10, С. 370].

Работа подобного комплекса как действенного инструментария в рамках выполнения учебно-творческих заданий возможна при обращении к темам одновременно знаковым и знакомым, связанным с уже познанным, пережитым. В нашем случае композиционная работа над темой под условным названием «Казанские уроки с Иштваном Оросом» опиралась на предшествующий опыт и материалы завершающей первый год обучения учебно-ознакомительной практики, в ходе которой студентами был выполнен ряд заданий, связанных с первичным освоением методов и приемов пред-проектного анализа (натурное знакомство с местом, определения точек оптимального восприятия объекта, графическая и фото-фиксация, систематизация материалов наблюдений, написание эссе, выстраивающего эмоционально-ассоциативные ряды подобных прогулок и фиксаций). Выполнению этих заданий предшествовало натурное знакомство с историческими улицами Казани, чей облик и жизнь уже долгое время определяет глобальный сюжет противостояния-конфликта нового и старого, несоответствия представимого (должного) – наблюдаемому (действительному). В череде старых казанских улиц для знакомства были выделены две – Хади Атласи (бывш. – Кирпично-Заводская) и Курашова (бывш. – Госпитальный овраг), обладающие должным потенциалом выражения региональных сюжетов и дающие возможность территориальной «привязки» объектов учебного проектирования II курса.

Изначально не планирующимся событием, задавшим учебной практике дополнительные смыслы, а главное – предопределившим образное насыщение, тему и подходы к творческому выполнению будущего композиционного задания, стало посещение совпавшей по срокам со временем студенческой практики (август 2019 года) выставки венгерского художника, дизайнера, писателя, режиссера Иштвана Ороса (Istvan Orosz) – значимой фигуры европейской арт-сцены («Иштван Орос. Гафика, плакаты, анаморфозы», Казань, 1 августа – 1 сентября 2019 года). Место ее проведения – Центр современной культуры «Смена» (для большинства студентов посещение выставки стало первым знакомством с этим местом), заслуживает отдельного рассмотрения как весьма значимый средовой феномен.

Суть понятия «среда», часто употребляемого в рамках актуальной сегодня «перезагрузки» городских пространств («создание комфортной среды проживания» и пр.) определяется противопоставлением пространств реального и психологического, сосуществующих в рамках единого целого. Философ Ф. Т. Мартынов объясняет: «Следует различать город (всего того, что существует объективно, независимо от нашего сознания и переживания) и среду – реальность субъективного видения, понимания и переживания города. Среда неотделима от человека, творится и познается его сознанием; только окружение с трансформирующим его сознанием, мы применительно к городу называем городской средой» [11, С. 11].

Организованный в 2013 году по инициативе казанских художников И. и Р. Хасановых центр за годы своего существования стал значимым местом трансформации и передачи казанских смыслов. Буквальным же местом локации стало краснокирпичное здание бывшей конюшни и сенохранилища в районе привокзальной площади (ул. Бурхана Шахиди, 7). Арт-пространство в стенах бывшей конюшни – невольная цитата, связанная с творческим становлением Уорхола и его Фабрикой (угол вокзальной площади на который выходит окно перед рабочим местом графического дизайнера, старая кирпичная кладка в соседстве с белыми перегородками-временками, брутальная металлическая лестница на входе и т.п.), где свежие метафоры определялись прежде всего нетривиальными поведенческими ситуациями – событиями [12, С. 90–91].

Очевидно, изначальное осознание важности архитектурной составляющей в формировании культурно-продуктивного пространства-среды определило изначальный интерес устроителей центра к архитектурной проблематике. Он прослеживается с первых дней работы центра – от выставочного фотопроекта (с вкраплениями

архитектурной графики, исторических материалов и современных реконструкций) «Курортград. / [Евпатория] и традиция советской архитектуры» (весна 2014 года), фиксирующего состояние зданий и сооружений наследия курортной архитектуры XX века.

В ряду многих событий центра – ретроспектива И. Ороса, охватывающая его творческий путь с 1987 по 2015 год, являет собой пример междисциплинарного подхода к рассмотрению средового пространства – места жизни современного интеллектуала, коим мастер-экспериментатор (с различными техниками, жанрами, формами презентации), ученик создателя одной из главных головоломок последнего времени – Э. Рубика, безусловно, является. Важной составляющей его творческого поиска стала работа с архитектурными формами старых построек, руин, подвергшимся в силу долголетия своего существования самым разным метаморфозам. Уже декларативно означенные нами как многозначные приемы выражения современной композиционной поэтики – коллажность, парадокс, ирония – нашли зримо-действенное воплощение в его многочисленных как плоскостных, так и трехмерных работах. Особый интерес студентов в ходе знакомства с выставкой вызвали его импоссибилистические построения архитектурных форм (интерьеров, лестниц, аркад, руин, которые кажутся реальными, но не могут существовать в физической реальности) и анаморфозы (соединения в один визуальный конструкт гравюр и отражающих их зеркальных цилиндров, устанавливаемых в фиксированных точках) с изображениями-отражениями коринфских капителей, портретов знаковых исторических персонажей. Именно этот живой интерес как выражение особой чувствительности и определил решение руководителя практики использовать в дальнейшей творческой работе со студентами приемы и образные ряды мастера.

Шведский график-импоссибилист О. Рутерсвард, описывая начало своего пути, вспоминает его отправную точку – первую фигуру «чистого и простого тона» – как незапланированный акт: «Она появилась случайно, когда я в 1934 году в последнем классе гимназии на уроке «чиркал» в учебнике латинской грамматики, рисуя в нем геометрические фигуры. Это был псевдотреугольник, который у математиков называется треугольником Рутерсварда» [13, С. 6]. Он же, представляя своеобразный каталог парадоксальных форм, противоречащих евклидовой геометрии (все они почти без исключения представляют собой геометрические композиции, состоящие из простых основных форм с прямыми сторонами и прямоугольных соединений), обозначает себя, как продолжателя определенной культурной традиции – одного из авангардных направлений 1920-х годов – «дитя пуризма» [13, С. 6].

Следует заметить, что студент-архитектор, прошедший в ходе первого года обучения «сквозь» цикл упражнений формальной комбинаторики, наследует ту же традицию. Имея опыт подобного формообразования, а также опыт расстановки опор-колонн, организации переходов с уровня на уровень в ходе проектирования простейших сооружений (беседок, открытых павильонов, парковых мостиков, смотровых площадок и т.п.), он вслед за упомянутым графиком может утверждать: «Убеждение в том, что я умею эффективно и непринужденно работать с этим вечным материалом придало мне смелости как архитектору-импоссибилисту» [13, С. 13].

Смелость подобного толка (не останавливаться перед загадочным, а пытаться дать ему приемлемое объяснение [13, С. 13]) способна определять значимость начального этапа профессионального становления как интеллектуально-чувственного опыта, предопределяющего вектор направленности и успешность дальнейшего творческого пути. Пример тому – творчество архитекторов-«бумажников» (как рабочее название термин «бумажная архитектура» был принят основателями движения – группой молодых московских архитекторов в начале 1980-х), вызывающее по сей день живой интерес; одна из последних ретроспектив движения – выставка 2018 года в берлинском музее архитектуры (Museum für Architekturzeichnung). Во многих графических работах «бумажников» – акварелях, рисунках, офортах (с одной стороны самодостаточных художественных работах и с другой – аккумуляции творческих энергий, направленных на экспансию будущих пространств [14, С. 5]) именно импоссибилистические построения становились зримыми выразителями проблем, определяющих творческий поиск.

В нашем случае «аккумуляция творческих энергий» при рассмотрении пространств средовых, действующих в режиме «здесь и теперь», определялась действенным осознанием возможных подходов и опорой на культурные традиции, проверенные временем.

Первое профессиональное знакомство со средовыми пространствами исторического города у студентов группы, состоявшееся в ходе прохождения учебно-ознакомительной практики, вызвало у будущих преобразователей этих пространств множество вопросов, определяемых конфликтом должного (их представлениями о разумной композиционной организации пространств, сформированными в ходе первого года обучения) и наблюдаемого в реальности. Это конфликт несоответствия, очевидно, носящий далеко не локальный характер, теоретик архитектуры Г. И. Ревзин определяет так: «Животные городов не строят, город – произведение человеческое. То есть он должен быть разумен. При этом он скорее таким не выглядит. Не только для обычного человека, натякающегося на интриги улиц, но и как мне кажется, для людей, занимающихся городами профессионально. В городе масса случайного, непредсказуемого, не имеющего разумных оснований. То есть город – это порождение разума, которое неразумно» [15, С. 13].

Действительно, накал профессионального и общекультурного дискурса такого города как Казань во многом определяется темой противостояния (конфликтом между городской материей, претерпевающей радикальную трансформацию и смыслом города [15, С. 15]), в частности – сторонников бережного сохранения (прошлого) и радикальных трансформаций (грядущего).

Казанский философ В. И. Курашов, акцентируя внимание на диалектичности проблемы развития современных городов, важнейшим и доступным подходом к сохранению архитектурных и всех иных ценностей культуры обозначает триадой специфических средств их отражения: текст, рисунок, фотография [16, С. 6]. Для студентов – участников учебно-ознакомительной практики именно они и стали действенными инструментами фиксации осознаваемого специалистами гуманитарного плана конфликта в рамках знакомства с казанскими улицами – Хади Атласи, Курашова. Возможность осознания конфликта определял набор знаний и представлений, полученных в ходе освоения компетенций дисциплин «Основы архитектурного проектирования», «Композиционное моделирование» и позволяющий, в частности, обнаружить и зафиксировать парадоксы алогичного соседства старых и новых строений



(сбивки масштабности, разрушение устоявшихся ритмических рядов поэтажных членений, окон; рисунка силуэта) на этих мало-протяженных (не более 500 метров) улочках, скорее даже – переулках. Уже цитируемый нами Г. И. Ревзин, определяя особое значение этих обязательных для исторических поселений пространственных образований (в каждом старом европейском городе есть переулки), пишет: «Вступая в переулки, мы оказываемся в области таинственного... Непонятно, почему они такие и какой в этом смысл... Переулок – выпадение из времени» [15, С. 261].

Композиционные несоответствия наблюдаемого должному в случае нашего «таинственного выпадения» компенсировались ландшафтным своеобразием участков, стилевым своеобразием отдельных исторических построек и связанных с ними историй – всего того, что в последние годы определяется понятием «дух места». На улице Курашова в качестве такого объекта выступил дом № 8 –одноэтажное деревянное строение с уникальными наличниками, созданными казанским краснодеревщиком Иваном Налимовым в 30-е годы прошлого века; на Хади Атласи – дом архитектора К. Мюфке – исключительный образец казанского модерна первого десятилетия того же века.

Еще одной немаловажной составляющей «духа места» улицы Хади Атласи является история, часто описываемая в последние годы в работах многих краеведов и литераторов (М. Беляева, Р. Бикбулатова, Р. Мустафина, Н. Свечина). По свидетельству М. Беляева похищенная в 1904 году икона Богоматери из Казанского Богородицкого девичьего монастыря вероятно была уничтожена злоумышленниками в «неприметной квартире на тогдашнем выезде из города», в доме на перекрестке улиц Муратовской (ныне – Лесгафта) и Кирпично-Заводской [17, С. 38]. В описании происшествия казанского краеведа М. Беляева присутствие в «неприметной квартире» невольной свидетельницы – девятилетней девочки обретает силу символа: «В результате варварства святыня, найденная 325 лет назад после большого казанского пожара девочкой Матроной рядом с обгоревшей печью, символично ушла в огонь другой топки на глазах ее сверстницы» [17, С. 44].

В рамках интеллектуально-чувственного осмысления городских пространств интерес к подобному сюжету не уход в сторону, а еще один шаг в сторону «обращения» пространства в среду – реальность субъективного видения. Он же – возможный источник формирования продуктивного художественного образа. Последнее подтверждает учебная практика – студентка группы А. Тугашева при выполнении первого курсового проекта дисциплины «Основы архитектурного проектирования» (2019-2020 уч. г.) в качестве объекта разработки выбрала квартальный храм с его «привязкой» на одном из нынешних пустырей улицы Хади Атласи. Подобный выбор, равно как и образное истолкование темы учебного проекта (в очертаниях стен и «оплывающей» кровли угадывается действие той самой стихии огня) – осознанная попытка-своеобразной реабилитации места негативной событийности, его (и его обитателей) возможной перемены участи. Одновременно с выполнением курсового проекта указанной дисциплины студенты группы на занятиях дисциплины «Композиционное моделирование» «выстраивали» свои интерпретационные сюжеты казанских пространственно-средовых парадоксов. В этой работе каждый был волен расширить круг поиска исходных форм казанского места, что, безусловно, только обогатило интерпретационный поиск.

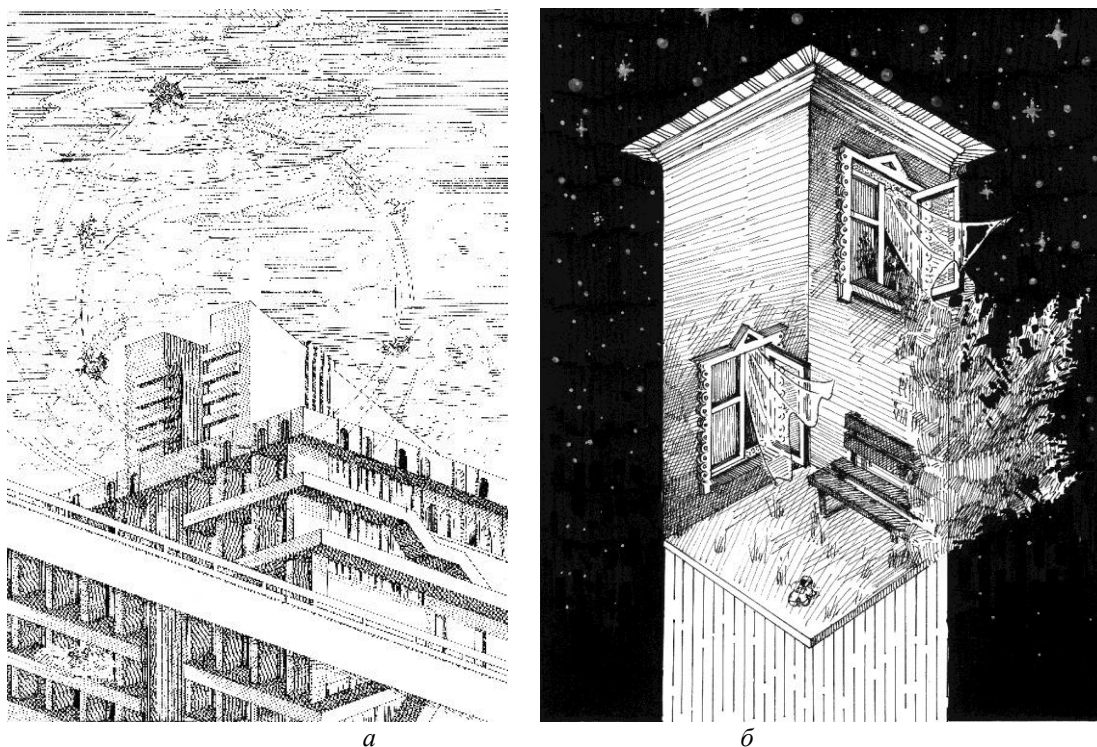


Рис. 1 – Графические композиции студентов

Так, в композиционной работе студента А. Киямова нашел свое парадоксальное выражение сюжет казанского этапа творческого пути архитектора Мюфке как пространственного пути в невозможном лестничном лабиринте; у К. Арзамасцевой сюжет противостояния старого и нового обрел выражение в виде непреодолимой лестницы, иллюзорно соединяющей скопление одноэтажных строений с громадами многоэтажек; у Д. Рыковой (см. рисунок 1-б) – миниатюрная площадка старого двора (место ностальгических воспоминаний о невозвратном) стала невозможным основанием стен, уходящих в ночное небо.

Каждая из работ может рассматриваться как, пусть и неосознаваемая в полной мере, попытка вписаться в многоголосый дискурс, участниками которого являются представители самых разных областей знания. Так, композиция студентки А. Галямовой – парадоксальная ритмическая переключка линейных очертаний форм современного типового домостроения и домов-изб с резными наличниками – может быть рассмотрена как своеобразное графическое выражение идеи шведского географа Т. Хегерстранда о том, что мир – это только «гобелен, вытканый историей», а пространство – это только ткань, сотканная из линий [18, С. 185]. Та же тема – жизни как потока линий, который превращается нашим сознанием в пространственные образы – у студентки А. Юсуповой нашла буквальное отражение в игре проекций стен строений и небесной геометрии облаков подхваченной водной гладью легендарного казанского озера Кабан (см. рисунок 1-а). Повторяемость графических сюжетов и знаков в нашем случае не недостаток, они выступают своеобразными знаками обнаружения зримых выражений того самого «духа места» и испытующего его времени.

Подобное видение может быть истолковано словами философа Г. Башляра: «К нашим изысканиям приложимо название «топофилия». Задача – определить человеческую ценность пространств, всецело нам принадлежащих, пространств нами любимых. Свойственная им реальная охранная ценность дополняется ценностями воображаемыми, и вскоре именно они становятся главными. Пространство, которым овладело воображение, не может оставаться индифферентным, измеряемым и осмысляемым в категориях геометрии. Речь идет о пространстве переживаемом. Переживается оно не в силу его объективных качеств, но со всей пристрастностью, на какую способно воображение». [19, С. 22-23].

Особое место среди описываемых работ занимает анаморфоза студента А. Снигирева – авторское повторение приема, известного задолго до творческих экспериментов Ороса.



Рис. 2 – Анаморфоза А.Снигирева

Поставив в рамках выполнения учебной задания задачу – освоить метод построения анаморфного изображения, он с опорой на представленные на выставке образцы, анализ чертежей из доступных источников, самостоятельные опыты по выстраиванию базовых для композиционного поиска архитектора форм равностороннего треугольника и куба (в рамках сегментарной сетки анаморфного изображения) смог достичь убедительного результата (см. рисунок 2).

Результатом работы студента стало представление визуальной иллюзии одного из памятников казанского классицизма – дома купца Котелова (арх. Н. Пятницкий, 1833). Особое смысловое поле, образуемое встречей архитектурного объекта, ныне находящегося на грани исчезновения, и элитарной технологии создания оптической иллюзии, определило неподдельно живой интерес как самого экспериментатора, так и всех его зрителей. Подобная реакция – выражение как значимости «ценностей воображаемых», так и интеллектуального подхода к созданию содержательных композиций. Работа, чью успешность определило обращение к «архиву» накопленных знаний (композиции, начертательной геометрии, архитектурной истории) и постоянно пополняемых визуальных образов (признанных мастеров, средового пространства), вызвала интерес и обсуждение архитекторов-педагогов кафедры РРАНиОА – участников кафедрального просмотра работ студентов; она же в ряду двенадцати других работ этого творческого исследования была представлена на выставке-вернисаже «Не может быть» в одном из старейших казанских музеев – Доме-музее Ленина, развернутой в рамках традиционного казанского праздника «День Города» (30 августа 2020 года). Графические построения, демонстрирующие пустынно-парадоксальные «невозможности» казанских пространств на празднике города, только что вышедшего из тоже, еще недавно кажущегося невозможным режима самоизоляции, обрели новое звучание и значимость.

## Основные результаты

Рабочая гипотеза – парадоксы городского «содержания», осознаваемые студентом как проблема несоответствия действительного и должного, могут быть выражены посредством парадоксальных композиционно-графических построений (треугольников Рутерсварда, Эшера, бесконечных лестниц, невозможных кубов и других, подобных им форм) с опорой на дополнительные материалы; а сам процесс этого выражения может стать одним из путей решения проблемы культивирования интеллектуальной функции будущих архитекторов – подтверждена; определяемые ей задачи нашли свое решение:

- проделан анализ опыта решения проблемы специалистами региональных архитектурных школ;
- выстроены действенные межпредметные связи композиционной дисциплины с курсовым проектированием и учебно-ознакомительной практикой;
- с опорой на материалы и действенный опыт учебно-ознакомительной практики в ходе выполнения творческого задания (многовариантного графического поиска и обсуждений) определены тема под условным названием «Казанские уроки с Иштваном Оросом»; возможные сюжеты ее «обнаружения» (противостояния нового и старого, несоответствия композиционно должного действительному); натурные объекты средового наполнения старых казанских улиц, обладающие должным потенциалом сюжетной образности;
- исходя из проявленного интереса участников эксперимента к арт-объектам выставки казанского ЦСК «Смена» выбраны аналоговые графические работы;
- с опорой на разработки графика-импоссибилиста О. Рутерсварда и самостоятельный поиск осмыслены, а затем опробованы на практике принципы построения «невозможных фигур» и анаморфоз;
- на основе формальных графических моделей разработаны авторские работы, отвечающие принципам композиции содержания;
- найдена форма конечного результата – представление работ в рамках выставочного проекта «Не может быть» в Доме-музее Ленина, базирующегося в исключительном средовом пространстве городской усадьбы второй половины XIX века.

Весь этот действенный ряд можно определить как локальное решение заявленной проблемы, одновременно – возможный путь самоценного творческого поиска начинающего проектанта (уже – архитектора-импоссибилиста и публичного интеллектуала) – от выполнения учебного задания к участию в выставочном проекте.

## Заключение

Значимость полученных результатов состоит в актуализации роли композиционной дисциплины, ее тем, приемов и артефактов, способных стать значимыми высказываниями на темы актуального архитектурного дискурса. Осознание необходимости интеллектуализации учебного процесса (его творческих заданий) позволяет взглянуть на описанный эксперимент как на локальную форму выражения идентичности казанского места и его обитателей студентов казанской архитектурной школы.

Включение работ учебного процесса в культурный городской контекст для студента — важный опыт раннего осознания своей профессиональной идентичности как незаменяемой части идентичности средового места (совокупности ландшафта, городской морфологии, зданий и людей, находящихся здесь разное время и в разное время суток [15, С. 227]), пребывающей (подобно ему самому) в состоянии постоянного преобразования.

Путь к ее формированию и возможному представлению пространственно-средовых феноменов в рамках актуального архитектурного дискурса — интеллектуализация базовой части образования, в частности - композиционной дисциплины (композиция как слитное понимание формальной и неформальной частей есть основа творчества [5, С. 17]).

Успешность движения по этому пути определяют творческий подход преподавателей к поиску тем, выстраиванию междисциплинарных связей, ориентация в работе с будущими проектантами на событийную значимость результата, определяемую, в частности, региональной тематикой и проблематикой.

В нашем случае задание было основано на столкновении формальных геометрических парадоксов импоссибилизма, приемов анаморфозных построений с частными региональными сюжетами, выражающими парадоксы и сложности исторического места в настоящем времени.

Подобное подход оказался действенно-продуктивным в рамках формирования авторских почерков и подходов группы студентов-архитекторов, находящихся в начале пути своего профессионального становления.

Таким образом, показано, что использование метода формальных геометрических парадоксов импоссибилизма может быть эффективно при решении задач, связанных с формированием у обучающихся профессиональных практических навыков и умений, связанных с художественно-графическими и проектно-аналитическими компетенциями. На основании вышеизложенного, можно говорить о том, что метод формальных геометрических парадоксов импоссибилизма может быть предложен профессорско-преподавательскому составу, участвующему в реализации образовательных программ высшего образования архитектурно-строительных направлений подготовки в качестве одного из инструментов по расширению практических профессиональных компетенций обучающихся.

Научную новизну исследования определяют выявленные в ходе его проведения конкретные приемы «перевода» формальной композиции в композицию содержания, а также — темы и возможный путь (от учебного упражнения — к выставочному проекту) «встраивания» студента начального этапа обучения в культурный процесс исторического города.

Практическая ценность исследования обуславливают возможность дальнейшего повторения и развития композиционного задания в учебном процессе, использования полученных графических листов и анаморфозы в качестве материалов методического фонда и артефактов других возможных выставочных проектов.



**Благодарности**

Выражаю благодарность директору Дома-музея  
В. И. Ленина Национального музея Республики  
Татарстан Басовой Т.И.

**Acknowledgement**

I would like to express my gratitude to the director of  
the V. I. Lenin House-Museum of the National Museum  
of the Republic of Tatarstan T. I. Basova.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Айзенман П. Суперкритика / П. Айзенман, Р. Колхас / пер. с англ. – М. : Strelka Press, 2017. – 218 с.
2. Venturi R. Learning from Las Vegas: The forgotten symbolism of architectural form / R. Venturi, D. S. Brown, S. Izenour. – Cambridge, MA : MIT Press, 1977. – 192 p. doi: 10.1177/089124167900800107
3. Javid A. Creativity in architecture design education: Design as puzzle solving / A. Javid. // International Journal of Design Education. – 2014. – Vol. 8(2). – P. 11–21. doi: 10.18848/2325-128x/cgp/v08i02/38463
4. Капустин П. В. Архитектурное образование: контуры требуемых перемен / П. В. Капустин, Ю. В. Карамзин. // Архитектурные исследования. – 2018. – № 2(14). – С. 4–10.
5. Ушакова Т. А. Формальная и неформальная композиция / Т. А. Ушакова. // сборник. научно-методических трудов № 4 «Архитектурно-художественная композиция». – Екатеринбург : Архитектон, 2012. – С. 8–18.
6. Ганзин В. Л. Архитектурное образование как лаборатория поиска решений острых проблем современности / В. Л. Ганзин, О. В. Пакалина. // Архитектурная среда и качество жизни населения городов: материалы Междунар. науч. конф. 21–22 октября 2014 г., Екатеринбург / М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Уральская государственная архитектурно-художественная академия». – Екатеринбург: Архитектон, 2014. – С. 55–58.
7. Быстрова Т. Ю. Город как предмет проектирования: критерии целесообразности / Т. Ю. Быстрова. // Архитектурная среда и качество жизни населения городов: материалы Междунар. науч. конф. 21–22 октября 2014 г., Екатеринбург / М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Уральская государственная архитектурно-художественная академия». – Екатеринбург: Архитектон, 2014. – С. 52–54.
8. Лазарева Э. А. Креолизация как основа подготовки архитекторов и градостроителей / Э. А. Лазарева, М. А. Очеретина. // Архитектурная среда и качество жизни населения городов: материалы Междунар. науч. конф. 21–22 октября 2014 г., Екатеринбург / М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Уральская государственная архитектурно-художественная академия». – Екатеринбург: Архитектон, 2014. – С. 106–108.
9. Грэм Г. Философия искусства: введение в эстетику / Г. Грэм / пер. с англ. – М. : Слово, 2004. – 256 с.
10. Азизян И. А. Теория композиции как поэтика архитектуры / И. А. Азизян, И. А. Добрицына, Г. С. Лебедев. – М. : Прогресс-Традиция, 2002. – 568 с.
11. Мартынов Ф. Т. Философия, эстетика, архитектура: учеб. пособие / Ф. Т. Мартынов. – Екатеринбург : Архитектон, 1998. – 534 с.
12. Рябов Н. Ф. Архитектурный аспект «Серебряной Фабрики» Э. Уорхола / Н. Ф. Рябов. // Известия КГАСУ. – 2014. – № 4 (30). – С. 83–92.
13. Рутерсвард О. Невозможные фигуры / О. Рутерсвард / пер. со швед. – М. : Стройиздат, 1990. – 128 с.
14. Бумажная архитектура. Из собрания банка Столичный. – М. : АРТ МИФ, 1994. – 124 с.
15. Ревзин Г. И. Как устроен город: 36 эссе по философии урбанистики / Г. И. Ревзин. – М.: Strelka Press, 2019. – 270 с.
16. Деревянная архитектура старой Казани: альбом / сост. В. И. Курашов. – Казань : Идел-Пресс, 2015. – 244 с.
17. Беляев М. Бандитский Татарстан-2 / М. Беляев. – Казань : АО «ТАТМЕДИА», «ПИК Идел-Пресс», 2019. – 306 с.
18. Ямпольский М. Б. Пространственная история. Три текста об истории / М. Б. Ямпольский. – СПб. : Книжные мастерские; Мастерская «Сеанс», 2013. – 344 с.
19. Башляр Г. Избранное: Поэтика пространства / Г. Башляр / пер. с франц. – М. : «Российская политическая энциклопедия» (РОССПЭН), 2004. – 376 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Eisenman P. Supercritica [Supercritical] / P Eisenman, R Koolhaas / trans. from english. – М. : Strelka Press, 2017. – 218 p. [in Russian]
2. Venturi R. Learning from Las Vegas: The forgotten symbolism of architectural form / R. Venturi, D. S. Brown, S. Izenour. – Cambridge, MA : MIT Press, 1977. – 192 p. doi: 10.1177/089124167900800107
3. Javid A. Creativity in architecture design education: Design as puzzle solving / A. Javid. // International Journal of Design Education. – 2014. – Vol. 8(2). – P. 11–21. doi: 10.18848/2325-128x/cgp/v08i02/38463
4. Kapustin P.V. Arkhitekturnoye obrazovaniye: kontury trebuyemykh peremen [Architectural Education: outlines of required change] / P.V. Kapustin, Yu.V. Karamzin. // Arkhitekturnyye issledovaniya [Architectural studies]. – 2018. – № 2(14). – P. 4–10. [in Russian]
5. Ushakova T. A. Formalnaja i neformalnaja kompozicija [Formal and informal composition] / T. A. Ushakova. // Sbornik nauchno-metodicheskikh trudov № 4 «Arhitekturno-hudozhestvennaja kompozicija» [Collection of scientific methodological works № 4 «Architecturally-art composition»]. – Yekaterinburg : Arhitekton, 2012. – P. 8–18. [in Russian]
6. Ganzin V. L. Arkhitekturnoye obrazovaniye kak laboratoriya poiska resheniy ostrykh problem sovremennosti [Architectural education as a laboratory for finding solutions to acute problems of our time] / V. L. Ganzin, O. V. Pakalina. // Arkhitekturnaya sreda i kachestvo zhizni naseleniya gorodov: materialy Mezhdunar. nauch. konf. 21–22 oktyabrya 2014 g. [Architectural environment and the quality of life of the population of cities: materials of the International scientific conference

21–22 October 2014]. Yekaterinburg / M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Feder. gos. bjudzhet. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. prof. obraovaniya «Ural'skaya gosudarstvennaya arkhitekturno-khudozhestvennaya akademiya» [The Ministry of Education and Science, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Ural State Academy of Architecture and Art»]. – Yekaterinburg: Architecton, 2014. – P. 55–58. [in Russian]

7. Bystrova T. Yu. Gorod kak predmet proyektirovaniya: kriterii tselesoobraznosti [City as a subject of design: criteria for expediency] / T. Yu. Bystrova. // Arkhitekturnaya sreda i kachestvo zhizni naseleniya gorodov: materialy Mezhdunar. nauch. konf. 21–22 oktyabrya 2014 g. [Architectural environment and the quality of life of the population of cities: materials of the International scientific conference 21–22 October 2014]. Yekaterinburg / M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Feder. gos. bjudzhet. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. prof. obraovaniya «Ural'skaya gosudarstvennaya arkhitekturno-khudozhestvennaya akademiya» [The Ministry of Education and Science, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Ural State Academy of Architecture and Art»]. – Yekaterinburg: Architecton, 2014. – P. 52–54. . [in Russian]

8. Lazareva E. A. Kreolizatsiya kak osnova podgotovki arkhitektorov i gradostroiteley [Creolization as the basis for training architects and urban planners] / E. A. Lazareva, M. A. Ocheretina. // Arkhitekturnaya sreda i kachestvo zhizni naseleniya gorodov: materialy Mezhdunar. nauch. konf. 21–22 oktyabrya 2014 g. [Architectural environment and the quality of life of the population of cities: materials of the International scientific conference 21–22 October 2014]. Yekaterinburg / M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Feder. gos. bjudzhet. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. prof. obraovaniya «Ural'skaya gosudarstvennaya arkhitekturno-khudozhestvennaya akademiya» [The Ministry of Education and Science, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Ural State Academy of Architecture and Art»]. – Yekaterinburg: Architecton, 2014. – P. 106–108. [in Russian]

9. Graham G. Filosofiya iskusstva: vvedeniye v estetiku [Philosophy of Art: An Introduction to Aesthetics] / G. Graham / trans. from english. – M. : Slovo, 2004. – 256 p. [in Russian]

10. Azizyan I. A. Teoriya kompozitsii kak poetika arkhitektury [Theory of composition as poetics of architecture] / I. A. Azizyan, I. A. Dobritsyna, G. S. Lebedev. – M. : Progress-Traditsiya, 2002. – 568 p. [in Russian]

11. Martynov F. T. Filosofiya, estetika, arkhitektura: ucheb. posobie [Philosophy, aesthetics, architecture: manual] / F. T. Martynov. – Yekaterinburg : Arkhitekton, 1998. – 534 p. [in Russian]

12. Ryabov N. F. Arkhitekturnyyi aspekt «Serebryanoy fabрики» E. Uorkhola [Architectural aspect of «Silver factory» of A. Warhol] / N. F. Ryabov. // Izvestiya KGASU [News of the KSUAE]. – 2014. – № 4(30). – P. 83–92. [in Russian]

13. Ruthersward O. Nevozmozhnyye figury [Impossible figures] / O. Rutersvard / trans. from the swede. – M. : Stroyizdat, 1990. – 128 p. [in Russian]

14. Bumazhnaya arkhitektura. Iz sobraniya banka Stolichnyy [Paper architecture. From the collection of Stolichny Bank]. – M. : ART MIF, 1994. – 124 p. [in Russian]

15. Revzin G. I. Kak ustroyen gorod: 36 esse po filosofii urbanistiki [How the city works: 36 essays on the philosophy of urbanism] / G. I. Revzin. – M.: Strelka Press, 2019. – 270 p. [in Russian]

16. Derevyannaya arkhitektura staroy Kazani: al'bom [Wooden architecture of old Kazan: album] / comp. V. I. Kurashov. – Kazan : Idel-Press, 2015. – 244 p. [in Russian]

17. Belyaev M. Banditskiy Tatarstan-2 [Banditsky Tatarstan-2] / M. Belyayev. – Kazan : AO «TATMEDIA», «PIK Idel-Press», 2019. – 306 p. [in Russian]

18. Yampolskiy M. B. Prostranstvennaya istoriya. Tri teksta ob istorii [Spatial history. Three texts about history] / M. B. Yampolskiy. – SPb. : Knizhnyye masterskiye; Masterskaya «Seans», 2013. – 344 p. [in Russian]

19. Bashlyar G. Izbrannoe: Poetika prostranstva [Favourites: Poetics of space] / G. Bashlyar / trans. from fr. – M. : «Rossiyskaya politicheskaya entsiklopediya» (ROSSPEN), 2004. – 376 p. [in Russian]