

№ 8 (98) ▪ 2020  
Часть 1 ▪ Август

---

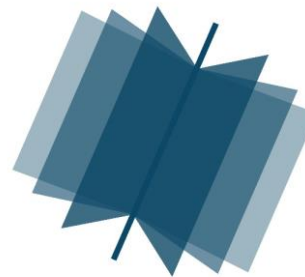
**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

***INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL***

---

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

Екатеринбург  
2020



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+

**№ 8 (98) 2020  
Часть 1  
Август**

Дата выхода 17.08.2020  
Подписано в печать 11.08.2020  
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);  
*Шеуджен А.Х.* д-р биол. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);  
*Ларионов М.В.* д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия).

**Архитектура:**

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

**Ветеринарные науки:**

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

**Медицинские науки:**

Никольский В.И. д-р мед. наук, проф., Пензенский государственный университет (Пенза, Россия);  
Ураков А.Л. д-р мед. наук, Ижевская Государственная 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 г. Пятигорске (Пятигорск, Россия);  
Мещерякова О.М. д-р юрид. наук, Всероссийская академия внешней торговли (Москва, Россия);  
Ергашев Е.Р. д-р юрид. наук, проф., Уральский государственный юридический университет (Екатеринбург, Россия).

**Сельскохозяйственные науки:**

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

**Социологические науки:**

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

**Химические науки:**

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

**Науки о Земле:**

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

**Экономические науки:**

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

**Политические науки:**

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

**Фармацевтические науки:**

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

**Екатеринбург  
2020**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

|  |    |
|--|----|
| Ахматов И., Кондратов И.В.<br>СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЧНОСТЕЙ В ВИДЕОПОТОКЕ .....                                 | 6  |
| Ганичева А.В., Ганичев А.В.<br>СТОХАСТИЧЕСКАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ СЛОЖНЫХ СОБЫТИЙ.....   | 11 |
| Октябрьский В.П., Рязанцева Л.Т.<br>ВЛИЯНИЕ ПАРНИКОВОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА ЧЕЛОВЕКА.....                                      | 16 |
| Улямаев К.С., Миськов А.Д.<br>ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА НА ГАБАРИТЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ<br>ТИПА «РИТМ» ..... | 20 |

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

|   |     |
|---|-----|
| Кузнецов О. Н., Аверьянов Д.А., Зуев А.И., Булатов Р.В., Бурмейстер М.В., Антаненков А.А.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ НА<br>УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЯ.....       | 29  |
| Айюб Ф., Гаряев Н.А.<br>РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ<br>ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....   | 41  |
| Быховцев Е.В.<br>РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛЬНОЙ<br>ТЕХНИКИ .....   | 47  |
| Хожиев Ш.Т., Ганиев А.А., Ротштейн В.М., Косимов И.О., Муродкобилов Д.М.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ МЕДИ .....  | 54  |
| Журавлев А. А., Трофимов С. П.<br>ОЦЕНКА ВРЕМЕННОЙ СЛОЖНОСТИ АЛГОРИТМОВ СОРТИРОВКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА<br>НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ .....   | 59  |
| Зуев А.И., Аверьянов Д.А., Антаненков А.А., Булатов Р.В., Бурмейстер М.В.<br>ОЦЕНКА ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ЯКОБИАНА ДЛЯ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ<br>СИСТЕМЫ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ..... | 66  |
| Клименко Ю.А., Преображенский А.П.<br>МОНИТОРИНГ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА БАЗЕ КОГНИТИВНЫХ<br>ИЗМЕРЕНИЙ.....   | 76  |
| Кузнецов Г.А., Кутуров Д. В.<br>ФОРМИРОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО МОЩНОСТНОГО РЯДА РОТОРНО-ПОРШНЕВЫХ<br>ДВИГАТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ АВИАЦИИ .....   | 81  |
| Лесовская М.И., Игошин А.С.<br>ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЁДА С ПОМОЩЬЮ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА .....  | 87  |
| Лукин А.А., Данилов М.Б., Пирожинский С.Г.<br>ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОБИАЛЬНЫХ ФЕРМЕНТОВ В ОТРАСЛЯХ<br>ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ.....  | 94  |
| Шершнева П.С., Тимошенкова И.А., Москвичева Е.В.<br>ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ПОМОЛА ПШЕНИЧНОЙ МУКИ НА ЕЁ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ<br>ХАРАКТЕРИСТИКИ .....   | 100 |
| Анашкина П.Ж., Москвичева Е.В., Тимошенкова И.А.<br>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ<br>ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ .....  | 105 |
| Ахунов А.И., Мунасыпова А.М., Рахмангулова А.М., Белоусова О.Ю., Япаев Р.Ш.<br>ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНОСТИ КАТАЛИЗАТОРОВ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА И МЕТОДЫ ЕЁ<br>ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....                                   | 111 |
| Середкин Д.Ю., Аверьянов Д.А., Булатов Р.В., Бурмейстер М.В.<br>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАШИН ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ, УЧАСТВУЮЩИХ В РЕГУЛИРОВАНИИ<br>РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, НА ПАРАМЕТРЫ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ.....             | 116 |
| Соколов П.Э., Нечай Д.В., Сентенберг С.А., Мячина А.А.<br>ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ<br>ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ.....                              | 132 |



|  |     |
|--|-----|
| Федотов В. А.....  | 144 |
| СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ХЛЕБОПЕКАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....  | 144 |
| Пьявченко А.О., Черный С.А., Шестаков А.В., Свирепю Е.А.<br>ОРГАНИЗАЦИЯ ФОРМАЛЬНО – КОГНИТИВНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ.....   | 148 |
| Тимохова О. М., Бурмистрова О. Н., Тимохов Р. С.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН .....   | 153 |
| Юдаков В.С., Деканоидзе Э.М., Мухтаров М.Ш., Тиличкан А.А.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕНИТНОГО УГЛА НАКЛОННО НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЫ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОКОЛОСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА ..... | 157 |
| <hr/> <b>СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ / AGRICULTURAL SCIENCES</b> <hr/>  |     |
| Агапова В.Д., Ваганова О.Ф., Волкова Г.В.<br>ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЮВЕНИЛЬНЫХ ГЕНОВ УСТОЙЧИВОСТИ К ВОЗБУДИТЕЛЮ БУРОЙ РЖАВЧИНЫ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ФАЗУ ПРОРОСТКОВ В УСЛОВИЯХ ЮГА РОССИИ .....                           | 163 |
| Ивлева О.Е., Берсенева С.А.<br>ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ИНТРОДУКЦИИ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР НА ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ.....  | 168 |
| Ивлева О.Е., Берсенева С.А., Митрополова Л.В.<br>РОЛЬ МНОГОЛЕТНИХ БОБОВЫХ ТРАВ В КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ ПРИМОРСКОГО КРАЯ.....   | 172 |
| Вайс А.А., Пономаренко Д.В.<br>ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПЫТА ДАННЫХ ПРИ АНАЛИЗЕ ВЫСОТ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ .....   | 177 |
| Жигадло Т.Э.<br>КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ИЗУЧАЕМЫХ СОРТОВ КАРТОФЕЛЯ В УСЛОВИЯХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ.....   | 183 |
| Башагуров К.А., Белов Л.А., Залесова Е.С., Залесов С.В.<br>ЛЕСОВОДСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ СОСНЯКА ЗЕЛЕНОМОШНО-ЯГОДНИКОВОГО ПОДЗОНЫ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ .....                        | 186 |
| Замятин С.А., Максимова Р.Б., Ефимова А.Ю., Максуткин С.А.<br>ГУМУСОВОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАЦИОНАРНОГО ОПЫТА В РЕСПУБЛИКЕ МАРИЙ ЭЛ .....                                      | 192 |
| Забиякин В.А., Титова С.В.<br>ПРОДУКТИВНЫЕ КАЧЕСТВА СОХРАНЯЕМОЙ ГЕНОФОНДНОЙ ГРУППЫ ВОЛЖСКИХ БЕЛЫХ ЦЕСАРОК В УСЛОВИЯХ КРЕСТЬЯНСКОГО ФЕРМЕРСКОГО ХОЗЯЙСТВА.....  | 197 |
| Костылев П.И., Балюкова Э.С., Серапионов Г.А.<br>СЦЕПЛЕННОЕ С ГЕНАМИ ОКРАСКИ ПЕРИКАРПА РИСА НАСЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ .....  | 202 |
| Коваленко Т.К., Лукашенко А.В.<br>ФИТОСАНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОСЕВОВ СОИ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ.....  | 208 |

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.001>

## СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЧНОСТЕЙ В ВИДЕОПОТОКЕ

Научная статья

Ахматов И.<sup>1,\*</sup>, Кондратов И.В.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-1601-2116;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6343-7168;<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,

\* Корреспондирующий автор (st040180[at]student.spbu.ru)

**Аннотация**

В работе рассматривались практические аспекты построения систем идентификации и верификации лиц в видеопотоке.

Практическая часть представляет собой прототип системы наблюдения и распознавания лиц в видеопотоке, с возможностью его оперативного введения в эксплуатацию и масштабирования. Для ее реализации были использованы передовые (так называемые "state of the art") алгоритмы машинного обучения, а для создания необходимой инфраструктуры прототипа - способные к масштабированию и распределенным вычислениям средства контейнеризации и хранения данных.

**Ключевые слова:** распознавание, наблюдение, видеопоток, сверточная нейронная сеть.

## VIDEOSTREAM SURVEILLANCE AND FACE RECOGNITION SYSTEM

Research article

Akhmatov I.<sup>1,\*</sup>, Kondratov I. V.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-1601-2116;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6343-7168;<sup>1,2</sup> Saint Petersburg State University,

\* Corresponding author (st040180[at]student.spbu.ru)

**Abstract**

The article looks into the practical aspects of developing a system of face identification and verification in a videostream. The practical part of this paper is made up of the pilot surveillance system capable of videostream face recognition, and the possibilities of scaling and putting it in operation quickly. For its implementation, advanced (so-termed "state of the art") machine-learning algorithms were used; and for the creation of the necessary pilot framework, the authors used containerization and data storage tools capable of scaling and grid computing.

**Keywords:** recognition, surveillance, videostream, convolutional neural net.

**Введение**

Контроль доступа к режимным объектам, средствам производства, ресурсам и информации – важнейшая для обеспечения безопасности задача. С развитием науки и техники, широкое распространение получили биометрические системы аутентификации. Появившиеся в середине 60-х годов, первые образцы представляли собой сканеры отпечатков пальцев; параллельно с их введением началась разработка систем идентификации по геометрии ладони, почерку, термограмме лица [1].

Сейчас же популярными являются методы с использованием голоса как средства подтверждения личности, зачастую применяемые в банковской сфере как дополнительное средство авторизации при телефонном звонке в банк. Метод основывается на анализе комбинации таких факторов как тембр, тон, интонация.

Прогресс в области разработки нейронных сетей позволил вывести биометрические системы аутентификации на новый уровень – использование deep learning моделей помогло повысить точность и скорость распознавания личности как с точки зрения анализа голоса, так и лица, позволяя разворачивать такие системы с меньшими затратами ресурсов [2].

С точки зрения обеспечения безопасности населения в местах массового скопления людей проблема распознавания лиц и определения личности становится жизненно важной в современном мире.

В рамках данной проблемы возникает задача идентификации человека не по статическому изображению, но в видеопотоке, где может присутствовать множество людей и качество данных может быть далеким от идеала. Подобные системы уже показали свою эффективность при контроле карантинного режима в Китае [3]. Результатом проделанной работы стал прототип полноценной системы идентификации лиц на основе видео, готовый к введению в эксплуатацию и совместимый с популярными серверными решениями.

**Основная часть**

Для реализации была выбрана архитектура ResNET. Это было сделано в силу нескольких причин:

- Данная сеть хорошо зарекомендовала себя в идентификации и верификации лиц, что показано в предыдущем разделе
- Обилие документации и примеров использования в исследовательских и коммерческих проектах

- Легко реализуемая масштабируемость в силу использования быстрых соединений, позволяющих информации пропускать некоторые слои

- ResNET имеет реализацию на трех основных фреймворках, применяемых в машинном обучении - TensorFlow, PyTorch и Caffe

ResNET вводит понятие быстрых соединений [4] - способа пропуска слоёв нейронной сети, что помогает бороться с проблемой затухающего градиента. Обычно используют пропуски одного, двух или трех слоёв. Использование дополнительной матрицы весов для пропуска применяют в вариации данной сети под названием HighwayNet.

При реализации практической части работы использовалась версия архитектуры нейронной сети ResNet-50. Наличие быстрых соединений позволяет снизить добиться более оптимальной производительности при достаточно большом числе слоев. Помимо этого, ResNet-50 и всё семейство ResNet в целом хорошо показали себя при работе на различных наборах данных с точки зрения как точности, так и производительности, что показано в работах [5], [6].

Для выделения области нахождения лица по интенсивности пикселей изображения на переведенном в черно-белый формат изображения, применяется классификатор вместе с методом HOG (Histogram of Oriented Gradients) [7]. Алгоритм строит на изображении сеть из ячеек фиксированного размера, для каждой из которых подсчитывается градиент, указывающий направление уменьшения интенсивности между ячейками (от более темных к более светлым). Путем вариации интенсивности алгоритм пытается достичь дискретизации областей освещенности, чтобы небольшие изменения интенсивности оказывали меньшее воздействие на значение градиента. Потом полученные карты изображения классифицируются, тем самым получая местоположение лица на кадре. В приложении используется комбинация из 5 перетренированных HOG-фильтров [8], [9], каждый из них для разной ориентации лица: спереди, слева, справа, а также спереди с поворотом влево и вправо. Это позволяет детектировать лица с различных ракурсов, тем самым повышая точность кодировок, подающихся на вход нейросети.

В процессе работы программы дополнительно применяется алгоритм ShapePredictor-68 Landmarks для определения положения лица в пространстве, основанный на ансамбле алгоритмов машинного обучения, а именно деревьев решений. Данный подход, наряду с нейронными сетями широко применяется для предсказания позиции лица в пространстве. Идея использования ансамблей заключается в том, что большое число достаточно "слабых" моделей, при усреднении их предсказаний дают весьма точный результат, что и было продемонстрировано в работе [10]. Определение положения лица в пространстве является важным шагом для идентификации личности по изображению, этот вопрос освещается в статье [6], где на наборе данных VGGFace2 показано, как различается точность при различном положении лица в кадре: профиль, анфас и 3/4.

Весь алгоритм работы системы можно разделить на пять основных шагов:

- Инициализация
- Загрузка данных
- Подготовка к обработке
- Обработка
- Показ результатов
- Завершение работы

На рисунках, представленных ниже, основные этапы обозначены различными цветами: белый, оранжевый, зеленый, фиолетовый, желтый, серый соответственно. На рисунке 1 представлен алгоритм запуска приложения из командной строки и первичная загрузка данных и сам процесс обработки. На рисунке 2 представлен алгоритм идентификации лиц, а на рисунке 3 – алгоритм их выделения из видео.

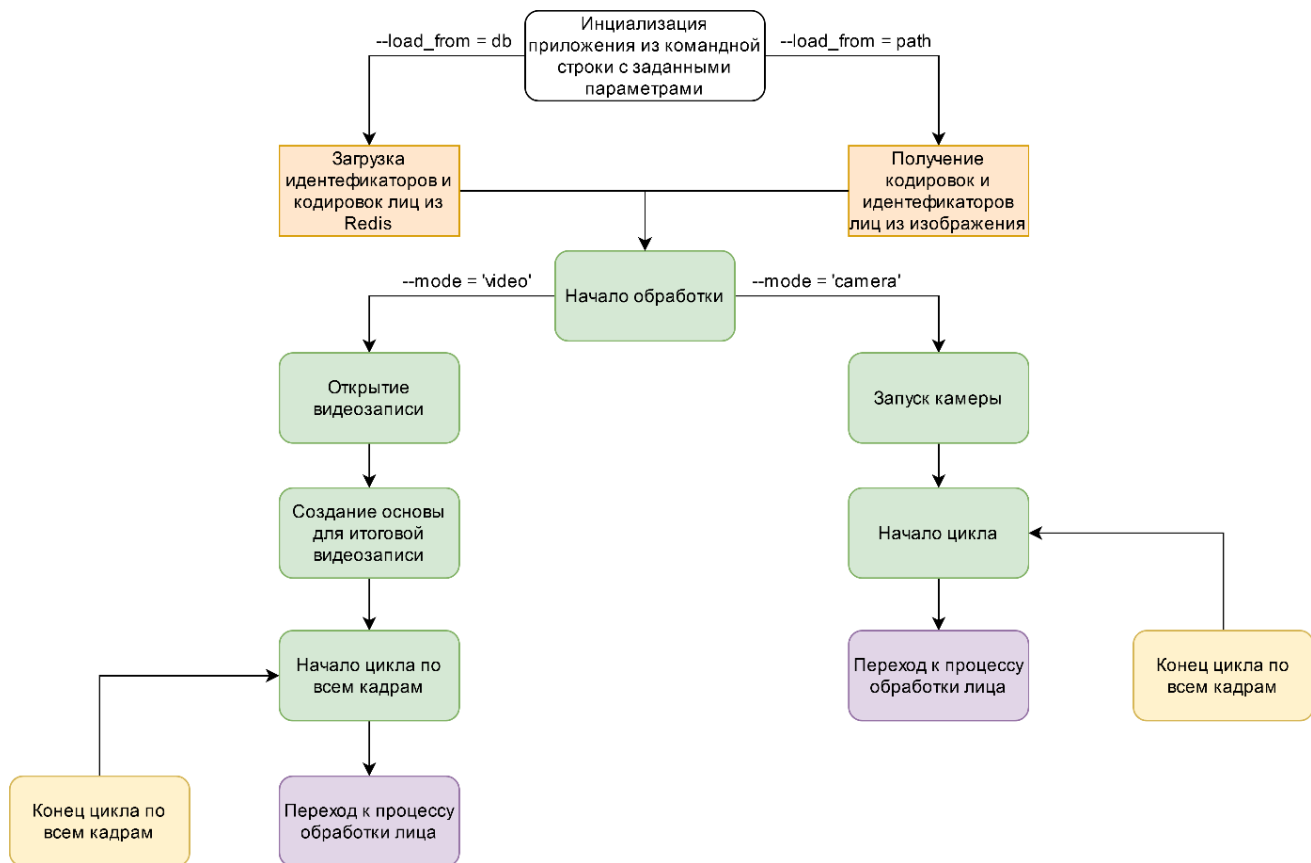


Рис. 1 – Инициализация, загрузка данных и подготовка к обработке

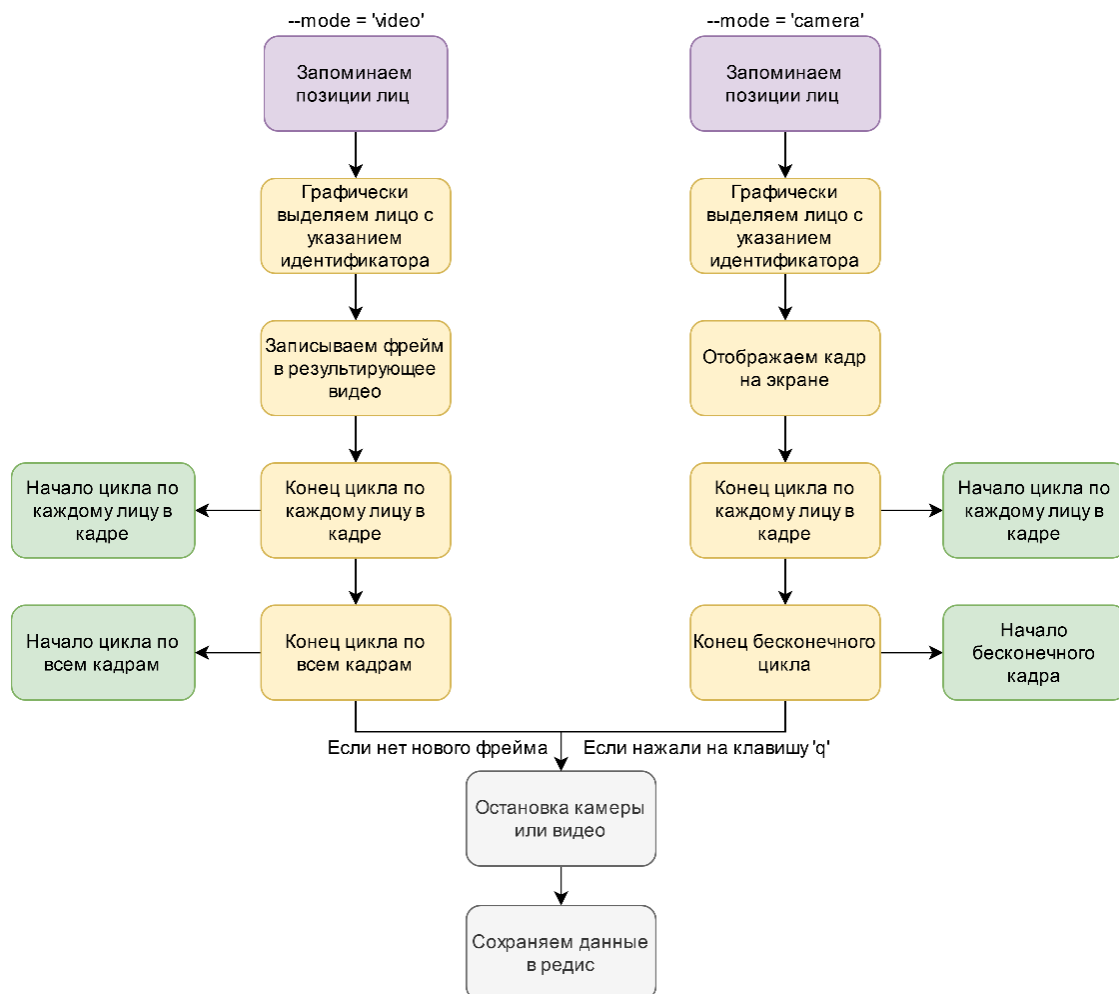


Рис. 2 – Процесс инициализации приложения

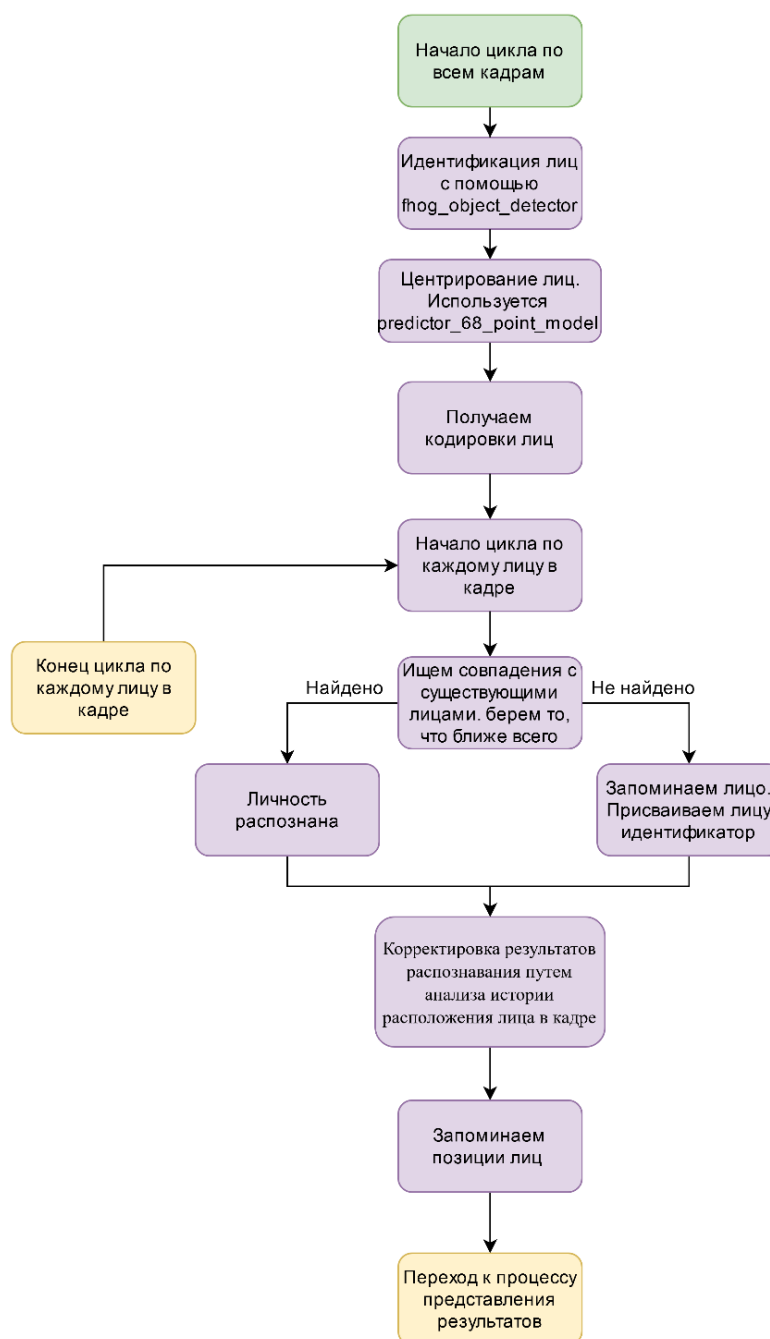


Рис. 3 – Инициализация, загрузка данных и подготовка к обработке

Результаты тестового запуска программы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Скорость обработки видеозаписи на различных устройствах

|              | Видеозапись 1, кадр/с | Видеозапись 2, кадр/с |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| Устройство 1 | 11.74                 | 10.31                 |
| Устройство 2 | 9.33                  | 8.394                 |

Приложение было запущено на двух различных устройствах. Устройство 1 представляет собой среднестатистический ноутбук с характеристиками: процессор: Intel Core i5-7267U, 3.1 ГГц, двухъядерный, кэш 4 мегабайта; видеокарта: Intel Iris Plus Graphics 650; оперативная память: 8 гигабайт LPDDR3 с частотой 2.13 МГц. Устройство 2 представляет собой стационарный компьютер: процессор: Intel Core i7-8700B, 3.2 ГГц, шестиядерный, кэш 12 мегабайт; видеокарта: Intel UHD Graphics 630;

оперативная память: 32 гигабайта DDR4 с частотой 2.6 МГц.

Видеозапись 1 длится 1 минуту 20 секунд, содержит 2356 кадров и имеет разрешение  $800 \times 600$ . Видеозапись 2 длится 44 секунды, содержит 1321 кадр и имеет разрешение  $800 \times 600$ .

Матрица неточностей (рисунок 4), полученная при обработке 1000 случайно выбранных изображений из набора данных VGGFace2 таким образом, что 90% изображений содержат лица, а оставшаяся часть - нет.

|             |               |        |        |        |    |      |        |     |        |         |    |
|-------------|---------------|--------|--------|--------|----|------|--------|-----|--------|---------|----|
|             | <b>0,9871</b> | 0,9702 | 0,9898 | 0,9898 | 1  | 0,99 | 0,9898 | 1   | 0,9801 | 0,96116 | 1  |
| <b>0,98</b> |               | 1      | 2      | 3      | 4  | 5    | 6      | 7   | 8      | 9       | 10 |
| 0,98        | 1             | 98     | 0      | 0      | 0  | 1    | 0      | 0   | 1      | 0       | 0  |
| 0,98        | 2             | 0      | 98     | 0      | 0  | 0    | 0      | 0   | 1      | 1       | 0  |
| 0,98        | 3             | 1      | 0      | 98     | 0  | 0    | 0      | 0   | 0      | 1       | 0  |
| 0,99        | 4             | 0      | 0      | 0      | 99 | 0    | 0      | 0   | 0      | 1       | 0  |
| 0,99        | 5             | 0      | 0      | 0      | 0  | 99   | 0      | 0   | 0      | 1       | 0  |
| 0,98        | 6             | 1      | 1      | 0      | 0  | 0    | 98     | 0   | 0      | 0       | 0  |
| 1           | 7             | 0      | 0      | 0      | 0  | 0    | 0      | 100 | 0      | 0       | 0  |
| 0,99        | 8             | 1      | 0      | 0      | 0  | 0    | 0      | 0   | 99     | 0       | 0  |
| 0,99        | 9             | 0      | 0      | 0      | 0  | 0    | 1      | 0   | 0      | 99      | 0  |
| 0,99        | 10            | 0      | 0      | 1      | 0  | 0    | 0      | 0   | 0      | 0       | 99 |

Рис. 4 – Матрица неточностей

Были получены следующие показатели: точность - 0,987000; полнота - 0,9871357; F-мера - 0,987067. Результат оценивался по нескольким показателям:

- Точность - отношение количества изображений, истинно принадлежащих классу к размеру всей выборки
- Полнота системы - доля найденных классификатором изображений, принадлежащих к классу относительно всех изображений этого класса в тестовой выборке

### Заключение

На основе анализа предметной области был сделан выбор в пользу наиболее подходящих с практической точки зрения инструментов. Была реализована полноценная система слежения и идентификации лиц в видеопотоке с применением зарекомендовавших себя практик при создании приложений. Построенная система выполняет свою задачу, а также обладает потенциалом к быстрому развертыванию на большинстве широко используемых систем и масштабированию.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Mayhew S. History of Biometrics // 2020, [Electronic resource] URL: <https://www.biometricupdate.com/201802/history-of-biometrics-2> (accessed: 16.07.2020)
2. Sundararajan K. Deep Learning for Biometrics: A Survey / K. Sundararajan, Woodard K. Damon. // ACM Computing Surveys (51), 2018, pp. 1-34.
3. Jakhar P. Coronavirus: China's tech fights back / P. Jakhar // BBC Monitoring 2020, [Electronic resource] URL: <https://www.bbc.com/news/technology-51717164> (accessed: 16.07.2020)
4. He K. Identity Mappings in Deep Residual Networks / He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. // ArXiv, 2016, abs/1603.05027.
5. Shepley A.J. Deep Learning For Face Recognition: A Critical Analysis / A.J. Shepley // ArXiv, 2019, abs/1907.12739.
6. Wang Q. Benchmarking deep learning techniques for face recognition / Q. Wang, G. Guo // Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol. 65, 2019.
7. Jia Y. Caffe: Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding / Jia Y. et al. // ArXiv, 2014, abs/1408.5093.
8. Cai Lei., HOG-assisted deep feature learning for pedestrian gender recognition / Cai, Lei, Jianqing Zhu, Huanqiang Zeng, Jing Chen, Canhui Cai and Kai-Kuang Ma. // J. Frankl. Inst. 355 (2018): 1991-2008.
9. Wang Xiaoyu An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling / Wang, Xiaoyu, Tony X. Han and Shuicheng Yan. 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (2009): 32-39.
10. Kazemi, V. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees / V. Kazemi, J. Sullivan // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014, 1867- 1874.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.033>**СТОХАСТИЧЕСКАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ СЛОЖНЫХ СОБЫТИЙ**

Обзорная статья

**Ганичева А.В.<sup>1</sup>, Ганичев А.В.<sup>2,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0224-8945;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3389-7582;<sup>1</sup> Тверская государственная сельскохозяйственная академия, Тверь, Россия;<sup>2</sup> Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия,

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

**Аннотация**

Проблема независимости случайных событий является одной из самых важных и недостаточно изученных в теории вероятностей. Важность проблемы вызвана массовым применением в практических приложениях допущения о независимости факторов. В статье показаны формулы для вычисления условных вероятностей суммы, произведения событий и противоположного события. Установлены два необходимых и достаточных условия независимости событий. Полученные результаты могут использоваться в интеллектуальных системах принятия решений.

**Ключевые слова:** событие, условная вероятность, произведение, сумма событий, критерий независимости, фактор, равенство, утверждение.

**STOCHASTIC INDEPENDENCE OF COMPLEX EVENTS**

Review article

**Ganicheva A.V.<sup>1</sup>, Ganichev A.V.<sup>2,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0224-8945;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3389-7582;<sup>1</sup> Tver State Agricultural Academy, Tver, Russia;<sup>2</sup> Tver State Technical University, Tver, Russia,

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

**Abstract**

The problem of independence of random events is one of the most important and insufficiently studied in probability theory. The importance of the problem is caused by the mass application of the assumption of independence of factors in practical provisions. The article shows formulas for calculating the conditional probabilities of a sum, the product of events and the opposite event. Two necessary and sufficient conditions for the independence of events have been determined. The obtained results can be used in intelligent decision-making systems.

**Keyword:** event, conditional probability, product, sum of events, independence criterion, factor, equality, statement.

**Введение**

Многие вероятностно-статистические модели основываются на использовании независимых событий в качестве результатов измерений, наблюдений, испытаний, опытов, анализа данных. Например, в системах распознавания объектов предполагают независимость их характерных признаков, в системах диагностики говорят о независимости появления одного вида дефектов изделий от других видов, при выпуске продукции используют понятие независимости факторных переменных и т.д. Причиной частого использования независимости случайных событий является существенное упрощение математических выкладок по сравнению с зависимыми событиями. Понятие независимости событий носит философски-методологический характер [5]. При этом следует учитывать субъективный и объективный подходы к данному вопросу [3]. Как отмечается в работе [7, С. 463], вероятностный подход является ключевым в современном научном мировоззрении. В научной литературе недостаточно рассмотрены вопросы условных вероятностей и независимости событий.

При использовании основ теории вероятностей возникают две задачи:

1) нахождение условных вероятностей произведения и суммы событий, а также условной вероятности противоположного события;

2) установление критерия независимости событий.

Эти две задачи определяют цель данной статьи.

**Постановка задачи**

Как отмечается в [4, С. 132], понятие условной вероятности является основным элементом теории вероятностей. А.Н. Колмогоров полагал, что идея независимости является центральной в статистике [10]. В статье [9] описан способ построения вероятностных мер посредством условных относительных мер, относящихся ко всей совокупности наблюдаемых событий.

Условной вероятностью события  $A$  при наличии  $B$  называется вероятность события  $A$ , вычисленная при условии, что событие  $B$  произошло. Принято обозначение  $P(A/B)$ .

Приведем определение независимых событий, данное в [1], [2], [4]. Событие  $A$  называется независимым от  $B$ , если его вероятность не зависит от того, произошло событие  $B$  или нет, т.е.  $P(A/B) = P(A)$ . В противном случае, если  $P(A/B) \neq P(A)$ , событие  $A$  зависит от  $B$ . Сформулируем основные свойства условных вероятностей и докажем критерий независимости сложных событий.

**Теоремы об условных вероятностях**

Важной задачей, возникающей при работе с условными вероятностями, является нахождение условных вероятностей произведения и суммы событий, а также вероятности противоположного события. Из приведенных ниже соотношений (1)-(8) формулы (1)-(5), (7) отражены в литературе, (6) и (8) не нашли должного отражения.

Теорема 1. Для любых событий  $A, B, C$  справедливы следующие соотношения:

$$P(A/B) = \frac{P(AB)}{P(B)} = \frac{P(A) \cdot P(B/A)}{P(B)} \quad (1)$$

$$P(\bar{A}/B) = 1 - P(A/B) \quad (2)$$

$$P(A/\bar{B}) = \frac{P(A) \cdot P(\bar{B}/A)}{P(\bar{B})} \quad (3)$$

$$P(A + B/C) = P(A/C) + P(B/C) - P(AB/C) \text{ (для совместных событий)} \quad (4)$$

$$P(A + B/C) = P(A/C) + P(B/C) \text{ (для несовместных событий)} \quad (5)$$

$$P(A \cdot B/C) = P(A/C) \cdot P(B/AC) \quad (6)$$

$$P(C/AB) = \frac{P(C) \cdot P(AB/C)}{P(AB)} \quad (7)$$

$$P(C/AB) = \frac{P(CA/B)}{P(A/B)} \quad (8)$$

Доказательство. Соотношения 1 и 2 очевидны; соотношение 3 следует из 1; соотношение 7 вытекает из 1, 8 – из 6. Доказательство соотношения 6 вытекает из следующей цепочки равенств:

$$P(A \cdot B/C) = \frac{P(ABC)}{P(C)} = \frac{P(AC) \cdot P(B/AC)}{P(C)} = \frac{P(C) \cdot P(A/C) \cdot P(B/AC)}{P(C)} = P(A/C) \cdot P(B/AC).$$

Докажем соотношения 4 и 5. Имеем:

$$P(A + B/C) = \frac{P((A+B) \cdot C)}{P(C)} = \frac{P(AC + BC - ABC)}{P(C)} = \frac{P(AC) + P(BC) - P(ABC)}{P(C)} =$$

$$= \frac{P(C) \cdot P(A/C) + P(C) \cdot P(B/C) - P(C) \cdot P(AB/C)}{P(C)} = P(A/C) + P(B/C) - P(AB/C). \text{ Для несовместных событий:}$$

$$P(A + B/C) = \frac{P((A+B) \cdot C)}{P(C)} = \frac{P(A \cdot C + B \cdot C)}{P(C)} = \frac{P(C) \cdot P(A/C) + P(C) \cdot P(B/C)}{P(C)} = P(A/C) + P(B/C).$$

Утверждения 4, 5 доказаны.

**Необходимые и достаточные условия независимости**

Другая важная задача теории вероятностей – установление критерия независимости событий. Для иллюстрации доказательства независимости воспользуемся определением, что независимые события  $A$  и  $B$  не имеют попарно общих элементов, а в сумме составляют все пространство элементарных событий [4].

Теорема 2. Первое необходимое и достаточное условие независимости двух событий.

Пусть  $A = A_1 + A_2$ ;  $A_1 \cdot A_2 = V$  (невозможное событие),

$A_1 \neq V, A_2 \neq V, B = B_1 + B_2, B_1 \cdot B_2 = V, B_1 \neq V, B_2 \neq V, C = AB \neq V, A_1 \neq C, A_2 \neq C, B_1 \neq C, B_2 \neq C.$

Пусть  $P(A_1) \neq P(A_2)$  и  $P(B_1) \neq P(B_2)$ .

Тогда для независимости событий  $A$  и  $B$  необходимо и достаточно, чтобы либо событие  $A$  не зависело от  $B_1$  и  $B_2$ , либо событие  $B$  не зависело от событий  $A_1$  и  $A_2$ .

Доказательство. Пусть  $A$  не зависит от  $B_1$  и  $B_2$ .



$$\begin{aligned} \text{Найдем } P(A \cdot B) &= P(A \cdot (B_1 + B_2)) = P(A \cdot B_1 + A \cdot B_2) = P(AB_1) + P(AB_2) = \\ &= P(A) \cdot P(B_1/A) + P(A) \cdot P(B_2/A) = P(A) [P(B_1/A) + P(B_2/A)] = P(A) \cdot [P(B_1) + P(B_2)] = P(A) \cdot P(B). \end{aligned}$$

Следовательно,  $P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B)$ . А это и означает независимость событий  $A$  и  $B$ .

Докажем утверждение в обратную сторону. Пусть  $A$  и  $B$  - независимые события. Найдем

$$\begin{aligned} P(A \cdot B) &= P((A_1 + A_2) \cdot (B_1 + B_2)) = (P(A_1) + P(A_2)) \cdot (P(B_1) + P(B_2)) = \\ &= P(A_1) \cdot P(B_1) + P(A_1) \cdot P(B_2) + P(A_2) \cdot P(B_1) + P(A_2) \cdot P(B_2). \end{aligned}$$

В то же время

$$\begin{aligned} P(A \cdot B) &= P(A_1) \cdot P(B_1 + B_2/A_1) + P(A_2) \cdot P(B_1 + B_2/A_2) = \\ &= P(A_1) \cdot P(B_1/A_1) + P(A_1) \cdot P(B_2/A_1) + P(A_2) \cdot P(B_1/A_2) + P(A_2) \cdot P(B_2/A_2). \end{aligned}$$

Из полученных соотношений

имеем равенство:

$$\begin{aligned} P(A_1) \cdot P(B_1/A_1) + P(A_1) \cdot P(B_2/A_1) + P(A_2) \cdot P(B_1/A_2) + P(A_2) \cdot P(B_2/A_2) &= \\ = P(A_1) \cdot P(B_1) + P(A_1) \cdot P(B_2) + P(A_2) \cdot P(B_1) + P(A_2) \cdot P(B_2). \end{aligned}$$

Преобразуем последнее

равенство к виду:

$$P(A_1) [P(B_1/A_1) + P(B_2/A_1) - (P(B_1) + P(B_2))] = -P(A_2) [P(B_1/A_2) + P(B_2/A_2) - (P(B_1) + P(B_2))].$$

Отсюда получаем:

$$P(A_1) [P(B/A_1) - P(B)] = P(A_2) [P(B) - P(B/A_2)] \quad (9)$$

Аналогично получаем равенство:

$$P(B_1) [P(A/B_1) - P(A)] = P(B_2) [P(A) - P(A/B_2)] \quad (10)$$

Предположим, что  $P(B/A_1) - P(B) \neq 0$  и  $P(A/B_1) - P(A) \neq 0$ . Получаем

$$\frac{P(A_1)}{P(A_2)} = \frac{P(B) - P(B/A_2)}{P(B/A_1) - P(B)} \quad (11)$$

$$\frac{P(B_1)}{P(B_2)} = \frac{P(A) - P(A/B_2)}{P(A/B_1) - P(A)} \quad (12)$$

Представим  $A$  в виде  $A = A_1 + A_2$ , тогда равенство (12) преобразуется к виду:

$$\frac{P(B_1)}{P(B_2)} = \frac{P(A_1) + P(A_2) - P(A_1/B_2) - P(A_2/B_2)}{P(A_2/B_1) + P(A_2/B_1) - P(A_1) - P(A_2)} \quad (13)$$

Выразим  $P(A_1)$  из (11) и, подставив в последнее равенство, после преобразования получим

$$\frac{P(B_1)}{P(B_2)} = -\frac{P(A_2) [P(B/A_1) - P(B/A_2)] + P(A/B_2) [P(B) - P(B/A_1)]}{P(A_2) [P(B/A_1) - P(B/A_2)] + P(A/B_1) [P(B) - P(B/A_1)]}.$$

Аналогично, выразим  $P(A_2)$  из (11) и, подставив в (13), после преобразования будем иметь

$$\frac{P(B_1)}{P(B_2)} = -\frac{P(A_1) [P(B/A_2) - P(B/A_1)] + P(A/B_2) [P(B) - P(B/A_2)]}{P(A_1) [P(B/A_2) - P(B/A_1)] + P(A/B_1) [P(B) - P(B/A_2)]}.$$

Положим  $a = P(B/A_2) - P(B/A_1)$ ,  $b = P(B) - P(B/A_1)$ ,  $c = P(B) - P(B/A_2)$ ,  $d = P(A_1)$ ,  $e = P(A_2)$ ,  $k = P(A/B_2)$ ,  $m = P(A/B_1)$ .

Тогда, сравнивая правые части выражения  $\frac{P(B_1)}{P(B_2)}$ , получим

$$\frac{-ea + kb}{-ea + mb} = \frac{da + kc}{da + mc}.$$

Отсюда:  $-ea^2d - eamc + kdba + kbma = -ea^2d - eakc + mbda + mbkc$ .

Преобразуем последнее выражение:

$$ce(k - m) = bd(m - k), \text{ или } (k - m)(ce + bd) = 0.$$

Отсюда следует, что либо 1)  $k = m$ , либо 2)  $ce + bd = 0$ .

В первом случае получаем, что  $P(A/B_2) = P(A/B_1)$ , но это и означает независимость  $A$  от  $B_1$  и  $B_2$ . Для второго случая имеем:

$$[P(B) - P(B/A_1)] \cdot P(A_2) + [P(B) - P(B/A_2)] \cdot P(A_1) = 0,$$

$$\text{то есть } P(A_2)[P(B/A_1) - P(B)] = P(A_1)[P(B) - P(B/A_2)].$$

Отсюда с применением равенства (9) получаем, что  $P(A_1) = P(A_2)$ . Это противоречит условию.

Если  $P(B/A_1) = P(B)$ , то тогда из условия  $P(A/B) = P(A)$  следует, что  $P(A_2/B) = P(A_2)$ , т.е.  $B$  зависит от  $A_1$  и  $A_2$ . Аналогично рассматривается случай, когда  $P(A/B_1) = P(A)$ . Независимость  $B$  от  $A_1$  и  $A_2$  доказывается таким же способом.

Теорема 2 доказана.

Теорема 3. Второе необходимое и достаточное условие независимости двух событий.

Пусть  $A = A_1 + A_2$ ;  $A_1 \cdot A_2 = V$  (невозможное событие),

$$A_1 \neq V, A_2 \neq V, B = B_1 + B_2, B_1 \cdot B_2 = V, B_1 \neq V, B_2 \neq V, C = AB \neq V, A_1 \neq B_1, A_2 \neq B_1, A_1 \neq B_2, A_2 \neq B_2 \quad \text{и} \\ P(B_1) \neq P(B_2) \text{ или } P(A_1) \neq P(A_2).$$

Тогда для независимости  $A$  и  $B$  необходимо и достаточно, чтобы  $A_1$  и  $A_2$  были независимы от  $B_1$  и  $B_2$ .

Доказательство. Пусть  $A_1, A_2$  не зависят от  $B_1$  и  $B_2$ . Докажем, что тогда  $A$  не зависит от  $B$ .

$$\begin{aligned} \text{Найдем } P(A \cdot B) &= P((A_1 + A_2)(B_1 + B_2)) = P(A_1B_1 + A_1B_2 + A_2B_1 + A_2B_2) = \\ &= P(A_1B_1) + P(A_1B_2) + P(A_2B_1) + P(A_2B_2) = P(A_1) \cdot P(B_1) + P(A_1) \cdot P(B_2) + \\ &+ P(A_2) \cdot P(B_1) + P(A_2) \cdot P(B_2) = P(A_1)[P(B_1) + P(B_2)] + \\ &+ P(A_2)[P(B_1) + P(B_2)] = P(A_2) \cdot P(B) + P(A_2) \cdot P(B) = \\ &= P(B)[P(A_1) + P(A_2)] = P(B) \cdot P(A). \end{aligned}$$

Следовательно,  $P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B)$ , а это означает независимость событий  $A$  и  $B$ .

Докажем утверждение в обратную сторону. Пусть  $A$  и  $B$  - независимые события. Докажем, например, что  $A_1$  не зависит от  $B_1$  и  $B_2$ .

Поскольку любое событие  $A_1$  связано с действием некоторого фактора  $G$ , то это действие можно заменить действием двух факторов  $G_1$  и  $G_2$  таких, что результаты действия  $G_1$  и  $G_2$  есть события  $A_3$  и  $A_4$ , соответственно, и такие, что  $A_1 = A_3 + A_4 = A_3 + \bar{A}_3A_4$ ,  $P(A_3) = P(A_4)$ . При этом можно считать действия  $G_1$  и  $G_2$  независимыми, а поэтому события  $A_3$  и  $A_4$  также будут независимы.

По условию,  $B_1$  совместно с  $A_1$ , а поэтому действия соответствующих факторов  $L$  и  $G$ , связанные с этими событиями, также могут произойти вместе. Но тогда  $L$  может произойти одновременно с факторами  $G_1$  и  $G_2$ , а в этом случае  $B_1$  может произойти совместно с событиями  $A_1 = A_3$  и  $A_1'' = \bar{A}_3A_4$ . Аналогично доказывается, что  $B_2$  совместно с  $A_3$  и  $\bar{A}_3A_4$ .

Кроме того, по условию  $P(B_1) \neq P(B_2)$ , и можно доказать, что  $P(A_1') \neq P(A_1'')$ .

$$\text{В самом деле, поскольку } P(A_3) = P(A_4), \text{ то } P(A_1') = P(A_3) \quad P(A_1'') = [1 - P(A_3)] \cdot P(A_3) = P(A_3) - [P(A_3)]^2$$

Поэтому если  $P(A_1') = P(A_1'')$ , то  $P(A_3) = P(A_3) - [P(A_3)]^2$ , а это возможно только в том случае, когда  $P(A_3) = 0$ , а этого не может быть, так как тогда  $P(A_4) = 0$  и  $P(A_1) = 0$ , т.е.  $A_1 = V$  - противоречит условию.

Нетрудно видеть, что мы оказываемся в рамках предыдущей теоремы. А именно:  $B$  не зависит от  $A_1$ . Кроме того,

$B = B_1 + B_2, B_1 \cdot B_2 = V, A_1 = A'_1 + A''_1$ , где  $A'_1 = A_3$ ,  $A''_1 = \bar{A}_3 \cdot A_4$ , и  $A'_1 \cdot A''_1 = V$ ,  $B_1$  и  $B_2$  совместны с  $A'_1$  и  $A''_1$ , т.е. если  $C = BA_1$ , то  $A'_1 \neq C$ ,  $A''_1 \neq C$ ,  $B_1 \neq C$ ,  $B_2 \neq C$ ; кроме того  $P(A'_1) \neq P(A''_1)$  и  $P(B_1) \neq P(B_2)$ .

Отсюда следует, что  $A_1$  не зависит от  $B_1$  и  $B_2$ . Совершенно аналогично доказываем независимость  $A_2$  от  $B_1$  и  $B_2$ . Теорема 3 доказана.

### Заключение

На основе условных вероятностей событий строятся Байесовские сети доверия, которые используются для принятия и обоснования решений в системах искусственного интеллекта. Практическое применение полученных результатов заключается в возможности организации корректной обработки больших массивов статистических данных, на основе доказанных в работе теорем. Сложность вычисления вероятностей сложных событий вызывает необходимость их приближенного вычисления.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Ганичева А. В. Теория вероятностей / А. В. Ганичева. - Санкт-Петербург: Лань, 2017. - 144 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. - М.: КноРус, 2010. - 664 с.
3. Зепнова Н.Н. Субъективный и объективный подходы к решению задач теории вероятностей и дискретной математики / Н.Н.Зепнова, О.В. Кузьмин // Вестник Бурятского государственного университета. - 2017. - № 7. - С. 196-204.
4. Орлов А.И. Математика случая. Вероятность и статистика – основные факты / А.И. Орлов, М.: МЗ-Пресс, 2004. - 170 с.
5. Резников В.М. Философско-методологический анализ понятия независимости в вероятностной теории причинности и в теории вероятностей / В.М. Резников // Философия науки. - 1998. - № 1. - С. 6.
6. Солодухин А. Приближенное вычисление вероятности сложного события в условиях объективной недостаточности статистических опытов / А. Солодухин // Труды Второй Российской конференции молодых ученых по информационному поиску. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 79-89.
7. Татаринов В.В. Замечание об основаниях теории вероятностей /В.В. Татаринов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. - 2003. - Т. 8. № 3. - С. 462-464.
8. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. В 2-х томах. Том 1 / В. Феллер, М.: Мир, 1984. – 528 с.
9. Чечулин В. Л. Статьи разных лет: сборник / В.Л. Чечулин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. — Вып. 4. – 136 с.
10. Cartwright N. False idealizations: A probabilistic threat to scientific method / N. Cartwright // Philos. Studies, 1995. - V. 77. - N. 3. - P. 339 - 352.

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

1. Ganicheva A. V. Teorija verojatnostej [Probability theory] / A. V Ganicheva. – Sankt-Peterburg : Lan', 2017. – 144 p. [in Russian]
2. Ventcel E. S. Teorija verojatnostej [Probability theory] / E. S. Ventcel. – M. : KnoRus, 2010. – 664 p. [in Russian]
3. Zepnova N. N. Subjektivnyj i objektivnyj podhody k resheniju zadach teorii verojatnostej i diskretnoj matematiki [Subjective and objective approaches to solving the problems of probability theory and discrete mathematics] / N. N. Zepnova, O. V. Kuzmin // Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Buryat State University]. –2017. – № 7. – P. 196-204. [in Russian]
4. Orlov A. I. Matematika sluchaja. Verojatnost' i statistika – osnovnye fakty [Mathematical variants. Probability and statistics – the main facts] / A. I. Orlov, M. : MZ-Press, 2004. – 170 p. [in Russian]
5. Reznikov V. M. Filosofsko-metodologicheskij analiz ponjatija nezavisimosti v verojatnostnoj teorii prichinnosti i v teorii verojatnostej [Philosophical and methodological analysis of the concept of independence in the probabilistic theory of causality and in the theory of probabilities] / V. M. Reznikov // Filosofija nauki [The philosophy of Science]. – 1998. – № 1. – P. 6. [in Russian]
6. Soloduhin A. Priblizhennoe vychislenie verojatnosti slozhnogo sobytija v uslovijah objektivnoj nedostatocnosti statisticheskikh opytov [The approximate calculation of the probability of a complex event in the conditions of objective insufficiency of statistical experiments] / Soloduhin A. // Trudy Vtoroj Rossijskoj konferencii molodyh uchenyh po informacionnomu poisku [The Materials of the Second Russian Conference of Young Scientists on Information Search] – Taganrog : TTI JuFU, 2008. – pp. 79-89. [in Russian]
7. Tatarinov V. V. Zamechanie ob osnovanijah teorii verojatnostej [The remark on the foundations of probability theory] / V. V. Tatarinov // Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija: Estestvennye i tehicheskie nauki [Bulletin of the University of Tambov. Series: Natural and technical sciences]. – 2003. – Vol. 8. № 3. P. 462-464. [in Russian]
8. Feller V. Vvedenie v teoriju verojatnostej i ejo prilozhenija. V 2 tomah. Tom 1 [Introduction to probability theory and its applications. In two volumes. Vol. 1] / V. Feller, M. : Mir, – 1984. – 528 p. [in Russian]
9. Chechulin V. L. Stat'i raznyh let: sbornik [The collection of articles of different years] / V. L. Chechulin; Perm. gos. nac. issled. un-t [Perm State National Research University]. – Perm', 2017. – Issue. 4. – 136 p. [in Russian]
10. Cartwright N. False idealizations: A probabilistic threat to scientific method / N. Cartwright // Philos. Studies, 1995. – V. 77. – N. 3. – P. 339 - 352.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.002>**ВЛИЯНИЕ ПАРНИКОВОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА ЧЕЛОВЕКА**

Научная статья

**Октябрьский В.П.<sup>1,\*</sup>, Рязанцева Л.Т.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6878-8303;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4921-3694;<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург Россия;<sup>1</sup> Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия,

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

**Аннотация**

В данной работе предлагается модель, согласно которой можно рассчитать воздействие, оказываемое на генетическую активность человека, а, следовательно, и его здоровье, со стороны естественного состояния природы: атмосферного (парникового) углекислого газа. Составляющие клеток человека, содержащие ДНК, в зависимости от структурного уровня организации хромосом, имеют различные резонансные частоты, которые лежат, в том числе, в ИК области. Оказалось, что эта резонансная частота в спектре поглощения, например, для ядерной ДНК совпадает с частотой двукратно вырожденного деформационного колебания парникового углекислого газа в ИК спектре излучения. Такое же совпадение (по порядку величины) наблюдалось у соответствующих мощностей его оптического излучения и поглощаемой всеми ядерными ДНК человека. В последнем случае численное значение рассчитывали в дипольном приближении с учетом количества всех ядерных ДНК человека. Таким образом, парниковый углекислый газ влияет на человека. Это воздействие происходит благодаря "парниковому эффекту" и может осуществляться через мембраны определенных клеток кожи. Из-за близости оптических мощностей, падающих на человека за счет парникового эффекта и излучаемых его геномом на одной и той же частоте, возможен резонанс, а, следовательно, и влияние на генетическую активность и его здоровье.

**Ключевые слова:** парниковый углекислый газ, парниковый эффект, спектр поглощения, мощность излучения, генетическая активность.

**THE IMPACT THAT GREENHOUSE CARBON DIOXIDE HAS ON HUMAN**

Research article

**Oktiabrskiy V. P.<sup>1,\*</sup>, Riazantseva L. T.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6878-8303;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4921-3694;<sup>1,2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia;<sup>1</sup> Federal State-Funded Institution Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

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

**Abstract**

This paper suggests a model that can be used to calculate the impact that atmospheric (greenhouse) carbon dioxide has on human genetic activity, and consequently, on their health. Constituent parts of the human cells which contain DNA demonstrate various resonating frequencies, including those of the IR spectrum; it depends on the structural level of chromosome organisation. It turned out that this resonating frequency of the absorbance spectrum, for example, for the nuclear DNA, concurs with the frequency of the twice degenerate deformation vibrations of the greenhouse carbon dioxide in the IR radiated spectrum. Likewise, concurrence (in the order of values) could be seen at the complying powers of its optical radiation and is absorbed by all the human nuclear DNAs. In this latter case, the numerical value was calculated through dipole approximation, taking into account all human nuclear DNAs. Thus, the greenhouse carbon dioxide affects human. This impact occurs due to the "greenhouse effect" and can occur through the membranes of some particular skin cells. Due to the proximity of the optical powers getting to the human because of the greenhouse effect and the powers radiated by their genome at the same frequency resonance is possible which, consequently, makes possible the impact upon human genetic activity and health.

**Keywords:** greenhouse carbon dioxide, greenhouse effect, absorbance spectrum, radiated power, genetic activity.

**Введение**

Экология окружающей среды беспокоит многих людей из-за влияния на здоровье. Известно, что геном человека представляет собой совокупность наследственного материала, содержащегося в его клетке. Геном находится в молекулах ДНК в ядре и митохондриях клетки, и поэтому ДНК называется соответственно ядерной и митохондриальной. У этих молекул разные линейные размеры, и поэтому они имеют разные резонансные частоты [1, С. 5], на которые реагирует геном. Важно отметить, что частота  $830\text{ см}^{-1}$  для ядерной ДНК, рассчитанная из модельных представлений и лежащая в инфракрасной (ИК) области, совпадает в пределах погрешности с частотой одного из максимумов интенсивности в спектре поглощения ДНК [2, С. 158].

Такое же совпадение наблюдается для частоты ее первого обертона  $1660\text{ см}^{-1}$  и основного тона  $1061\text{ см}^{-1}$  митохондриальной ДНК. Теоретическое и экспериментальное исследование генома давно вызывает большой интерес. Этому посвящена, например, монография «Волновая генетика» академика Гаряева П.П. В ней так же, как и первой вышеупомянутой работе, говорится о корпускулярно-волновом дуализме генома, на который можно благотворно влиять, используя внешние источники оптических излучений, в т.ч., лазеры в ближней ИК, видимой и ближней ультрафиолетовой области.

Естественно возникает вопрос: существуют ли какие-нибудь натуральные природные инфракрасные источники (в отличие от работ академика Гаряева П.П.) оптического излучения в этом диапазоне (более длинноволновом, чем тот, о котором говорилось выше), которые могут оказывать воздействие на активность ядерных ДНК, а, следовательно, самого человека, его здоровье. Под этой активностью будем понимать такое состояние генома, когда частота падающего излучения совпадает с его частотой поглощения (излучения), а мощность достигает порога активации, то есть, в случае резонанса: настройки приемника на частоту.

Интересно отметить, что частота колебаний для ядерной ДНК находится в средней ИК области спектров поглощения (испускания) парниковых (атмосферных) газов Земли. Мы будем использовать традиционные термины «парниковый газ» (ПГ) и «парниковый эффект» (ПЭ), хотя они не соответствуют реальным процессам происходящим в атмосфере [3, С. 84], употребляя их в том смысле, что в рассматриваемой ИК области происходит излучение атмосферными газами поглощенной тепловой радиации Земли.

Далее, обратим внимание на ПГ, которые наиболее распространены в атмосфере и спектры поглощения (испускания) которых находятся в исследуемом нами оптическом ИК диапазоне: атмосферные пары воды, озон и углекислый газ (диоксид углерода, далее «ДУ»). У первых двух ПГ активные частоты колебаний находятся далеко от интересующей нас области  $830\text{ см}^{-1}$ . Поэтому рассмотрим парниковый ДУ. Хотя его процентное содержание в атмосфере Земли от общего объема в тропосфере составляет только 0,03% [4, С. 20], однако, в соответствии с экспоненциальным законом Бугера-Ламберта-Бэра нужно учитывать значительный эффективный поглощающий слой тропосферы (он составляет примерно 8 км и фигурирует под экспонентой). Поэтому рассмотрим эту молекулу более подробно.

Молекула ДУ относится к линейным молекулам точечной группы симметрии  $D_{\infty h}$ . Следовательно, она обладает центром симметрии. Активные частоты колебаний находятся в средней ИК области (см. таблицу 1). Кроме того, в одной колебательной полосе находятся сотни вращательных, то есть, мы имеем так называемую колебательно-вращательную полосу. В зависимости от изменения вращательного квантового числа  $J$  (принимает значения:  $-1, 0, +1$ ) при переходе с нижнего колебательного уровня на верхний в общем случае имеем соответственно ветви Р, Q и R с симметрией

$E_u$  и  $A_u$ . Это соответствует перпендикулярным и параллельным полосам: зависит от того, как направлен дипольный момент по отношению к оси молекулы.

Таблица 1 – Активные частоты основных мод ДУ в ИК поглощении

| Основные моды | Волновое число, $\text{см}^{-1}$ | Параллельные (1) и перпендикулярные полосы (2) | Тип симметрии |
|---------------|----------------------------------|--|---------------|
| $\nu_2$ (010) | 667                              | P, Q, R (2)                                    | $E_u$         |
| $\nu_3$ (001) | 2350                             | P, R (1)                                       | $A_u$         |

Таким образом, целью данного исследования является разработка расчетной модели для определения оптической мощности излучения парникового ДУ, воздействующей на человека вследствие ПЭ на полосе двукратно вырожденного деформационного колебания (010)  $667\text{ см}^{-1}$ , мощности излучения всеми его ядерными ДНК в этом диапазоне частот, а также сравнение этих мощностей между собой с оценкой возможного влияния на активность генома и здоровье человека.

### Методы исследований

Численное значение мощности излучения для ядерных ДНК на единицу площади (эффективная площадь человека, примерно,  $2\text{ м}^2$ ), единицу частотного интервала и единицу телесного угла рассчитывали в дипольном приближении [5, С. 90] по известной классической формуле для излучения диполя с учетом дипольного момента (вторая степень) молекулы ДНК, равным  $1015\text{ Дб}$  [6, С. 88], а также ее резонансной частоты (четвертая степень). Суммарная мощность всех ядерных ДНК человека определялась исходя из их численного значения в клетке и всех клеток человека. Соответствующая мощность излучения парникового ДУ была определена путем умножения максимальной мощности излучения в его модельном спектре на коэффициент, равный отношению интегральных интенсивностей реального спектра и аналогичного спектра по модельным представлениям из работы [7, С. 31, 38, 85]. В обоих случаях: на частоте парникового ДУ и ядерной ДНК; рассчитывалось также соответствующее тепловое излучение человека, как излучение для абсолютно черного тела (см., например, [8, С. 3]). Кроме того, косвенно оценивалось воздействие на самочувствие (здоровье) человека. Известно, что вблизи мест, богатых озоном [9]: реки, леса, моря; человек хорошо себя чувствует. Поэтому вблизи одного из самых широких мест реки Вуокса (примерно ей перпендикулярно и на расстоянии 1 км) экспериментально был определен горизонтальный термический градиент (ТГ) температур [10, С. 1]. Он связан с ПЭ основных парниковых (атмосферных) газов: парами воды, ДУ и озоном. При этом, учитывался ТГ реки, связанный с дневным и ночным бризом.

### Результаты и обсуждение

На основе приведенных выше представлений были получены результаты с погрешностями, которые сведены в таблицу 2. В ней представлены также частота (F) излучения парникового ДУ вследствие поглощенного теплового излучения Земли [7, С. 85] и частота ядерной ДНК по модельным представлениям [1, С. 9]. Погрешность частоты ( $\Delta F$ ) ядерной ДНК в этом случае определялась погрешностью рентгеноструктурного анализа при определении соответствующих линейных размеров, которая составляет 5% [11]. В таблице с погрешностью ( $\Delta P$ ), представлена также полученная оптическая мощность излучения (P) парникового ДУ и мощность, излучаемая всеми ядерными ДНК человека.

Таблица 2 – Частоты и мощности поглощения (излучения) для парникового ДУ и всех ядерных ДНК человека

|                      | F, см <sup>-1</sup> | ΔF, см <sup>-1</sup> | P, Вт/(м <sup>2</sup> см <sup>-1</sup> ст) | ΔP, Вт/(м <sup>2</sup> см <sup>-1</sup> ст) |
|----------------------|---------------------|----------------------|--|---|
| Парниковый ДУ        | 667                 | 144                  | 0.30                                       | 0.10  |
| Ядерные ДНК человека | 830                 | 42                   | 0.16<br>(310K)                             | 0.03  |

В результате (см. таблицу 2) было получено, что в пределах погрешности соответствующие частоты для парникового ДУ и ядерных ДНК человека совпадают, а соответствующие оптические мощности излучения (поглощения) совпадают по порядку величины. Они оказались почти на порядок величины больше, чем соответствующие тепловые мощности (см. выше) излучения человека.

Что касается косвенной оценки влияния парниковых газов на здоровье человека, то можно отметить следующее. Поскольку горизонтальный ТГ температур (см. выше) оказался в несколько раз выше ТГ, связанного со столкновением теплого и холодного фронтов атмосферы, то в данном случае имеет место воздействие ПЭ на человека. Причем, оптические мощности излучения для паров воды [12, С. 51] и озона [13], совпадающие соответственно с первым обертоном ядерной ДНК и основным тоном митохондриальной ДНК (см. выше), оказались равными и почти на порядок меньше, чем для ДУ. Все вышесказанное может означать, что, влияя на генетическую активность человека, парниковые газы одновременно оказывают на него благотворное влияние.

### Заключение

Учитывая вышесказанное, можно предложить модель, в соответствии с которой осуществляется воздействие парникового ДУ на человека:

1. Солнечная радиация в видимой и ближней инфракрасной области, достигая поверхности Земли, нагревает ее, примерно, до 290 К.
2. В свою очередь, Земля излучает тепло в атмосферу в средней и длинноволновой ИК области, в том числе, в диапазоне полосы (010) атмосферного ДУ.
3. Парниковый ДУ, поглощая полученное от Земли тепловое излучение в диапазоне полосы (010), в свою очередь, излучают его в космическое пространство и на Землю, воздействуя на человека.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие заключения:

1. Резонансная частота ядерных ДНК человека в пределах погрешности совпадает с частотой излучения (010) парникового ДУ.
  2. Мощность излучения (поглощения) парниковым ДУ и всеми ядерными ДНК человека на соответствующих частотах (см. п. 1) в пределах погрешности совпадают (до первого знака после запятой) и оказываются почти на порядок величины больше соответствующих тепловых мощностей излучения человека.
  3. Исходя из выводов в пунктах 1 и 2, то есть, при совпадении оптических мощностей излучения (поглощения) на одной частоте может наступить резонанс (настройка приемника), то есть, воздействие на геном.
  4. Это воздействие (см. п. 3) происходит из-за парникового эффекта (так же, как и в случае парниковых паров воды и озона) вследствие излучения парниковым ДУ поглощенной тепловой радиации Земли. Непосредственное благотворное влияние (см. выше) на человека может осуществляться, например, через мембраны определенных клеток кожи [1, С. 11].
- Таким образом, из-за близости оптических мощностей, падающих на человека из-за парникового эффекта и излучаемых геномом человека на одной и той же частоте, возможен резонанс, а, следовательно, воздействие на генетическую активность и благотворное влияние на человека, его здоровье.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Чиркова Э.Н. Волновая природа регуляции генной активности. Живая клетка как фотонная вычислительная машина / Э.Н. Чиркова // Русская мысль. – № 2. – С. 29-41.
2. Тымченко Е.Е. ИК спектроскопия водных растворов ДНК в присутствии ионов металлов / Е.Е. Тымченко, А.М. Поляничко // Вестник СПбГУ. Физика и химия. – 2017. – Вып. 2. – Т. 4. – С. 153-162.
3. Oktyabrskiy V.P. A new opinion of the greenhouse effect / V.P. Oktyabrskiy // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2016. no. 2. P. 124–126.
4. Рабинович В.Я. Краткий химический справочник / В.Я. Рабинович, З.Я. Хазов. Л.: Химия. 1978. 356 с.
5. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М.А. Ельяшевич. М.: Эдиториал УРСС. 2001. 896 с.
6. Кабанов А.В. Внутренний механизм генерации значительного дипольного момента молекулы ДНК. Квантово-химический анализ / А.В. Кабанов, В.М. Комаров. – [Электронный ресурс] URL: [http://www.ivtn.ru/2005/biomedchem/enter/t\\_pdf/db05\\_37.pdf](http://www.ivtn.ru/2005/biomedchem/enter/t_pdf/db05_37.pdf) (дата обращения: 25.01.2020).
7. Борисов С.Ф. Исследование характеристик парниковых газов на основе солнечной ИК Фурье-спектроскопии и построение физических моделей процессов тепломассопереноса в атмосфере / С.Ф. Борисов. – Научно-технический отчет. – Екатеринбург, 2011. – 175 с.
8. Characteristics and Use of Infrared Detectors // [Electronic resource] URL: <http://www.hamamatsu.com.jp/en/index.html> (accessed: 26.04.2020).

9. Ozonation // [Electronic resource] : URL: <http://www.tiensmed.ru/>.. (accessed: 26.05.2020)
10. Oktyabrskiy V.P. Experimental Method of Assessing the Efficiency of Greenhouse Ozone on Human / V.P. Oktyabrskiy // Journal of Nursing and Health Studies. – 2017. – Vol. 2. – No.3:19. – P. 1-2.
- 11 Structural error analysis // [Electronic resource] URL: [www.chem21.info/info/1776641/](http://www.chem21.info/info/1776641/). (accessed: 06.05.20)
12. Октябрьский В.П. Влияние парниковых паров воды на человека / В.П. Октябрьский, Л.Т Рязанцева // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 2. – Ч. 2. – С. 49-52.
13. Октябрьский В.П. Парниковый озон и здоровье человека / В.П. Октябрьский, Л.Т Рязанцева // Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования. – 2020. – № 4.

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

1. Chirkova E. N. Volnovaya priroda regulyatsii gennoj aktivnosti. Zhivaya kletka kak fotonnaya vychislitel'naya mashina [Wave nature of gene activity regulation. A living cell as a photonic computer]. 1992. Russkaya Mysl. № 2. pp. 29-41. [in Russian]
2. Tymchenko E.E. IK spektroskopija vodnyh rastvorov DNK v prisutstvii ionov metallov [IR-spectroscopy of DNA water solutions in the presence of metal ions] / E.E. Tymchenko, A.M. Poljanichko // Vestnik SPbSU. Physics and Chemistry. – 2017. Issue. 2. – Vol. 4. – P. 153-162. [in Russian]
3. Oktyabrskiy V.P. A new opinion of the greenhouse effect / V.P. Oktyabrskiy // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2016. no. 2. P. 124–126.
4. Rabinovich V. Ya. Kratkijhimicheskij spravochnik [Quick reference chemistry handbook] / V. Ya. Rabinovich, Z. Ya. Khazov. – Л.: Khimiya. – 1978. – 356 pp. [in Russian]
5. Eliashevich M. A. Atomnaya i molekulyarnaya spektroskopiya [Atomic and molecular spectroscopy] / M. A. Eliashevich–M.: Editorial URSS. – 2001. – 896 pp. [in Russian]
6. Kabanov A. V. Vnutrennij mekhanizm generatsii znachitel'nogo dipol'nogo momenta molekuly DNK. Kvantovo-himicheskij analiz [Internal mechanism for generating a significant dipole moment of the DNA molecule. Quantum chemical analysis.] / A. V. Kabanov, V. M. Komarov // [Electronic resource] URL: [http://www.ivtn.ru/2005/biomedchem/enter/t\\_pdf/db05\\_37.pdf](http://www.ivtn.ru/2005/biomedchem/enter/t_pdf/db05_37.pdf) (accessed: 25.01.2020). [in Russian]
7. Borisov S. F. Issledovanie harakteristik parnikovyh gazov na osnove solnechnoj IK Fur'e-spektrometrii i postroenie fizicheskikh modelej processov teplomassoperenosa v atmosfere. Nauchno-tehnicheskij otchet. [Research of greenhouse gas characteristics based on solar I.R. Fourier spectrometry and construction of physical models of heat and mass transfer processes in the atmosphere. Scientific technical report.] / S. F. Borisov. – Yekaterinburg, 2011. – 175 pp. [in Russian]
8. Characteristics and Use of Infrared Detectors // [Electronic resource] URL: <http://www.hamamatsu.com.jp/en/index.html> (accessed: 26.04.2020).
9. Ozonation // [Electronic resource] : URL: <http://www.tiensmed.ru/>.. (accessed: 26.05.2020)
10. Oktyabrskiy V.P. Experimental Method of Assessing the Efficiency of Greenhouse Ozone on Human / V.P. Oktyabrskiy // Journal of Nursing and Health Studies. – 2017. – Vol. 2. – No.3:19. – P. 1-2.
- 11 Structural error analysis // [Electronic resource] URL: [www.chem21.info/info/1776641/](http://www.chem21.info/info/1776641/). (accessed: 06.05.20)
12. Oktyabrskiy V. P. Vliyanie parnikovyh parov vody na cheloveka. Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya. [The effect of greenhouse water vapour on human. Trends in the development of science and education.] / V. P. Oktyabrskiy, L. T. Riazantseva. – 2020. – No 2. – Part 2. – p. 49-52. [in Russian]
13. Oktyabrskiy V. P. Parnikovyj ozon i zdorov'e cheloveka. Medicina. Sociologiya. Filosofiya. Prikladnye issledovaniya. [Greenhouse ozone and human health] / V. P. Oktyabrskiy, L. T. Riazantseva // Medicine. Sociology, Philosophy. Applied research. – 2020. – № 4.[in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.003>**ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА НА ГАБАРИТЫ  
РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТИПА «РИТМ»**

Обзорная статья

**Улямаев К.С.<sup>1,\*</sup>, Миськов А.Д.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8024-0156;<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия,

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

**Аннотация**

Хотя работы по исследованию, улучшению и проектированию ЯЭУ проводятся еще с середины прошлого века, в некоторых моментах она все еще остается недоработанной и многие аспекты требуют изучения. Постоянно встает вопрос и подборе материалов трубопроводов, оболочек твэл, ТВС, выбор топлива и типа реактора. Подбор вариантов всегда ситуативный, базирующийся на назначение установки, места и способа её эксплуатации. Немаловажным стоит вопрос влияния состава различных топлив и материалов активной зоны (а.з) на длительное время работы ЯППУ при стопроцентной мощности, её экономическая выгода по сравнению с другими композициями. Нахождение сбалансированного варианта цена-качество является необходимой задачей.

**Ключевые слова:** ЯЭУ, РИТМ, нейтронный поток, материалы а.з.**THE INFLUENCE OF NON-UNIFORMITY OF THE NEUTRON FLUX ON THE SIZE  
OF THE "RHYTHM" TYPE REACTOR PLANT**

Review article

**Ulyamaev K. S.<sup>1,\*</sup>, Miskov A. D.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8024-0156;<sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;<sup>2</sup> The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia

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

**Abstract**

Although the work on research, improvement and design of the nuclear power plant has been carried out since the middle of the last century, in some points it still remains incomplete and many aspects require further studying. There is always a question of selecting the necessary materials for pipelines, fuel-element cladding, fuel assemblies, and the problem of which fuel and reactor type to choose. The selection of options always depends on the situation, the purpose of the installation, the location and the method of operation. Another important problem is the influence of the composition of various fuels and materials of the reactor core on the long-term operation of the nuclear steam generating plant at the full reactor power raising. Its economic benefit in comparison with other compositions should also be taken into consideration. It is necessary to find a balanced price-quality option.

**Keywords:** nuclear power plant, RHYTHM, neutron flux, reactor core materials.**Введение**

В связи со сложностью установления оптимальных характеристик и выбора материалов для реакторной установки (РУ) под определенную поставленную задачу, была написана данная статья, целью которой было проведение теплового и физического расчета а.з. с нахождением оптимальной комбинаций параметров кампании а.з. и неравномерности нейтронного потока на основе полученных данных габаритов установки на примере ЯЭУ РИТМ - 200. Также приведен экономический расчет.

**Основная часть. Материалы а.з.**

В наиболее тяжелых условиях в процессе эксплуатации находятся оболочки твэлов. Они подвергаются одновременному воздействию облучения, высоких температур, значительных статических и динамических нагрузок, а также взаимодействию материала топлива и теплоносителя. В то же время за все время эксплуатации оболочки твэлов должны сохранять целостность и герметичность. Снаружи на оболочку действует давление теплоносителя, через оболочку передается значительный тепловой поток, который отличается неоднородностью. На переходных режимах действующие на твэл нагрузки, в особенности термическое напряжение, значительно изменяются, вызывая неравномерную деформацию и искривление твэлов. Опасность разрушения оболочки твэла под действием механических нагрузок усугубляется тем, что пластические свойства материала оболочки могут существенно снизиться под воздействием высоких температур, медленной пластической деформации и реакторного излучения. Рабочая температура на оболочках твэлов водо-водяных реакторов равна 350-400°C, в реакторах с жидкометаллическими теплоносителями она достигает 500-700°C. При этих температурах материал оболочки твэл взаимодействует, с одной стороны, с теплоносителем, с другой – с топливным сердечником. Это взаимодействие может вызвать коррозию материала, а также твердых интерметаллидов. Также требуются материалы для оболочек твэл, которые слабо поглощают тепловые нейтроны, обеспечивая тем самым меньшее обогащение топлива.

Рассмотрев условия работы оболочек твэлов, к их материалу предъявляют повышенные требования такие, как:



- 1) хорошие теплофизические свойства – высокий коэффициент теплопроводности, низкую теплоемкость и малый коэффициент термического расширения;
- 2) хорошие ядерные свойства – минимальное сечение поглощения нейтронов;
- 3) высокая жаропрочность, термостойкость и радиационная стойкость – стабильность структуры и свойств материала и сохранение формы и размеров деталей при воздействии температуры, нейтронного и других излучений;
- 4) высокая коррозионная и эрозионная стойкость;
- 5) хорошие технологические свойства материала, позволяющие без проблем работать с металлом.

Наибольшее распространение в реакторах для изготовления твэлов и ТВС активной зоны получили циркониевые сплавы типа циркалой, который и был рассмотрен в данной работе. В сплавах циркалой сочетается относительно высокие прочностные свойства с хорошей коррозионной стойкостью в воде при широком интервале температур. Коррозионная стойкость циркониевых сплавов близка к стойкости чистого циркония. Выплавка сплавов циркалой-2 и циркалой-4 происходит на сравнительно дешевом способе, благодаря введению в состав сплава олова, способного блокировать действие наиболее вредных примесей, например, азота. Также были разработаны сплавы циркония с ниобием.

Таблица 1 – Химический состав сплавов на основе циркония

| Марка сплава | Содержание элементов |         |           |           |           |
|--------------|----------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
|              | Sn                   | Nb      | Fe        | Cr        | Ni        |
| Циркалой-2   | 1,2-1,7              | -       | 0,07-0,2  | 0,05-0,15 | 0,03-0,08 |
| Циркалой-4   | 1,2-1,7              | -       | 0,12-0,18 | 0,05-0,15 | 0,007     |
| Zr-1% Nb     | -                    | 0,9-1,1 | -         | -         | -         |
| Zr-2,5 Nb    | -                    | 2,4-2,7 | 0,1       | -         | 0,1       |

Сплав циркалой-2, имеющий в своем составе никель, более склонен к наводороживанию, что послужило главной причиной преждевременного выхода из строя оболочек твэлов из этого сплава на некоторых реакторах. Данная проблема привела к необходимости усовершенствования состава сплава циркалой-2 и разработки сплава циркалой-4, в котором почти отсутствует никель. Исходя из тематики задания и вышеперечисленных качеств, в работе был взят и рассмотрен сплав циркалой-4, как основной элемент для твэлов и матрицы.

### Топливо

Ядерное топливо применяют в виде керамики или дисперсионной смеси. Дисперсионное ядерное горючее представляет металлическую матрицу из неделящегося материала, в которой размещены дисперсные топливные частицы. Каждая частица ядерного топлива представляет собой микротвэл размером до 500 мкм. Из-за высокой теплопроводности матрицы температуры частиц относительно невелики, поэтому набухание, то есть появление в уране пузырьков газообразных продуктов деления, топливо незначительно и сдерживается матрицей. В качестве материала матрицы используют алюминий, цирконий и нержавеющие стали.

Керамическое топливо представляет собой соединение урана и плутония с кислородом, углеродом и другими неметаллами. Керамическое топливо имеет высокую температуру плавления и хорошие ядерно-физические свойства. Наилучшими свойствами обладает двуокись урана  $UO_2$ , которая и была взята за основу в данной работе. Она имеет высокую плотность, технологична и химически инертна. Двуокись урана не взаимодействует с такими теплоносителями, как вода, пар, натрий, углекислый газ и гелий, а также с нержавеющей сталью. Недостатком двуокиси урана может служить низкая теплопроводность, которая снижается при облучении. Двуокись урана используется в реакторах в виде цилиндрических таблеток. Технологический процесс изготовления включает прессование смеси порошка двуокиси урана со связующим веществом и последующем спеканием.

### Исследование

Данное исследование проводилось в программе «MARS», написанной в стенах Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. За основу исследуемого объекта была взята РУ РИТМ-200 с её основными характеристиками. Программа «MARS» написана применительно к активной зоне судового водо-водяного ядерного реактора на тепловых нейтронах в высоко- и низкообогащенным ядерный горючим.

Задачей предварительного и теплового расчетов является определение габаритов активной зоны (высоты и диаметра), диаметра твэла, размеров и числа кассет.

Алгоритм предварительного и теплового расчетов составлен таким образом, что позволяет рассматривать семь вариантов задач. Во всех задачах общим является задание мощности реактора, кампании, температур на входе и выходе зоны для водо-водяного реактора под давлением или массового паросодержания на выходе из активной зоны для водо-водяного реактора кипения.

При расчете по исходным величинам температуры теплоносителя на входе и выходе активной зоны определяется давление первого контура, если оно не было задано. Давление теплоносителя определяется из условия отсутствия кипения при 20% - ной перегрузке по мощности с одновременным снижением массового расхода теплоносителя через активную зону на 15%. Выбор того или иного варианта расчета зависит от типа ядерного реактора, формы кассеты, задачи исследовательского раздела и т.д.

В данной работе исследование проводилось со следующими исходными данными с типом реактора ВВРД и шестигранным типом кассеты:

Таблица 2 – Начальные значения расчета

|          | Зазор между кассетами, $\Delta m_k$ , [мм] | Отношение высоты а.з. к ее диаметру | Предельно допустимое выгорание, $\Delta q$ , [г/см <sup>3</sup> ] | Скорость ТН на входе в а.з., $W_{вх}$ , [м/с] |
|----------|--|-------------------------------------|---|---|
| Значение | 5,0  | 0,92                                | 0,75  | 2,0   |

Основной задачей физического расчета а.з. является определение массы загружаемых делящихся нуклидов. Особенность данного расчета для водо-водяного реактора под давлением (ВВРД) является то, что он обладает отрицательным коэффициентом реактивности в области рабочих температур и мощностей. Избыточная реактивность ядерного реактора (ЯР) необходима для обеспечения длительной кампании, а также для создания условий выхода из полной йодной ямы. Столь высока реактивность компенсируется с помощью выгорающих поглотителей и компенсирующих решеток. В качестве исходных данных для физического расчета а.з. программа «MARS» использует результаты начального теплового расчета.

### Тепловой расчет а.з.

Количество теплоты, выделяющейся в РУ в течение одного часа, называется тепловой мощностью реактора. Мощность пропорциональна числу делений ядер топлива в а.з. в единицу времени во всем объеме. Плотностью потока нейтронов  $\Phi$  называется пусть, пройденный всеми нейтронами  $n$  в объеме 1 м<sup>3</sup> за 1 с, при скорости нейтрона  $v$  м/с:

$$\Phi = nv \quad (1)$$

Плотность нейтронного потока зависит от формы и размеров активной зоны. Для цилиндрической активной зоны без отражателя радиусом  $R$  и высотой  $H$  плотность нейтронного потока высчитывается, как:

$$\Phi(r) = \Phi_0 J_0 \left( \frac{2.405r}{R} \right) \cos \frac{\pi z}{H}, \text{ м}^2 \text{с}^{-1} \quad (2)$$

где  $r$  и  $z$  – координаты от центра активной зоны по ее радиусу и высоте;  $\Phi_0$  – максимальная плотность нейтронного потока в центре активной зоны, и  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Также формула (2) может быть представлена в виде:

$$\Phi = k_R k_H \Phi_0 \quad (3)$$

где  $k_R = 2.405 J_0(r/R)$ ;  $k_H = \cos(\pi z/H)$  – коэффициенты неравномерности по радиусу и по высоте активной зоны. Также коэффициенты неравномерности находятся, как отношение максимальной плотности нейтронного потока по одной из координат к средней плотности нейтронного потока той же координаты:

$$k_R = \frac{\Phi_0^R}{\Phi_{cp}^R} \quad (4)$$

$$k_H = \frac{\Phi_0^V}{\Phi_{cp}^V} \quad (5)$$

Он показывает во сколько раз максимальная величина плотности потока тепловых нейтронов больше среднего её значения по активной зоне реактора.

Средняя плотность нейтронного потока:

$$\Phi_{cp} = \frac{\int_0^V \Phi(r) dv}{V} \quad (6)$$

Произведение коэффициентов  $k_R$  и  $k_H$  называется объемный коэффициентом неравномерности распределения плотности нейтронного потока по объему активной зоны:

$$k_v = k_R k_H \quad (7)$$

Если распределение плотности потока нейтронов по радиусу активной зоны неравномерно это приведет к тому, что в твэлах центральных ТВС удельное объемное энерговыделение имеет большую величину, чем в твэлах периферийных ТВС. Таким образом, в активной зоне оказывается множество в различной степени *недогруженных* ТВС и твэлов, а недовыработка тепловой мощности оборачивается пропорциональной потерей в выработке энергии.

Диапазоны значений коэффициентов неравномерности плотности нейтронного потока для судовых ЯЭУ давно найдены. Для радиального коэффициента значения варьируется от 1.5 до 2,3, для коэффициента по высоте – 1.3 до 1,7, а для объемного, от 2,0 до 3,06. В работе было рассмотрено влияние разных коэффициентов неравномерности плотности нейтронного потока на габариты активной зона.

Таблица 3 – Варианты параметров неравномерности нейтронного потока

|            | $k_H$ | $k_R$ | $k_V$ |
|------------|-------|-------|-------|
| Вариант №1 | 1.5   | 1.3   | 2.0   |
| Вариант №2 | 1.6   | 1.5   | 2.4   |
| Вариант №3 | 1.7   | 1.8   | 3.0   |

Изменения неравномерности нейтронного потока можно выполнить с помощью профилирования активной зоны и специальной системой управления и защиты (СУЗ).

СУЗ обеспечивает компенсацию медленных изменений реактивности, обусловленных выгоранием, поддержание мощности в заданной области и обеспечение перехода с одного режима мощности на другой и обеспечение затухания цепной реакции деления при аварийной ситуации. Наибольшее применение получило управление реактором с помощью стержней, выполненных из стали с примесями материалов-поглотителей (бор, гафний, кадмий). Регулирование происходит путем введения в активную зону управляющих стержней. Наличие отражателей в активной зоне позволяет отразить часть нейтронов обратно в а.з.

Также существует метод регулирования с помощью постепенно выгорающих добавок поглотителя. Поглотитель равномерно помещается в топливных блоках, в количестве необходимом для компенсации начального запаса реактивности, где добавка, выгорая, компенсирует начальный запас реактивности.

Поглощающие стержни хоть и являются наиболее распространенным, но далеко не единственный тип органов управления. Достаточно широкое применение в качестве органов компенсации нашли компенсирующие решетки, представляющие собой набор перфорированных листов из нержавеющей стали, скрепленных специальными креплениями в единый пакет. Подъем и опускание компенсирующей решетки проводится с помощью, тяги, соединяющей решетку с ее приводом, размещаемым чаще всего на крышке ЯР.

Существует метод физического профилирования активной зоны для дальнейшего уменьшения неравномерности выгорания. Он заключается в неравномерном распределении ядерного топлива, выгорающих поглотителей и замедлителя по радиусу и объему активной зоны.

При занесении начальных параметров в программу «MARS» были указаны следующие значения:

- мощность реактора:  $N_p=175$  МВт;
- температура ТН на входе в а.з.:  $t_{вх}=277^\circ\text{C}$ ;
- температура ТН на выходе из а.з.:  $t_{вых}=313^\circ\text{C}$ ;
- давление первого контура:  $P=15.7$  МПа;
- толщина шестигранного кожуха кассеты (ТВС):  $\delta_k=1,5$  мм;
- толщина оболочки твэл:  $\delta_{об}=0,5$  мм;
- число рядов твэл в кассете:  $Z_p=4$ ;
- теплопроводность материала оболочки твэл (циркалой):  
 $\lambda_{об}=17$  Вт/(м·К);
- теплопроводность материала топлива:  $\lambda_t=14$  Вт/(м·К).

Данные значения не менялись во время проведения всего исследования и являются начальными для выполнения поставленной задачи.

Определим число твэл в кассете:

$$z_{ТВ} = 3z_p^2 + 3z_p + 1 \quad (8)$$

Число рядов твэл в кассете задано как начальное условие  $Z_p=4$ . Отсюда число твэл в кассете будет  $z_{ТВ}=61$ .

Определение значений диаметра твэл осуществляется по формуле:

$$d_{ТВ} = A + \sqrt{A^2 - 4 \cdot (\delta_{об} + \delta_{Не})^2} \quad (9)$$

Где

$$A = 2 \cdot (\delta_{об} + \frac{\bar{q} \cdot V_T}{10^3 N_p}) \quad (10)$$

– коэффициент при вычислении диаметра твэлов, в котором  $\bar{q}$  – значение среднего теплового потока в а.з., Вт/м<sup>2</sup>;

$V_T$  – объем топливной композиции, м<sup>3</sup>;  $N_p$  – мощность реактора.

Объем топливной композиции вычисляется по формуле:

$$V_T = 0.0538 \frac{k_V N_p T}{\Delta q} \quad (11)$$

Так как значения мощности реактора  $N_p$  и предельно допустимое выгорание  $\Delta q$  являются постоянными в расчете, то величина объема топливной композиции будет зависеть только от изменения оставшихся величин, а точнее от кампании активной зоны и объемного коэффициента неравномерности нейтронного потока, которые изменялись в зависимости от вариантов расчета. Значение среднего теплового потока при расчете в программе «MARS» в первом приближении принимают равным  $\bar{q} = 700000$  Вт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, при увеличении коэффициентов неравномерности нейтронного потока и кампании активной зоны, диаметр твэла будет линейно увеличиваться (рисунки 1).

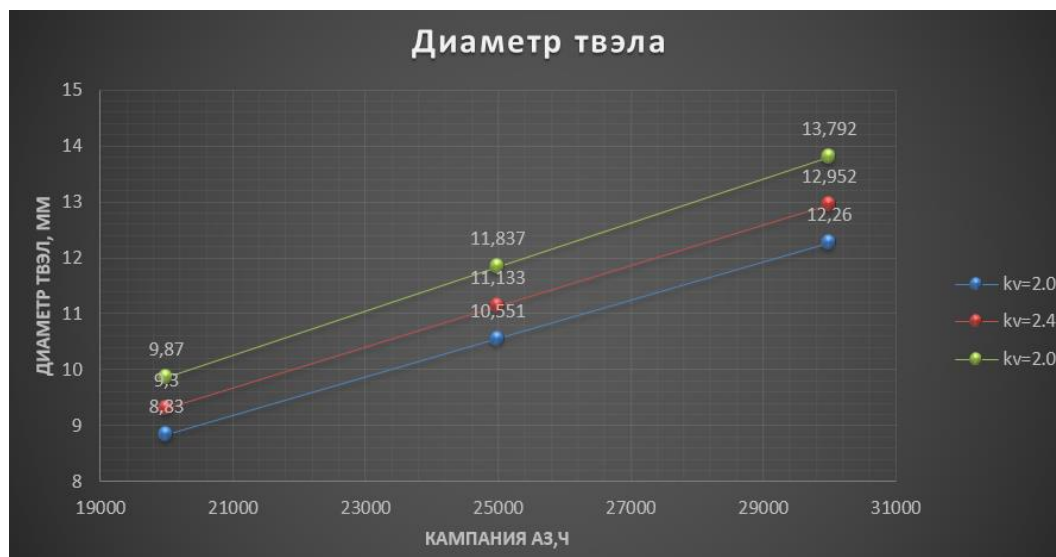


Рис.1 – Зависимость диаметра ТВЭЛ от кампании а.з. для трех значений коэффициентов неравномерности

Так как габариты ТВС напрямую зависят от размеров ТВЭЛ, а расчет ТВС связан с коэффициентами неравномерности нейтронного потока и со значением кампании, их увеличение повлечет рост диаметра кассет. Увеличение диаметра кассет и ТВЭЛ неизбежно приведут к изменению габаритов активной зоны: высоты и диаметра а.з.



Рис. 2 – Зависимость высоты активной зоны от кампании а.з. для трех значений коэффициентов неравномерности

Так как отношение высоты активной зоны к её диаметру является начальным значением, графики зависимости для диаметра а.з. будут аналогичными.

Влияние изменение габаритов а.з. на количество кассет  $n_{\text{к}}$  выглядит иначе. По причине того, что для теплового расчета программе «MARS» требуются начальные данные, некоторые параметры на протяжении всего исследования остаются постоянными. Это постоянство некоторых величин компенсируется изменением других параметров активной зоны.

Количество кассет активной зоны рассчитывается по формуле:

$$n_{\text{к}} = 0,785 D_{\text{АЗ}}^2 / f_{\text{яч}} \quad (12)$$

где  $D_{\text{АЗ}}$  – диаметр активной зоны,

$$f_{\text{яч}} = 0,75 \left( d_{\text{к}} + \frac{\Delta_{\text{мк}}}{\cos 30^\circ} \right) \quad (13)$$

– площадь шестигранной ячейки а.з. Из формулы (15) видим, что площадь кассет является зависимой величиной от диаметра кассет и расстояния между ними. Как было показано выше, диаметр кассет будет увеличиваться с увеличением кампании и неравномерности нейтронного потока, но параметр  $\Delta_{\text{мк}}=5$  мм является начальным параметром и остается неизменным. По этой причине значение площади шестигранной ячейки будет увеличиваться в большей степени, что по формуле (12) приведет к уменьшению числа кассет в а.з.

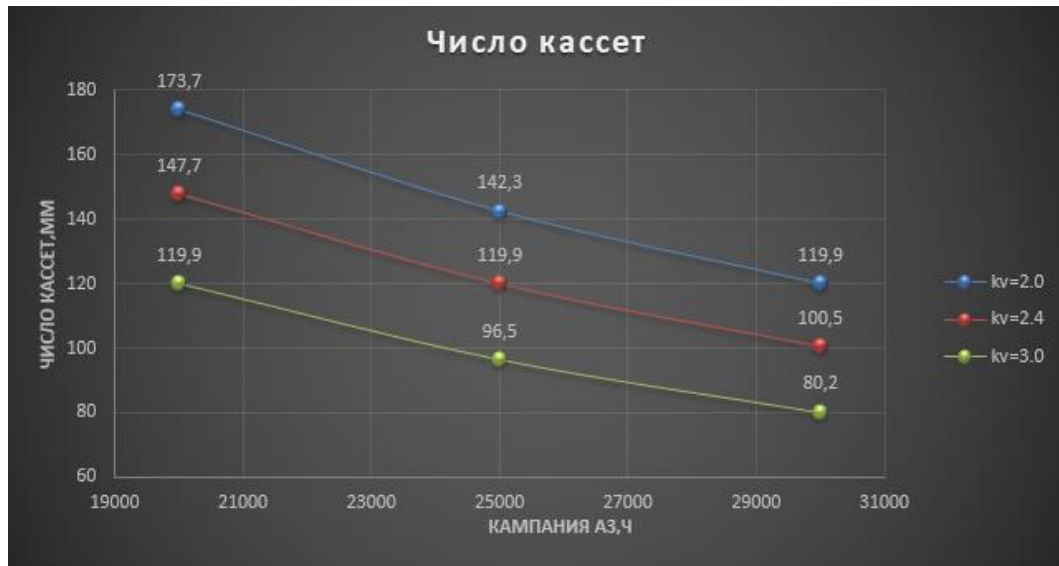


Рис. 3 – Зависимость числа кассет а.з. от кампании а.з. для трех значений коэффициентов неравномерности

Рассмотрим влияние неравномерности нейтронного потока на средний и максимальный тепловой поток. Формула для среднего теплового потока:

$$\bar{q} = \frac{N_p}{S_{аз}} \quad (14)$$

где  $S_{аз}$  – поверхность нагрева активной зоны,  $N_p$  – мощность реактор.  
Площадь поверхности нагрева а.з. находим по формуле:

$$S_{аз} = \pi d_{ТВ} H_{аз} Z_{ТВ} n_{КС} \quad (15)$$

Как было найдено выше, значения величин высота активной зоны, диаметра твэл, число кассет а.з. будет увеличиваться, число твэл в кассете не изменяется. Как следствие - рост площади нагрева активной зоны, что приводит по формуле (14) к уменьшению среднего теплового потока.



Рис. 4 – Зависимость среднего теплового потока от кампании а.з. для трех значений коэффициентов неравномерности

Максимальный тепловой поток напрямую зависит от коэффициентов неравномерности нейтронного потока по высоте и радиусу, которые, по условию нашего исследования, увеличиваются. Хотя и значения среднего теплового потока и уменьшаются, влияние коэффициентов неравномерности значительно больше, что можно увидеть из графика (рисунок 5).

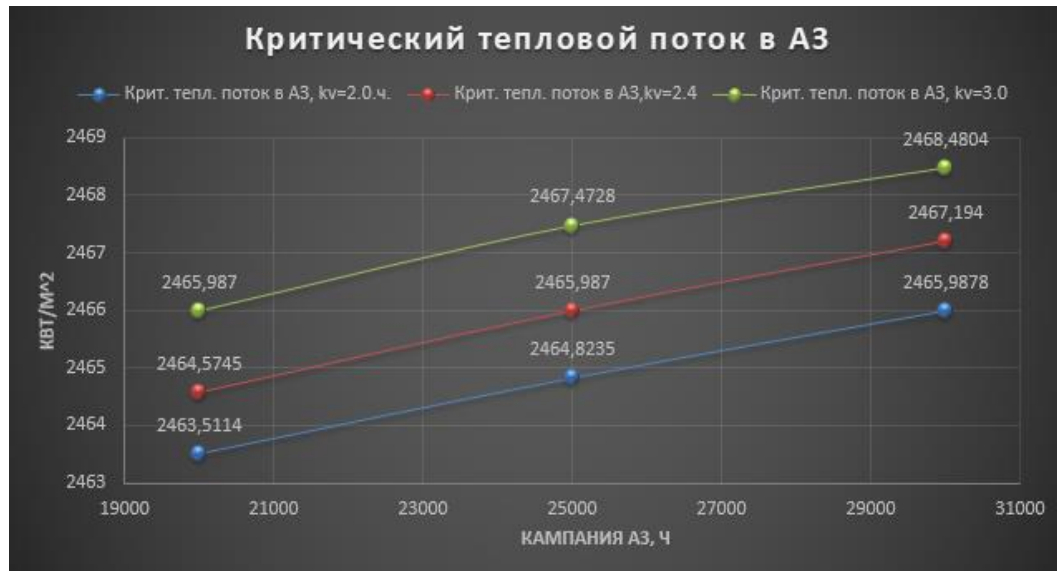


Рис.5 – Зависимость критического теплового потока от кампании а.з. для трех значений коэффициентов неравномерности

Также из-за изменений максимального теплового потока, будет увеличиваться максимальная температура топлива в а.з. и доля топлива в ячейках а.з.

#### Физический расчет а.з.

Рассмотрим влияние неравномерности нейтронного потока на загрузку горючего в активную зону для значений кампании. Будет рассмотрено изменение массы горючего,  $U_{235}$  и массы образовавшегося плутония под конец кампании.

Для начала рассчитаем объем активной зоны ЯР:

$$V_{аз} = \frac{\pi}{4} D_{аз}^2 H_{аз} \quad (16)$$

Неравномерность нейтронного потока, как и кампания а.з., приводит к увеличению параметров диаметра активной зоны и ее высоты, что увеличивает общий объем а.з.

Масса выгоревшего за кампанию  $U_{235}$ :

$$\Delta G_5 = N_p T / 18.6 \quad (17)$$

В данном случае  $18,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч/г}$  – количество энергии, выделяемого при сгорании 1 грамма  $U_{235}$ . Значение выгорания зависит от кампании а.з. Следовательно, данная зависимость при увеличении значения кампании активной зоны приведет к значительному увеличению количества выгорания  $U_{235}$ .

Найдем массу горючего на начало кампании:

$$G_r = V_{аз} \gamma_{топ} \gamma_r \rho_r \quad (18)$$

где  $\gamma_{топ}$  – доля топлива в ячейке,  $\gamma_r$  – горючего в топливной копозиции,  $\rho_r$  – плотность горючего. Из всех перечисленных параметров в расчете значительно изменяется лишь объем активной зоны, что и является основным показателем на увеличение массы горючего.

Из-за того, что масса выгорания  $U_{235}$  сильно зависит от значения кампании, а загрузка горючего всегда должна обеспечивать работу ЯР на 100% по заданной кампании а.з. Как следствие, масса горючего, зависящая от разных значений кампании, будет увеличиваться исходя от массы выгорания  $U_{235}$ .

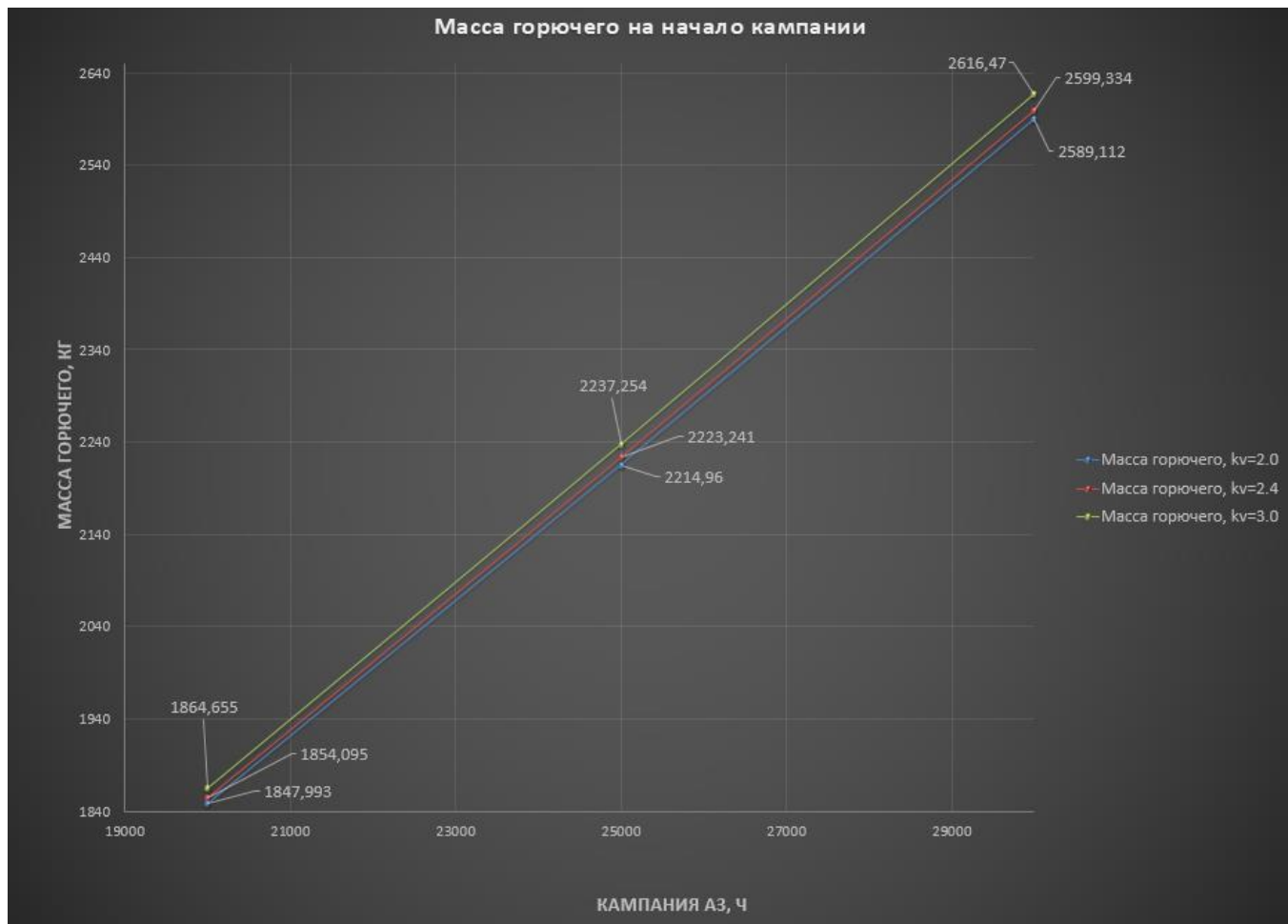


Рис. 6 – Зависимость массы горючего на начало кампании от кампании а.з. для трех значений коэффициентов неравномерности

Как видно из графика, хоть основное влияние массы горючего ЯР зависит от кампании, разные значения коэффициентов неравномерности потока нейтронов также влияют на массу загрузки горючего. Так как масса  $U_{235}$  на начало и конец кампании, масса плутония на конец кампании жестко зависимы от массы горючего, для них зависимости влияния массы от кампании активной зоны и от коэффициента неравномерности потока нейтронов будут аналогичными, как и для горючего.

#### Экономический расчет

Рассмотрим примерные значения стоимости а.з. и ежегодных затрат на обслуживание. Как мы видим, значения наравномерности нейтронного потока и кампании активной существенно меняются цены на строительство активной зоны реактора и на ежегодные расходы. На цену активной зоны ЯР влияют как неравномерность нейтронного потока, так и значение кампании а.з., что в обоих случаях приводит к увеличению стоимость а.з.

Таблица 4 – Влияние компоновки а.з. на её стоимость

|                    | kv=2.0;<br>kr=1,3<br>(20 тыс.ч.) | kv=2.4;<br>kr=1,5<br>(20 тыс.ч.) | kv=3.0;<br>kr=1,8<br>(20 тыс.ч.) | kv=2.0;<br>kr=1,3<br>(25 тыс.ч.) | kv=2.4;<br>kr=1,5<br>(25 тыс.ч.) | kv=3.0;<br>kr=1,8<br>(25 тыс.ч.) | kv=2.0;<br>kr=1,3<br>(30 тыс.ч.) | kv=2.4;<br>kr=1,5<br>(30 тыс.ч.) | kv=3.0;<br>kr=1,8<br>(30 тыс.ч.) |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $M_{аз},$<br>кг    | 4672,39                          | 5485,84                          | 6697,93                          | 5481,58                          | 6454,745558                      | 7910,80                          | 6288,39                          | 7424,81                          | 9131,62                          |
| $C_{изг},$<br>USD  | 272,57                           | 262,65                           | 252,18                           | 241,5                            | 233,64                           | 225,41                           | 221,03                           | 214,63                           | 207,91                           |
| $S_{изг},$<br>USD  | 1273553,4                        | 1440857,45                       | 1689085,44                       | 1323802,26                       | 1508086,75                       | 1783174,35                       | 1389923,56                       | 1593587,91                       | 1898555,16                       |
| $S_{топл},$<br>USD | 11891,19                         | 12163,94                         | 12572,61                         | 14302,81                         | 14595,87                         | 15039,14                         | 16763,06                         | 17075,66                         | 17550,51                         |
| $S_{аз},$<br>USD   | 1285444,59                       | 1453021,39                       | 1701658,05                       | 1338105,07                       | 1522682,62                       | 1798213,49                       | 1406686,62                       | 1610663,57                       | 1916105,67                       |

Немного иначе обстоят дела с ежегодными расходами. Неравномерность нейтронного потока все так же увеличивает расходы на эксплуатацию, но с увеличением кампании а.з. расходы снижаются. Из данных расчетов можно заключить, что самым оптимальным вариантом является компоновка а.з. с коэффициентом неравномерности

нейтронного потока  $k_v=2,0$  и кампаниями  $T=30000$  часов. Хотя начальные расходы на строительство реактора велики, они компенсируются низкими ежегодными затратами на обслуживание, что приведет к окупаемости реактора в целом.

Таблица 5 – Влияние компоновки а.з. на ежегодные затраты

|                               | $k_v=2,0$ ;<br>$k_r=1,3$<br>(20 тыс.ч.) | $k_v=2,4$ ;<br>$k_r=1,5$<br>(20 тыс.ч.) | $k_v=3,0$ ;<br>$k_r=1,8$<br>(20 тыс.ч.) | $k_v=2,0$ ;<br>$k_r=1,3$<br>(25 тыс.ч.) | $k_v=2,4$ ;<br>$k_r=1,5$<br>(25 тыс.ч.) | $k_v=3,0$ ;<br>$k_r=1,8$<br>(25 тыс.ч.) | $k_v=2,0$ ;<br>$k_r=1,3$<br>(30 тыс.ч.) | $k_v=2,4$ ;<br>$k_r=1,5$<br>(30 тыс.ч.) | $k_v=3,0$ ;<br>$k_r=1,8$<br>(30 тыс.ч.) |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $S_{\text{ост.топл.}}$<br>USD | 5365,95                                 | 5621,68                                 | 6006,3                                  | 6279,23                                 | 6551,55                                 | 6966,02                                 | 7269,45                                 | 7557                                    | 7997,68                                 |
| $S_{\text{пер.}}$<br>USD      | 934478,04                               | 1097169,2                               | 1339587,15                              | 1096316,57                              | 1290949,11                              | 1582160,82                              | 1257678,65                              | 1484962,87                              | 1826324,04                              |
| $S_{\text{пз.}}$<br>USD       | 590800                                  | 600200                                  | 614200                                  | 537200                                  | 544000                                  | 554400                                  | 499400                                  | 504400                                  | 512400                                  |
| Z, USD                        | 986536,68                               | 1106377,16                              | 1284545,96                              | 776778,45                               | 878243,93                               | 1029930,56                              | 687566,63                               | 782920,43                               | 926010,63                               |

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Алешин В.С. Судовые ядерные реакторы / Алешин В.С., Кузнецов Н.М., Саркисов А.А. // – Л.: Судостроение, 1968. – 492 с.
2. Ревков М.В. Расчет судовых ядерных энергетических установок. Методические указания. / Ревков М.В., Мазилевский И.И., Петрова А.В. // – СПб: Изд. ЛКИ, 2012 г. – 70 с.
3. Дядик А.Н. Энергетика атомных судов / Дядик А.Н., Сури С.Н. // – СПб: Судостроение, 2014. – 480 с.
4. Манько П.А. Технология изготовления и монтажа судовых ядерных энергетических установок. Учебное пособие. / П.А. Манько, С.А. Семенов, Ю.С. Плахин и др. // – Л.: Изд. ЛКИ, 1989. – 164 с.
5. Манько П.А. Технология изготовления и монтажа судовых ядерных энергетических установок. Часть II. Учебное пособие. / П.А. Манько, С.А. Семенов, Ю.С. Плахин и др. // – СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 1997. – 175 с.
6. Шаманов Н.П. Судовые ядерные паропроизводящие установки: учебник для вузов. / Шаманов Н.П., Пейч Н.Н., Дядик А.Н. // – Л.: Судостроение, 1990. – 368 с.
7. Стенин В.А. Автоматизация судовых ППУ. Учебное пособие / Стенин В.А. // – Северодвинск: Севмашвтуз, 2011. – 117 с.
8. Кузнецов В.А. Судовые ядерные энергетические установки: учебник / Кузнецов В.А. // – Л.: Судостроение, 1980. – 256 с.
9. Головизнин А.М. Судовые ядерные энергетические установки. Учебник для вузов. / А.М. Головизнин А.М., В.А. Кузнецов, Б.Г. Пологих и др. // – М.: Атомиздат, 1976. – 376 с.
10. Вилькман Н.Н. Расчет судовых ядерных реакторов. Методическое указание по использованию ЦВМ в курсовом и дипломном проектировании / Вилькман Н.Н., Дядик А.Н., Ревков М.В. // – Л.: Изд. ЛКИ, 1985. – 57 с.

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

1. Aleshin V.S. Sudovye yadernye reaktory [Marine nuclear reactors] / Aleshin V.S. // L.: Sudostroenie. 1968. – 492 p. [in Russian]
2. Revkov M.V. Raschet sudovyh yadernyh energeticheskikh ustanovok. Metodicheskie ukazaniya. [Calculation of ship nuclear power plants. Methodical instructions.] / Revkov M.V., Mazilevskij I.I., Petrova A.V. // SPb: Izd. LKI, 2012. – 70 p. [in Russian]
3. Dyadik A.N. Energetika atomnyh sudov [Nuclear power engineering] / Dyadik A.N., Surin S.N. // SPb: Sudostroenie, 2014. – 480 p. [in Russian]
4. Man'ko P.A. Tekhnologiya izgotovleniya i montazha sudovyh yadernyh energeticheskikh ustanovok. Uchebnoe posobie. [Manufacturing and installation technology for marine nuclear power plants. Tutorial.] / P.A. Man'ko, S.A. Semenov, YU.S. Plahin and other // L.: Izd. LKI, 1989. – 164 p. [in Russian]
5. Man'ko P.A. Tekhnologiya izgotovleniya i montazha sudovyh yadernyh energeticheskikh ustanovok. CHast' II. Uchebnoe posobie. [Manufacturing and installation technology for marine nuclear power plants. Part II Tutorial.] / P.A. Man'ko, S.A. Semenov, YU.S. Plahin and other // SPb.: Izd. Centr SPbGMTU, 1997. – 175 p. [in Russian]
6. Shamanov N.P. Sudovye yadernye paroproizvodyashchie ustanovki: uchebnik dlya vuzov. [Ship nuclear steam generating plants: a textbook for universities.] / Shamanov N.P., Pejch N.N., Dyadik A.N. // L.: Sudostroenie, 1990. – 368 s. [in Russian]
7. Stenin V.A. Avtomatizaciya sudovyh PPU. Uchebnoe posobie [Automation of ship PPU. Tutorial] / Stenin V.A. // Severodvinsk: Sevmashvtuz, 2011. – 117 p. [in Russian]
8. Kuznecov V.A. Sudovye yadernye energeticheskie ustanovki: uchebnik [Marine Nuclear Power Plants: A Textbook] / Kuznecov V.A. // L.: Sudostroenie, 1980. – 256 p. [in Russian]
9. Goloviznin A.M. Sudovye yadernye energeticheskie ustanovki. Uchebnik dlya vuzov. [Marine nuclear power plants. Textbook for universities.] / A.M. Goloviznin A.M., V.A. Kuznecov, B.G. Pologih and other // M.: Atomizdat, 1976. – 376 p. [in Russian]
10. Vil'kman N.N. Raschet sudovyh yadernyh reaktorov. Metodicheskoe ukazanie po ispol'zovaniyu CVM v kursovom i diplomnom proektirovanii [Calculation of ship nuclear reactors. Guidelines for the use of digital computers in term and diploma design] / Vil'kman N.N., Dyadik A.N., Revkov M.V. // L.: Izd. LKI, 1985. – 57 p. [in Russian]



## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.004>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ  
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЯ

Научная статья

Кузнецов О. Н.<sup>1</sup>, Аверьянов Д.А.<sup>2,\*</sup>, Зуев А.И.<sup>3</sup>, Булатов Р.В.<sup>4</sup>,  
Бурмейстер М.В.<sup>5</sup>, Антаненков А.А.<sup>6</sup><sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-0836-3135;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-1853-3222;<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-8787-7299;<sup>1, 2, 3, 4, 6</sup> НИУ «МЭИ», Москва, Россия;<sup>5</sup> ГИМ ИТС ЦИУС АО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (averianov\_98[at]mail.ru)

## Аннотация

В статье рассмотрено влияние пропускной способности межсистемной связи на динамическую устойчивость энергообъединения, состоящего из двух энергосистем. В рамках работы разработаны и исследованы различные варианты исполнения межсистемной связи, для которых были определены максимально допустимые перетоки активной мощности и проанализированы электромеханические переходные процессы при нормативных возмущениях. Опыты были проведены в трёх различных режимах работы электропередачи.

На основе проведённого исследования сделано заключение о влиянии пропускной способности межсистемных связей, их режимов и состава генерации на динамическую устойчивость энергообъединения в целом.

**Ключевые слова:** динамическая устойчивость, межсистемные связи, переходные процессы в электроэнергетической системе, пропускная способность, энергообъединения.

RESEARCHING THE INFLUENCE OF INTERCONNECTION TRANSMISSION CAPACITY  
ON INTERCONNECTED POWER UTILITIES STABILITY

Research article

Kuznetsov O. N.<sup>1</sup>, Averianov D. A.<sup>2,\*</sup>, Zuev A. I.<sup>3</sup>, Bulatov R. V.<sup>4</sup>,  
Burmeister M. V.<sup>5</sup>, Antanenkov A. A.<sup>6</sup><sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-0836-3135;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-1853-3222;<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-8787-7299;<sup>1, 2, 3, 4, 6</sup> Institute of Electrical Engineering of National Research University MPEI, Moscow, Russia;<sup>5</sup> R&D Center at FGC UES, JSC, Moscow, Russia

\* Corresponding author (averianov\_98[at]mail.ru)

## Abstract

The article looks into the influence of interconnection transmission capacity on the dynamic stability of interconnected power utilities consisting of two energy grids. As part of the work on this paper, various alternatives of carrying out interconnection were developed and studied; for each of them, the maximum allowed active-power flows were defined, and electromechanical transients under reference incidents were analysed. Tests were conducted in three different operating conditions of power transmission.

Driven by this research, a conclusion was made that transmission capacity of interconnections, their operating conditions, and generation make-up affect the dynamic stability of the interconnection in all.

**Keywords:** dynamic stability, interconnection, transient phenomena of electric power system, transmission capacity, interconnected power utilities.

## Введение

Тема динамической устойчивости линий и энергосистем на данный момент является хорошо изученной темой, по которой написано много различных трудов.

Наиболее полно проблематику электромеханических переходных процессов и устойчивости энергообъединений рассматривает В.А. Веников в книге [1]. В данной книге представлена вся теория по изучаемому вопросу, которая тщательно разобрана на примерах, предложенными автором. Опираясь на материалы этой книги, было рассмотрено реальное энергообъединение.

Из наиболее свежих исследований по данному вопросу можно выделить публикации [2], [3], [4].

В статье Вилли Эстрарда [2] было рассмотрено улучшение условий динамической устойчивости энергосистемы за счёт внедрения устройств, позволяющих быстро отключать короткое замыкание (КЗ). В данной работе исследовалось влияние времени отключения КЗ на условия динамической устойчивости энергосистемы и оценивался экономический эффект от снижения времени отключения КЗ. Данное исследование в целом имеет схожие черты с работой Вилли Эстрарда, однако в данной работе упор был сделан на влияние пропускной способности межсистемных связей на условия динамической устойчивости энергообъединения. Стоит также заметить, что в отличие от Вилли Эстрарда, не была затронута экономическая составляющая освещаемого вопроса.

Работа Лю Пенга [3] посвящена исследованию и определению предела передаваемой активной мощности и устойчивости связи переменного тока и постоянного тока без компенсации реактивной мощности. В этой статье утверждается, что в передаче постоянного тока отсутствие компенсации реактивной мощности приводит к увеличению реактивного сопротивления линии, а также увеличение угла выпрямления и угла гасителя инвертора, что уменьшает пропускную способность и стабильность напряжения или даже приводит к лавине напряжения. Принципиальное отличие от проводимого исследования состоит в том, что в этой работе исследуются электропередачи, являющиеся слабыми связями.

Проблема стабильной работы и пропускной способности протяжённых электропередач с большой пропускной способностью освещается в статье Ксюжэнг Чая [4]. В работе рассматриваются компактные линии электропередачи, спроектированные с применением новых технологий для повышения пропускной способности. В данной работе серьёзный упор делается на исследовании пропускной способности электропередач, однако он не рассматривается с точки зрения условий динамической устойчивости.

На основе анализа публикаций по теме исследования был сделан вывод о том, что исследования по данной тематике либо не проводились, либо проводились без учёта всех факторов, влияющих на устойчивость межсистемных связей крупных энергообъединений. Таким образом, исследование влияния пропускной способности межсистемной связи на устойчивость энергообъединения является важной и актуальной задачей.

### **Постановка задачи**

Одной из тенденций развития современной электроэнергетики является объединение энергосистем и создание крупных энергообъединений [5], [6], [7].

Объединение энергосистем осуществляется через межсистемные связи. С ростом отдельных энергосистем создаются новые межсистемные связи, усиливаются уже построенные, а некоторые межсистемные связи, ранее относившиеся к сильным, со временем переходят в разряд слабых [7], [8].

Усложнение электроэнергетических систем и создание межсистемных связей при их объединении приводит к проблемам, связанным с нарушением условий динамической устойчивости, что требует глубокого исследования в данной области. В связи с этим в данной работе исследовано влияние межсистемной связи на изменение условий динамической устойчивости энергообъединения.

Для изучения вопроса в данной работе рассматривалась межсистемная связь на примере объединяющих энергосистемы Черноморского РДУ и Кубанского ПМЭС.

### **Описание использованной расчётной модели**

В рамках исследования была рассмотрена межсистемная связь, объединяющая энергосистему Республики Крым и Кубанского ПМЭС.

Для исследования была выбрана именно эта часть единой энергетической сети России (ЕЭС России), так как энергосистему Крыма и Кубанского ПМЭС связывает крымский энергомог, являющийся единственной межсистемной связью. В рассматриваемую модель входят энергосистемы Крыма, Кубанского ПМЭС и Ростовского ПМЭС.

Данные энергосистемы имеют сложную структуру, а именно разветвлённую сеть линий электропередачи различного класса напряжений. С целью снижения трудоёмкости в рамках данного исследования рассматривались линии 220 кВ и выше, нагрузки на шинах низшего напряжения (НН) ПС 220 и 330 кВ, и только те линии 110 кВ, через которые осуществляется выдача мощности электростанций. Данное допущение не сильно повлияет на результаты расчёта, так как мощность, передаваемая по этим линиям, будет учтена в нагрузке на НН шинах ПС. Помимо этого, из-за отсутствия точных данных по нагрузкам потребителей и перетокам по линиям 110 кВ и ниже в обеих системах в соответствии с [9] было принято, что нагрузка ПС равна 0,6 от общей номинальной мощности автотрансформаторов и трансформаторов установленных на данной ПС. У всех нагрузок ПС коэффициент мощности был принят равным 0,97.

Энергосистема Крыма входит в модель целиком в соответствии с описанными ранее допущениями (см. рисунок 1). Связи энергосистемы Крыма с энергосистемой Украины не учитывались, в связи с чем было принято, что линии, соединяющие энергосистему Республики Крым и Украины разорваны, и переток мощности по ним отсутствует.

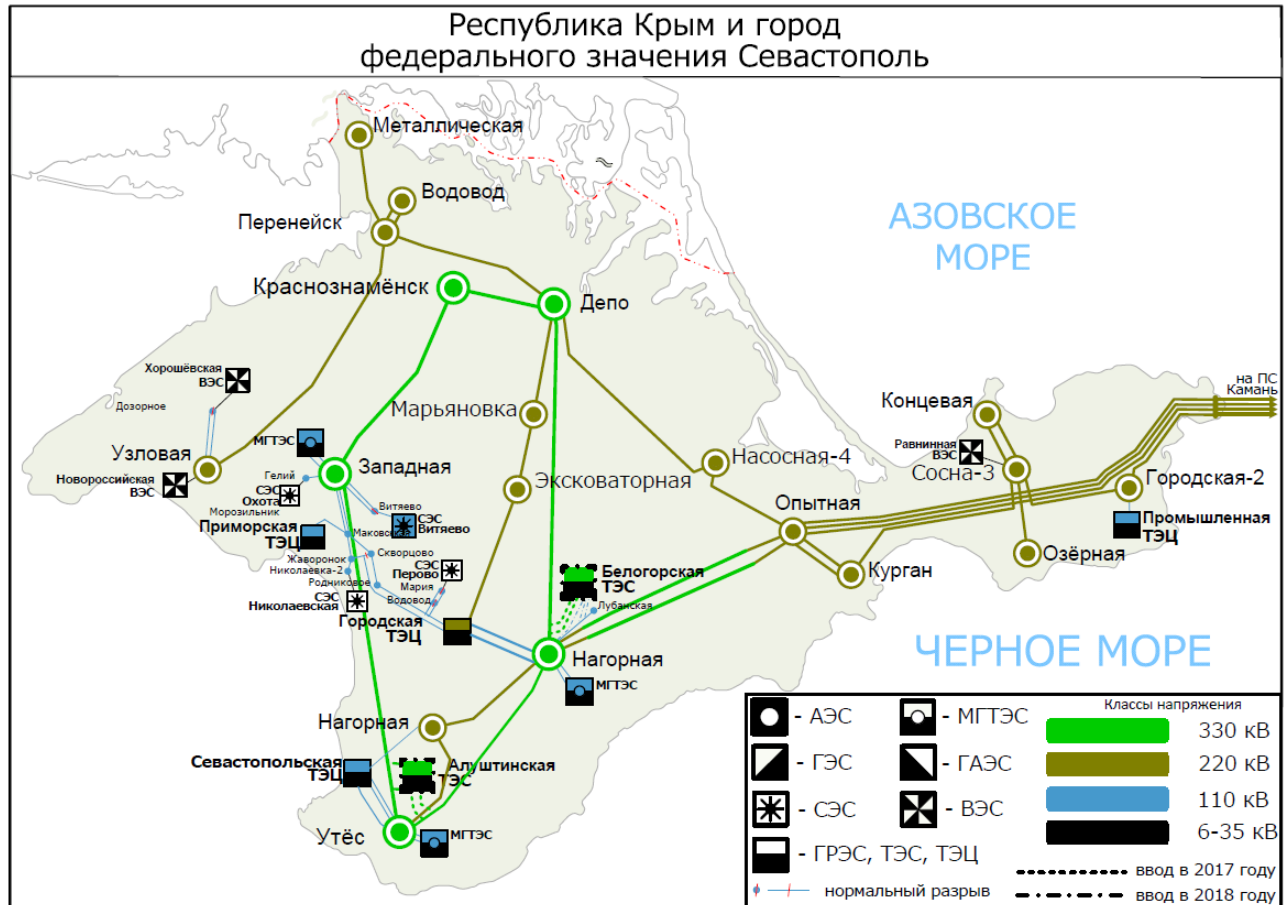


Рис. 1 – Модель энергосистемы Республики Крым

Электрическая сеть, входящая в эксплуатационную зону ответственности Кубанского и Ростовского ПМЭС, была представлена в модели лишь частью сети, прилегающей к кольцу 500 кВ ПС «Тамань» – ПС «Ростовская» – Ростовская АЭС – ПС «Тихорецк» – Ставропольская ГРЭС – ПС «Центральная» (см. рисунок 2). В качестве базового и балансирующего узла была принята Волжская ГЭС. Этот выбор объясняется тем, что в качестве балансирующего узла необходимо было принять крупную электростанцию с манёвренными генераторами, которые в реальности могли бы балансировать активную мощность во всём энергообъединении. Также балансирующий узел должен был быть максимально удалён от точек, в которых рассматривались возмущения. Это условие является важным, так как близкое расположение балансирующего узла к точкам возмущений приводит к некорректным результатам расчёта динамической устойчивости. ПС «Южная», ПС «Фроловская» и ПС «Волга» в модели отсутствуют в связи с тем, что это не сильно влияет на корректность разработанной модели, однако, дополнительно усложняет её и увеличивает время расчёта.

Информация для моделирования отдельных элементов сети (ЛЭП, трансформаторов, генераторов, компенсирующих устройств и т. д.) была взята из [10], [11], [12], а также из карта-схем сетей Черноморского РДУ и ОЭС Юга, находящихся в открытом доступе [10], [12], [13]. Все генераторы были представлены сверхпереходной моделью, параметры которой были рассчитаны для каждого генератора в соответствии с подходом, описанным в [7]. Момент инерции для турбины каждого генератора определялся исходя из его номинальной мощности в соответствии с [14]. В модели не учитывалась настройка параметров возбудителя и системного стабилизатора для генераторов, работающих в большой энергосистеме. Для моделирования автоматического регулирования возбуждения сильного действия (АРВ СД) в программно-вычислительном комплексе (ПВК) ETAP [15] был применён особый вид возбудителя «Fixed», который при различных переходных процессах поддерживает напряжение на выводах генератора неизменным, что позволяет смоделировать эквивалент АРВ СД. Ветряные и солнечные электростанции, располагающиеся в энергосистеме Республики Крым, были представлены соответствующими моделями, заложенными в ПВК ETAP.

Для проведения исследования было создано пять моделей с различными исполнениями межсистемной связи. Одна из них представлена в статье (см. рисунок 3).

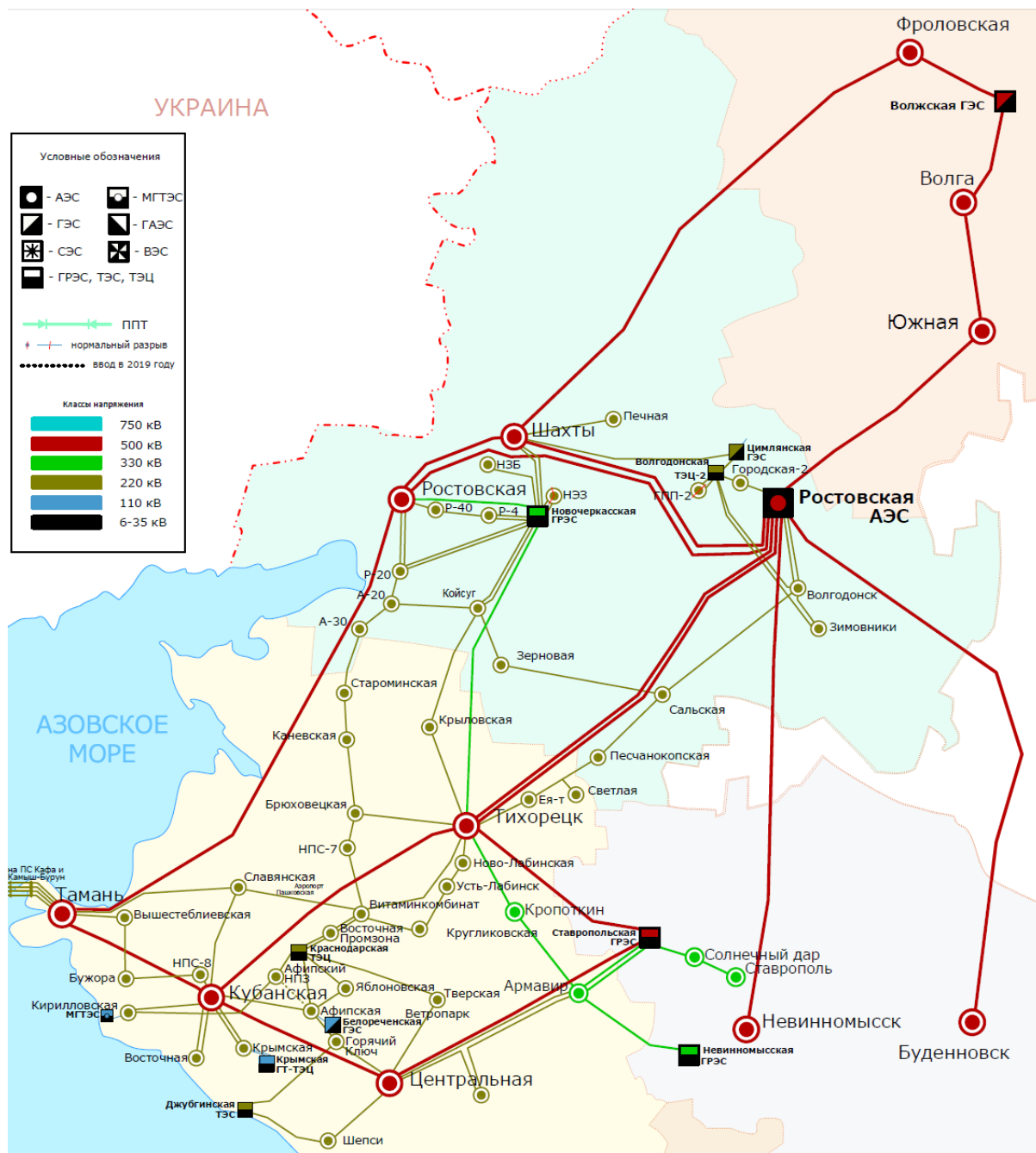


Рис. 2 – Модель энергосистемы Кубанского и Ростовского ПМЭС

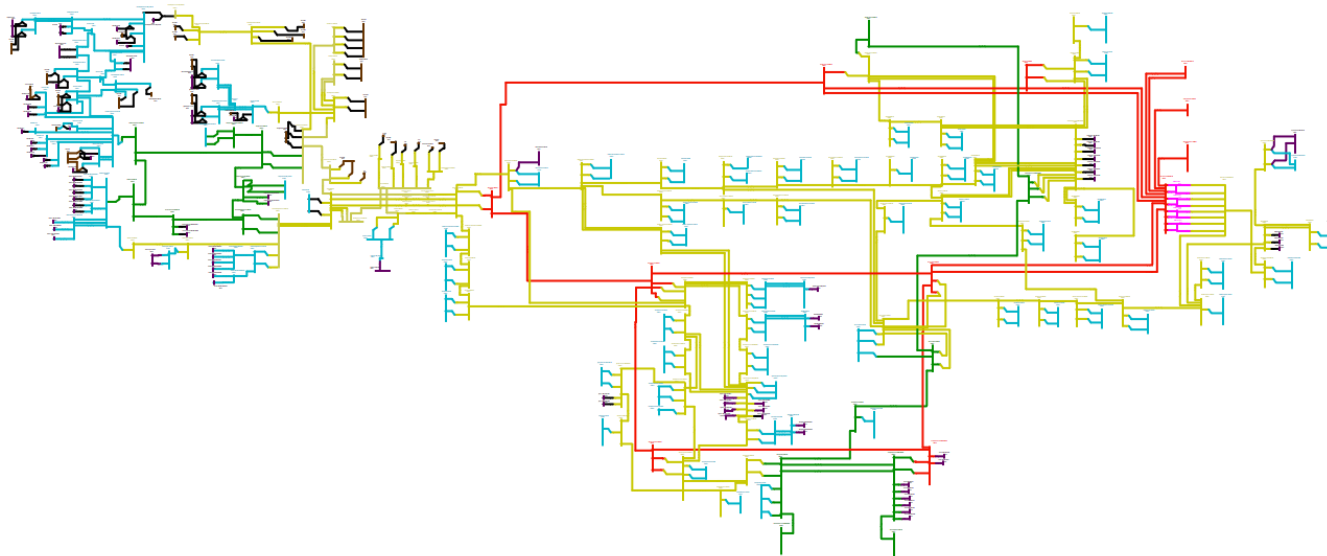


Рис. 3 – Электрическая схема модели используемой для расчётов

### Описание рассматриваемых вариантов межсистемной связи и режимов её работы

Как было отмечено ранее, в рамках исследования было рассмотрено пять вариантов исполнений межсистемной связи.

Первый вариант (см. рисунок 4) является исходным вариантом межсистемной связи, в котором она сейчас существует и функционирует в ЕЭС России. Межсистемная связь включает в себя 4 линии 220 кВ, выполненных с применением проводов повышенной пропускной способности марки АААС-З455-2З, кабельной вставки длиной 14,36 км, выполненной с применением кабелей сечением 1000 мм<sup>2</sup>, которые соединяют ПС «Тамань» и ПС «Опытная». Общая длина крымского энергомоста составляет 199,33 км. Данный вариант имеет наименьшую пропускную способность.

Варианты межсистемной связи с меньшей пропускной способностью в данной работе не рассматривались.

Проблема слабых межсистемных связей заключается в том, что в нормальных и послеаварийных режимах перетоки мощности по ним могут превышать пропускную способность связи. Это приводит к нарушению совместной работы энергосистем и их разделению [8]. По причине отсутствия в модели точной настройки возбудителей и АРВ генераторов и моделей противоаварийной автоматики любое нормативное возмущение при рассмотрении слабых межсистемных связей приводило к появлению либо недемпфирующихся колебаний, либо к потере устойчивости.

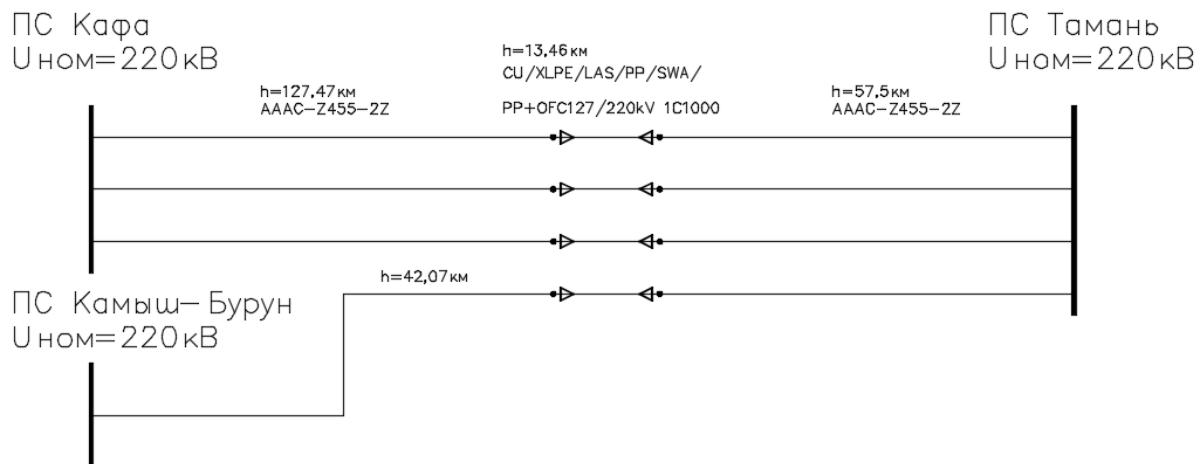


Рис. 4 – Первый вариант исполнения межсистемной связи

Второй рассмотренный вариант представлен компактным исполнением линии 220 кВ (см. рисунок 5). Все четыре линии, образующие межсистемную связь, при этом выполняются одноцепными линиями компактного исполнения, описанными в [16]. Данный вариант исполнения межсистемной связи имеет более высокую пропускную способность. Натуральная мощность одной цепи линии равна 277,9 МВт.

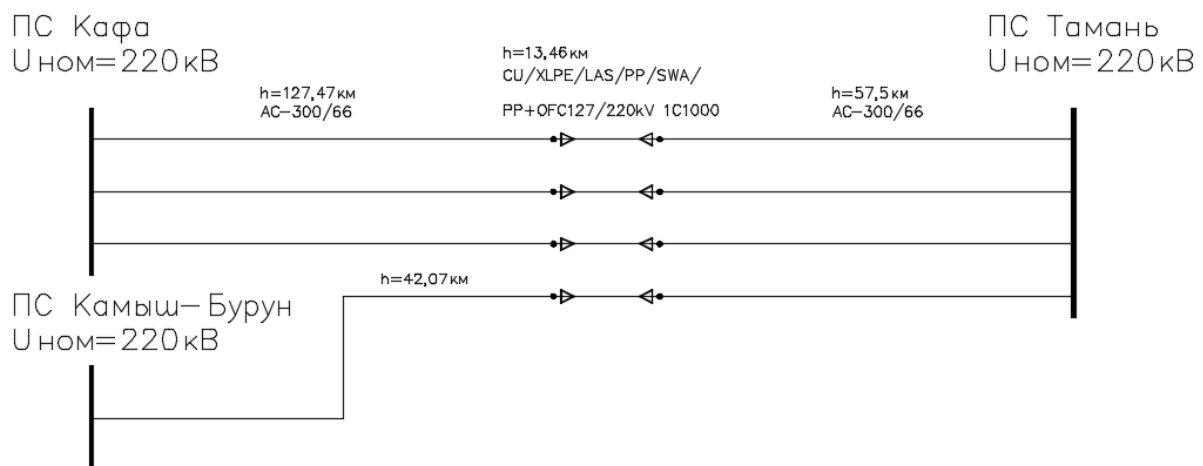


Рис. 5 – Второй вариант исполнения межсистемной связи

Третий вариант предполагает использование трёх цепей линий 330 кВ, соединяющих ПС «Опытная» и ПС «Тамань» (см. рисунок 6). В реальной схеме у обеих подстанций нет шины 330 кВ, поэтому они были добавлены в модель. На ПС «Тамань» шина 330 кВ соединена с шиной 500 кВ через две автотрансформаторные группы, состоящих из однофазных автотрансформаторов АОДЦН-167000/500/330. На ПС «Опытная» были добавлены шины 330 кВ и два автотрансформатора АДЦН-240000/330/220, соединяющие шины 330 и 220 кВ. Линия 220 кВ, идущая от ПС «Опытная» до ПС «Нагорная», выполнена в габаритах 330 кВ. В связи с этим данная линия была переведена на более высокий класс напряжения. Четвёртая цепь межсистемной связи, соединяющая ПС «Тамань» и ПС «Городская-2», выполнена в соответствии со вторым вариантом, так как перевод четвёртой цепи межсистемной связи и всех ПС, через которые она проходит, на более высокий класс напряжения нецелесообразен с точки зрения возможности существования такого варианта исполнения межсистемной связи в реальности.

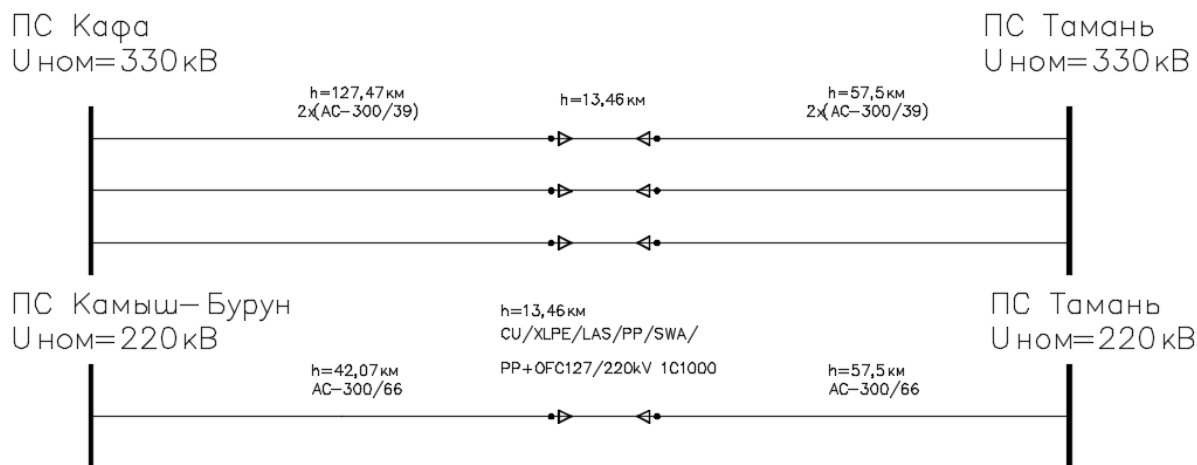


Рис. 6 – Третий вариант исполнения межсистемной связи

Четвёртый вариант схож с предыдущим по исполнению (см. рисунок 7). Четвёртая цепь межсистемной связи выполнена аналогичным образом. Остальные три цепи были представлены линиями 500 кВ. На ПС «Опытная» и ПС «Нагорная» также были добавлены шины 500 кВ и две автотрансформаторные группы, состоявшие из однофазных автотрансформаторов связи АОДЦН-167000/500/220. Помимо этого, были добавлены две цепи линии 500 кВ между этими ПС.

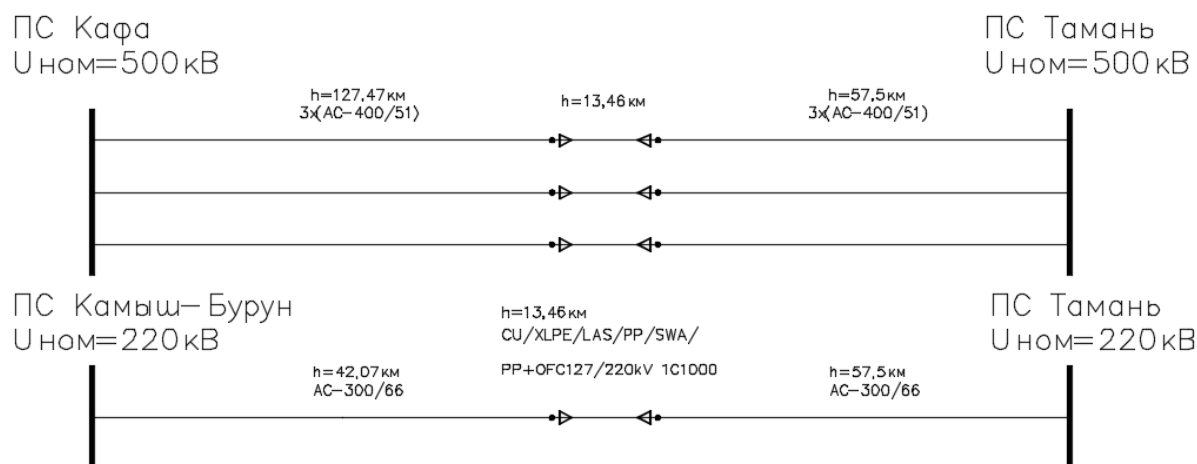


Рис. 7 – Четвёртый вариант исполнения межсистемной связи

Последний из рассматриваемых вариантов предполагает использование передачи постоянного тока (ППТ) (см. рисунок 8). За основу для расчётной модели была взята ранее существовавшая в СССР и России ППТ 800 кВ «Волгоград – Донбасс». Проектная мощность данной линии составляла 720 МВт. Модель ППТ представлена двумя параллельными линиями, аналогичными реальному прототипу. ППТ соединяет шины 500 кВ ПС «Тамань» и 220 кВ ПС «Нагорная».

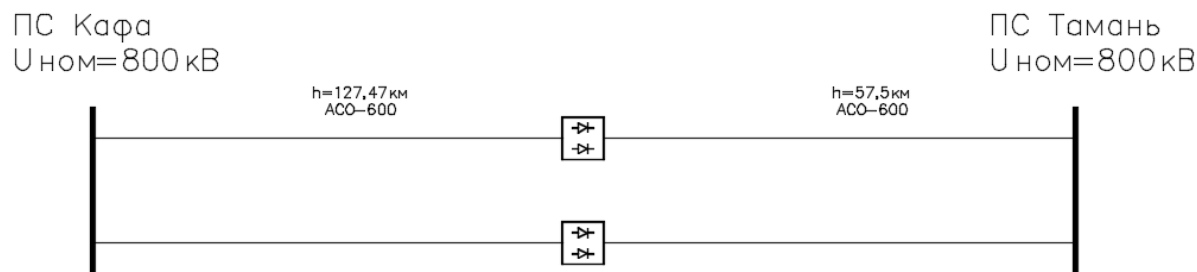


Рис. 8 – Пятый вариант исполнения межсистемной связи

При проведении расчётов рассматривались три режима работы электропередачи:

- Режим холостого хода линий межсистемной связи.
- Режим работы межсистемной связи при загрузке в 50% от максимальной пропускной способности (400 МВт).
- Режим работы межсистемной связи при максимальной загрузке.

Крымский энергопотребитель имеет максимальную пропускную способность равную 850 МВт [17]. Графики перетока по крымскому энергопотребителю (см. рисунок 9) показывают, что в 2016 году суточный переток в осенние месяцы колебался от 400 до 750 МВт [18], [19].

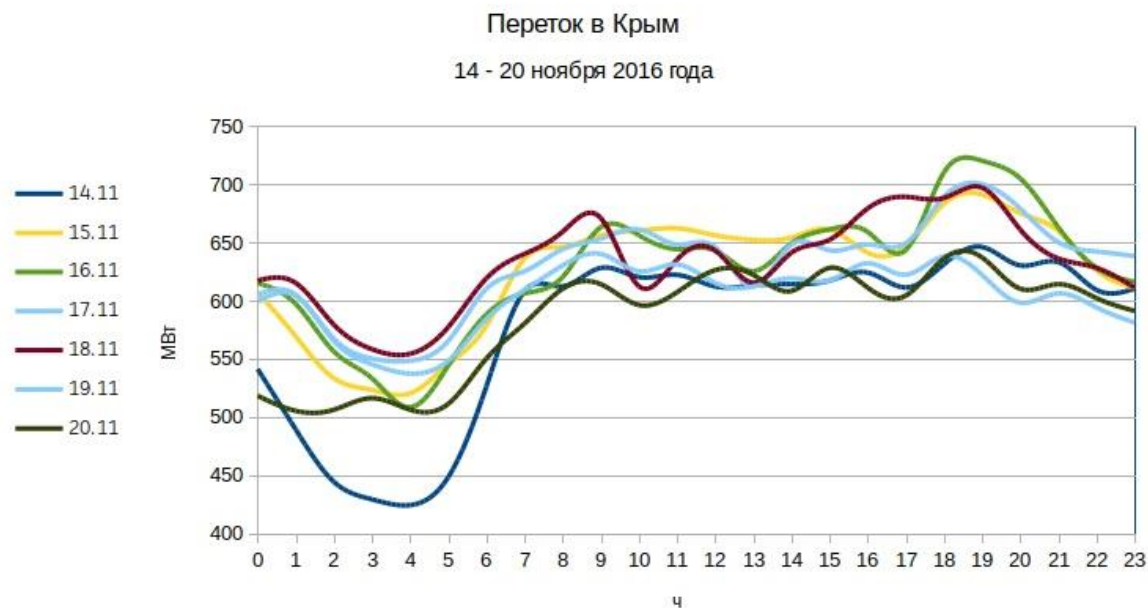


Рис. 9 – Графики осеннего суточного перетока по крымской межсистемной связи

Данные о перетоке по крымскому энергомоту в более поздние года отсутствуют в открытых источниках. Однако с 2016 года в Крыму заметно увеличился объем генерирующих мощностей в основном за счёт ввода в эксплуатацию Балаклавской и Белогорской ТЭС суммарной мощностью по 470 МВт каждая, что позволило разгрузить энергомот Крыма и даже передать избыточные 28 МВт в ОЭС Юга [20]. В связи с этим рассматривался режим работы межсистемной связи с перетоком, равным 400 МВт.

Оставшиеся два режима работы электропередачи взяты как крайние режимы работы энергомота: холостой ход и максимальная нагрузка.

#### Рассмотрение переходных процессов в различных вариантах исполнения межсистемной связи

В данной работе было рассмотрено три режима работы межсистемной связи в пяти вариантах схем, описанных в предыдущем разделе настоящей статьи. Возмущения рассматривались в двух наиболее неустойчивых узлах сети Кубанского и Ростовского ПМЭС, установленных путём нахождения предельного времени отключения короткого замыкания (КЗ) в узлах сети 500 кВ: шины 500 кВ ПС «Тихорецк» и шины 500 кВ ПС «Тамань».

В расчётах влияние пропускной способности межсистемной связи на условия динамической устойчивости энергообъединения оценивалось по предельному времени отключения двухфазного КЗ на землю и максимально допустимого перетока в сечении межсистемной связи. Рассматривалось именно это нормативное возмущение, так как для всех рассмотренных классов напряжения данный вид возмущения является наиболее тяжёлым в соответствии с [21].

Полученные данные по предельному времени отключения двухфазного КЗ на землю для всех вариантов исполнений межсистемной связи представлены в таблице (см. таблицу 1).

Также приведены результаты расчёта максимально допустимого перетока в сечении межсистемной связи для всех вариантов (см. таблицу 2).

Таблица 1 – Зависимость времени выдержки КЗ от режима работы и исполнения межсистемной электропередачи

| Режим  | Вариант исполнения межсистемной связи | Предельное время отключения $K^{(1.1)}$ |                    |
|--|---------------------------------------|---|--------------------|
|  |                                       | ПС 500 кВ «Тихорецк»                    | ПС 500 кВ «Тамань» |
| 1<br>(минимальный переток по межсистемной связи) | 1                                     | 0,195                                   | 0,265              |
|  | 2                                     | 0,205                                   | 0,275              |
|  | 3                                     | 0,245                                   | 0,31               |
|  | 4                                     | 0,250                                   | 0,295              |
|  | 5                                     | 0,25                                    | 0,4                |
| 2<br>(переток по межсистемной связи 400 МВт)     | 1                                     | 0,1925                                  | 0,26               |
|  | 2                                     | 0,26                                    | 0,42               |
|  | 3                                     | 0,28                                    | 0,405              |
|  | 4                                     | 0,275                                   | 0,365              |
|  | 5                                     | 0,26                                    | 0,41               |
| 3<br>(переток по межсистемной связи 850 МВт)     | 1                                     | 0,15                                    | -                  |
|  | 2                                     | 0,195                                   | 0,44               |
|  | 3                                     | 0,255                                   | 0,46               |
|  | 4                                     | 0,315                                   | 0,455              |
|  | 5                                     | -                                       | -                  |

Таблица 2 – Результаты расчёта максимально допустимого перетока

|   | №<br>Варианта | $P_{пр}$ , МВт | Критерии ограничивающие максимальный переток |         |        |        |   |        |
|---|---------------|----------------|--|---------|--------|--------|---|--------|
|   |               |                | а  | б       | в      | г      | д | е      |
| Предельно<br>передаваемая<br>мощность,<br>$P_M$ , МВт | 1             | 1333,4         | 1066,7                                       | 1068,2  | 1246,2 | 1079,5 | + | 903,0  |
|   | 2             | 1635           | 1308,2                                       | 1356,54 | 1310,3 | 1106,3 | + | 1200,3 |
|   | 3             | 2658,1         | 2126,4                                       | 2097,8  | 2606,4 | 2435,5 | + | 1808,1 |
|   | 4             | 3717,2         | 2973,8                                       | 2971,6  | 3213,2 | 3028,3 | + | 2740,5 |
|   | 5             | 2611,2         | 2095,5                                       | 2053,9  | 2555,2 | 2370,6 | + | 1725,2 |

Примечание: Критерии ограничивающие максимальный переток приведены в соответствии с [1]: а – ограничение по мощности в нормальном режиме работы; б – ограничение по мощности в послеаварийном режиме работы; в – ограничение по напряжению в узлах в нормальном режиме работы; г – ограничение по напряжению в узлах в послеаварийном режиме работы; д – ограничение по динамической устойчивости; е – ограничение по нагреву проводов.

В ходе исследования были получены графики мощности и угла роторов генераторов энергообъединения, по которым можно судить о влиянии пропускной способности межсистемной связи на демпфирование и амплитуду колебаний переходного процесса. Приведены графики для одного из генераторов Ростовской АЭС и Белогорской ТЭС при двухфазном КЗ на землю с неуспешным автоматическим повторным включением (АПВ) на шинах 500 кВ ПС «Тамань» (см. рисунок 10-13).

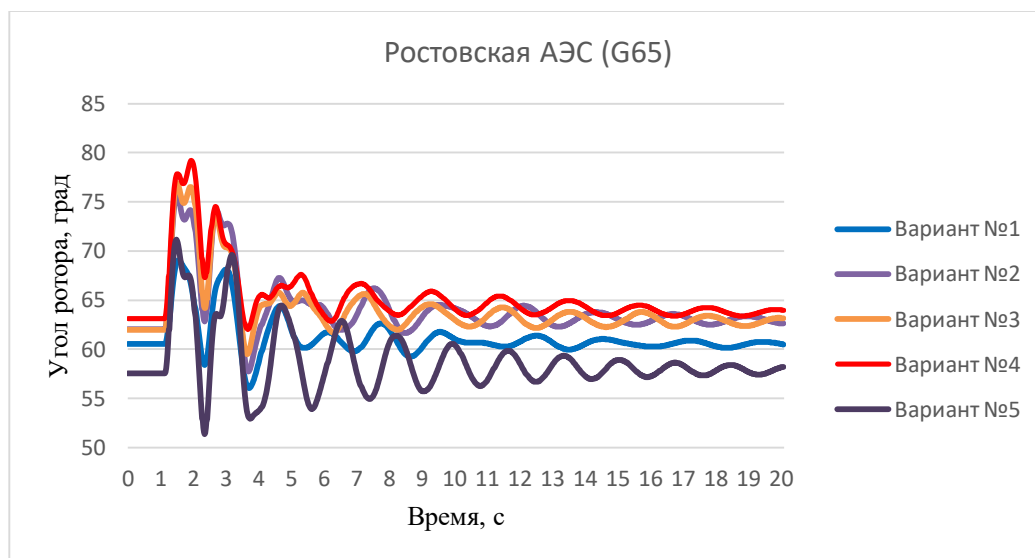


Рис. 10 – Угол ротора генератора 1000 МВт Ростовской АЭС в трёх режимах (возмущение на ПС 500 кВ «Тамань»)

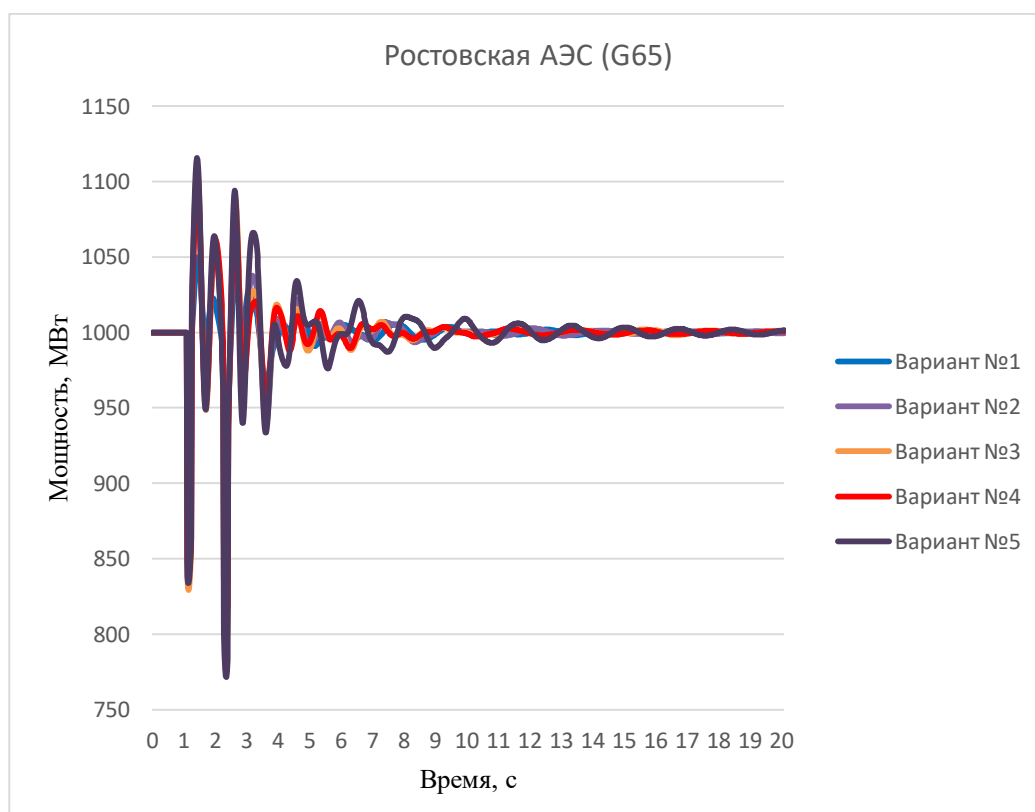


Рис. 11 – Мощность генератора 1000 МВт Ростовской АЭС в трёх режимах (возмущение на ПС 500 кВ «Тамань»)



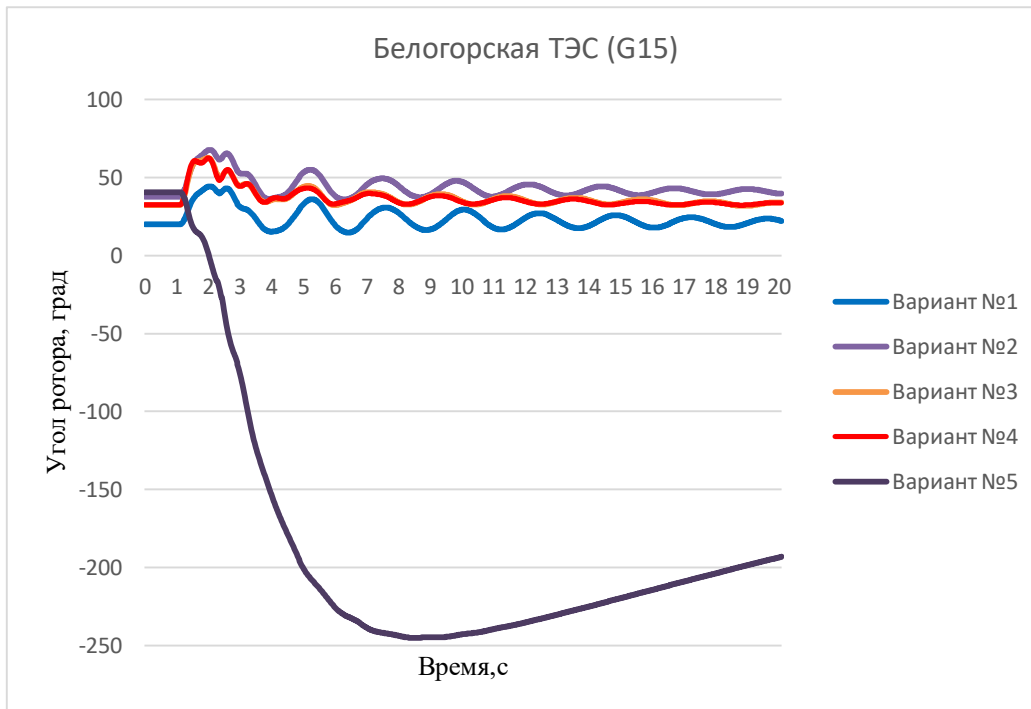


Рис. 12 – Угол ротора генератора 235 МВт Белогорской ТЭС в трёх режимах (возмущение на ПС 500 кВ «Тамань»)

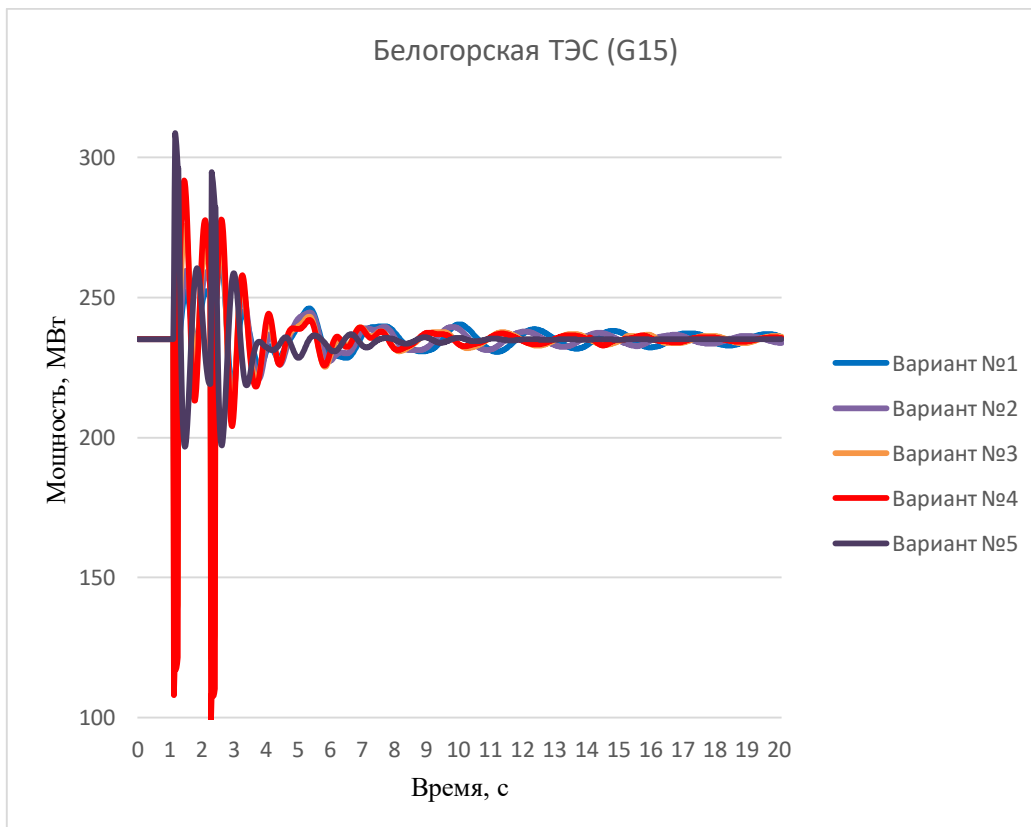


Рис. 13 – Мощность генератора 235 МВт Белогорской ТЭС в трёх режимах (возмущение на ПС 500 кВ «Тамань»)

Двухфазное КЗ на землю с неуспешным АПВ выбрано из всех нормативных возмущений в соответствии с [22], так как является наиболее тяжёлым нормативным возмущением для рассмотренного энергообъединения.

Длительность АПВ обычно находится в диапазоне 1-2 с, в настоящем исследовании это значение принималось равным  $t_{АПВ} = 1$  с. Длительность КЗ принимается 0,12 секунд согласно методическим указаниям [23].

Из рассмотрения графиков можно сделать общий вывод по первым четырём вариантам – более высокая пропускная способность межсистемной электропередачи соответствует более низкой амплитуде колебаний мощности и угла ротора генераторов в системе. Таким образом, усиление системных связей благоприятно влияет на динамическую устойчивость энергообъединения в целом.

В первых трёх рассмотренных вариантах нарушение устойчивости происходит в энергосистеме Крыма в генераторах ближайшей к межсистемной связи Симферопольской МГТЭС. В четвёртом варианте нарушение устойчивости происходит в генераторах Крымской ГТ-ТЭЦ, расположенной в энергосистеме Кубанского ПМЭС. Этим объясняется меньшее предельное время отключения у четвёртого варианта в сравнении с третьим.

Наибольший интерес к рассмотрению представляет пятый вариант с ППТ. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что исполнение межсистемной связей с помощью ППТ положительно влияет на динамическую устойчивость части сети, отделённую ею. Если сравнить колебания мощности на Белогорской ТЭС и Ростовской АЭС, то можно заметить, что график мощности, соответствующий пятому варианту, имеет наименьшую амплитуду колебаний и на тринадцатой секунде колебания практически пропадают. Однако, в тоже время графики мощности и углы роторов генераторов Ростовской АЭС и Ставропольской ГРЭС имеют амплитуды сопоставимые с первым вариантом и наихудшее демпфирование колебаний из всех вариантов. Это связано с тем, что в случае применения ППТ мощности обеих энергосистем перестают быть связанными, в отличие от вариантов с электропередачами переменного тока.

### Заключение

В данном исследовании было проведено исследование влияния пропускной способности межсистемной связи на примере межсистемной связи, соединяющей крымскую энергосистему с ОЭС Юга. В ходе работы были получены следующие выводы:

1. Усиление межсистемных связей положительно влияет на динамическую устойчивость энергообъединения.
2. Объёмы передаваемой мощности по межсистемной связи сильно влияют на протекание переходных процессов в энергообъединении.
3. Увеличение передаваемой мощности приводит к снижению предельного времени отключения КЗ и ухудшению демпфирования возникающих колебаний вплоть до его полного отсутствия.
4. Применение ППТ для исполнения межсистемной связи улучшает протекание переходного процесса в неповреждённой части сети, подключённой к одному концу ППТ, и одновременно с этим ухудшает его протекание в той части сети, подключённой к другой стороны ППТ, где произошло возмущение.

### Благодарности

Благодарим всех представителей ООО «ETAP СИСТЕМС» (*ETAP SYSTEMS Russia*) за проведённые консультации, занятия, видеоуроки и предоставленные учебные материалы на русском языке.

### Acknowledgement

We thank all representatives of ETAP SYSTEMS LLC (*ETAP SYSTEMS Russia*) for the consultations, classes, video tutorials and provided training materials in Russian.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared

### Список литературы / References

1. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников: Учеб. Для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Шк., 1985. – 536 с., ил.
2. Willy Estrada Vargas Economic Benefit and Improve of Stability in the Power System through the Ultra-High Speed Fault Clearing in Transmission Lines / Willy Estrada Vargas, Juan C. Quispe H. // 2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) 10 Aug. 2018
3. Liu Peng Study on the transmission capacity and voltage stability of weak back-to-back HVDC system // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. 10 January 2005
4. Xuzheng Chai Flexible compact AC transmission system - a new mode for large-capacity and long-distance power transmission / Xuzheng Chai, Xidong Liang, Rong Zeng // Published in: 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting 16 October 2006
5. Режимы энергосистем: методы анализа и управления / В.А. Баринов, С. А. Совалов – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.
6. Вопросы по устойчивости электрических систем / П. С. Жданов Под ред. Л. А. Жукова. – Стереотипное издание. Перепечатка с издания 1979 г. – М.: Альянс, 2015. – 456 с.
7. Баринов В.А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления / В.А. Баринов, С. А. Совалов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.- 440 с.
8. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов / Ю. П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.: ил.
9. Министерство энергетики российской федерации приказ от 8 февраля 2019 года №81 «Об утверждении требований к перегрузочной способности автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и её поддержанию и о внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации», утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. №229.
10. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича.-М.: НЦ ЭНАС, 2005 – 320 с. ил.
11. Схема и программа развития электроэнергетики Республики Крым на 2019-2023 (заключительный) от 11.12.2018.
12. Распоряжение губернатора Ростовской области от 30.04.2020 №91 г. Ростов-на-Дону Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Ростовской области на 2020-2024 годы.
13. XIII Международная научно-практическая конференция «Возобновляемая и малая энергетика 2016» [Электронный ресурс] : URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/xiii-mezhdunarodnaya-nauchnoprakticheskaya-konferenciya-vozobnovlyayemaya-i-malaya-energetika-2016>. (дата обращения 12.06.2020)

14. Зубкова И. С. Исследование влияния различных систем возбуждения синхронного генератора на демпфирование электромеханических переходных процессов в электроэнергетической системе : выпускная квалификационная работа на соискание учёной степени магистра технических наук, Москва 2018.
15. ETAP 19.0 User Guide, Operation Technology, Inc., registered to ISO 9001:2015, certification No. 10002889 QM 15, February 2019.
16. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередачи нового поколения на примере ВЛ-220 кВ / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслов, Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 13.02.2010.
17. Режимно-балансовая ситуация в ЕЭС России в осенне-зимний период 2017/18 года. [Электронный ресурс] : URL: [minenergo.gov.ru](http://minenergo.gov.ru). (дата обращения 12.06.2020)
18. Из-за дефицита мощности в 85 МВт в Крыму сохраняется режим отключений [Электронный ресурс] : URL: <https://crimea.ria.ru/society/20160225/1103433272.html> (дата обращения 12.06.2020)
19. Крым живет на 931 МВт энергии — МЧС [Электронный ресурс] : URL: <https://crimea.ria.ru/society/20160211/1103184256.html> (дата обращения 12.06.2020)
20. Мощность увеличилась [Электронный ресурс] : URL: <https://rg.ru/2018/10/16/reg-ufu/budet-li-krym-delitsia-elektroenergiej-s-materikovoju-chastju-rf.html> (дата обращения 12.06.2020)
21. Методические указания по устойчивости параллельно работающих энергосистем стран СНГ, Балтии и Грузии от 02.11.2018 №53. 21
22. Методические указания по устойчивости энергосистем от 30.06.2003 №277. 22
23. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 июня 2003 г. N 277 «Об утверждении методических указаний по устойчивости энергосистем».

#### Список литературы / References in English

1. Venikov V. A. Perekhodnye elektromekhanicheskie processy v elektricheskikh si-stemah [Transient electromechanical processes in electrical systems]. Ucheb. Dlya elektroenerget. spec. vuzov [Textbook for electric power specialties]. – 4th edition., revised and supplemented – M.: Vyssh. SHk., 1985. – p. 536 [in Russian]
2. Willy Estrada Vargas Economic Benefit and Improve of Stability in the Power System through the Ultra-High Speed Fault Clearing in Transmission Lines / Willy Estrada Vargas, Juan C. Quispe H. // 2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) 10 Aug. 2018
3. Liu Peng Study on the transmission capacity and voltage stability of weak back-to-back HVDC system // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. 10 January 2005
4. Xuzheng Chai Flexible compact AC transmission system - a new mode for large-capacity and long-distance power transmission / Xuzheng Chai, Xidong Liang, Rong Zeng // Published in: 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting 16 October 2006
5. Barinov V.A. Rezhimy energosistem: metody analiza i upravleniya [Power system modes: analysis and control methods] / V.A. Barinov, S. A. Sovalov. – M.: Ergoatomizdat, 1990. – p. 440 [in Russian]
6. Zhdanov P. S. Voprosy po ustojchivosti elektricheskikh system [Questions on the power system stability]. – Stereotyped edition. Reprint from the 1979 edition. – M.: Al'yans, 2015. – p. 456. [in Russian]
7. Barinov V.A. Rezhimy energosistem: Metody analiza i upravleniya [Power systems modes: Methods of analysis and control] / V.A. Barinov, S. A. Sovalov. – M.: Enrgoatomizdat, 1990. - p. 440. [in Russian]
8. Ryzhov Yu. P. Dal'nie elektropredachi sverhvyssokogo napryazheniya: uchebnik dlya vuzov [Long-distance power transmission of extra-high voltage: a textbook for universities].– M.: Izdatel'skij dom MEI, 2007.– p.488 [in Russian]
9. Ministry of energy of the russian federation order dated February 8, 2019 No. 81 On approval of requirements for the overload capacity of autotransformers installed at electric power facilities, and its maintenance and on amendments to the Rules for the technical operation of power plants and networks of the Russian Federation approved by order of the Ministry of Energy of Russia dated June 19, 2003 No. 229. [in Russian]
10. Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej. [Reference design of power networks] / Ed. by D. L. Faybisovich.- M.: Publishing House NTS ENAS, 2005 – p. 320. [in Russian]
11. Scheme and program for the development of the electric power industry of the Republic of Crimea for 2019-2023 (final) dated 12/11/2018. [in Russian]
12. Order of the Rostov Region Governor dated 30.04.2020 No. 91 of Rostov-on-Don On approval of the scheme and program for the development of electric power industry in the Rostov Region for 2020-2024. [in Russian]
13. XIII Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferenciya «Vozobnovljaemaja i malaja jenergetika 2016» [XIII international scientific and practical conference "Renewable and small energy 2016] [Electronic resource] : URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/xiii-mezhdunarodnaya-nauchnoprakticheskaya-konferenciya-vozobnovlyaemaya-i-malaya-energetika-2016>. (accessed 12.06.2020) [in Russian]
14. Zubkova I. S. Issledovanie vliyaniya razlichnyh sistem vozbuzhdeniya sinhronnogo generatora na dempfirovanie elektromekhanicheskikh perekhodnyh pcessov v elektroenergeticheskoi sisteme [Study of the various excitation systems of a synchronous generator influence on the damping of electromechanical transients in the electric power system]. Final qualification work for the degree of Master of Engineering, Moscow 2018. [in Russian]
15. ETAP 19.0 User Guide, Operation Technology, Inc., registered to ISO 9001:2015, certification No. 10002889 QM 15, February 2019.
16. V.M. Postolatij, E.V. Bykova, V.M. Suslov, YU.G. SHakaryan, L.V. Timashova, S.N. Kareva V.M. Postolatij, E.V. Bykova, V.M. Suslov, YU.G. SHakaryan, L.V. Timashova, S.N. Kareva. Metodicheskie podhody k vyboru variantov linij elektropredachi novogo pokoleniya na primere VL-220 kV. [Methodological approaches to the options selection for new generation power lines using the example of 220 kV overhead lines.] / PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 13.02.2010. [in Russian]

17. Rezhimno-balansovaja situacija v EJeS Rossii v osenne-zimnij period 2017/18 goda [Regime-balance situation in the UES of Russia in the autumn-winter period of 2017/18]. [Electronic resource] : URL: minenergo.gov.ru. (accessed 12.06.2020) [in Russian]

18. Iz-za deficita moshhnosti v 85 MVt v Krymu sohranjaetsja rezhim otkljuchenij [Due to the power deficit of 85 MW in the Crimea, the shutdown mode is maintained] [Electronic resource] : URL: <https://crimea.ria.ru/society/20160225/1103433272.html> (accessed 12.06.2020). [in Russian]

19. Krym zhivet na 931 MVt jenergii [Crimea lives on 931 MW of energy-EMERCOM] [Electronic resource] : URL: <https://crimea.ria.ru/society/20160211/1103184256.html> (accessed 12.06.2020). [in Russian]

20. Moshhnost' uvelichilas [Power increased] [Electronic resource] : URL: <https://rg.ru/2018/10/16/reg-ufo/budet-li-krym-delitsia-elektroenergij-s-materikovo-chastiu-rf.html> (accessed 12.06.2020). [in Russian]

21. Metodicheskie ukazanija po ustojchivosti parallel'no rabotajushhih jenergosistem stran SNG, Baltii i Gruzii ot 02.11.2018 [Methodological guidelines for the stability of parallel power systems operating of the CIS countries, the Baltic States and Georgia dated 02.11.2018] No. 53. 21 [in Russian]

22. Metodicheskie ukazanija po ustojchivosti jenergosistem ot 30.06.2003 [Guidelines for the power systems stability from 30.06.2003] No. 277. [in Russian]

23. Prikaz Ministerstva jenergetiki RF ot 30 ijunia 2003 g. N 277 «Ob utverzhenii metodicheskikh ukazanij po ustojchivosti jenergosistem» [Ministry of Energy of Russian Federation order of June 30, 2003 N 277 “On approval of guidelines for the power systems stability”] [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.005>**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Научная статья

**Айюб Ф.<sup>1,\*</sup>, Гаряев Н.А.<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> НИУ МГСУ, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (fadi2ayoub[at]gmail.com)

**Аннотация**

Оценка технического состояния строительных элементов является основным этапом в процессе принятия проектных решений по восстановлению железобетонных конструкций. В целях автоматизации процесса принятия проектных решений была разработана математическая модель здания на основании теории множеств, были определены параметры дефектов для каждого конструктивного элемента и их соответствующие предельно-допустимые значения, проведен анализ технического состояния каждого конструктивного элемента, что позволяло определить категорию технического состояния (КТС) для разных элементов здания.

**Ключевые слова:** Оценка, техническое состояние, математическая модель.

**THE DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATING THE TECHNICAL CONDITION  
OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

Research article

**Ayub F.<sup>1,\*</sup>, Garyaev N. A.<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> NRU Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

\* Corresponding author (fadi2ayoub[at]gmail.com)

**Abstract**

The estimation of the technical condition of a building unit is the main stage in the process of making design choices for the restoration of reinforced concrete structures. In order to make the process of making design choices automatic, a mathematical model of the building based on set theory was created, and the parameters of defects for each structural unit and their corresponding maximum admissible limit values were determined. Moreover, the technical condition of each structural unit was analyzed, which allowed to define the state of maintenance for different building units.

**Keywords:** estimation, state of maintenance, mathematical model.

**Введение**

Основной целью разработки математической модели для оценки технического состояния железобетонных конструкций является необходимость создания подходов к автоматизации процесса обследования, оценки возможности и целесообразности восстановления зданий и сооружений городов Сирии, поврежденных в результате военных конфликтов.

Восстановление несущей способности железобетонных конструкций здания часто вызывает гораздо большие финансовые затраты, чем это может потребоваться для нового строительства. Поэтому при оценке состояния здания необходимо получить точную оценку состояния строительных конструкций, имеющих у них повреждений их причину, а также собрать данные для перерасчета их несущей способности и проектирования реконструкции. Также важно учесть затраты на строительные материалы при проведении восстановительных работ и затраты на оплату специалистов соответствующей квалификации при проведении этих работ. С целью сокращения сроков по приведению здания к условиям нормальной эксплуатации работы по обследованию технического состояния, техническому обслуживанию и ремонту железобетонных конструкций могут выполняться параллельно.

Проблемы целостности и долговечности обычно затрагивают любой тип железобетонных конструкций. Необходимо учитывать такие важные факторы, как возраст сооружения, его местоположение, назначение и условия использования, особо важно обследовать все несущие железобетонные конструкции, которые могут нуждаться в ремонте или замене. К сооружениям, построенным из железобетона, относятся: общественные, промышленные и жилые здания, мосты, каналы; подпорные стены и переборки, плотины и барьеры, автостоянки, гидравлические и морские сооружения и другие.

Все конструктивные элементы обследуются в определенной последовательности с последующим восстановительным ремонтом, в зависимости от типа конструкции и уровня обнаруженного повреждения. Сложность решаемой задачи связана с тем, что многообразие проектных решений зданий и сооружений, построенных из железобетона, в свою очередь приводит к большому многообразию геометрических форм конструктивных несущих элементов, которые при проведении обследования необходимо разделить на перекрытия и покрытия (балки и плиты и), стены, колонны, фундаменты.

**Методы и принципы исследования**

Основной задачей обследования конструкций является выявление мест повреждения и разрушения конструкций, с целью их последующего восстановления, усиления или замены.

Все повреждения конструкций в здании или сооружении необходимо классифицировать в зависимости от степени разрушения каждой из них учитывая причины его возникновения. Основными причинами повреждения железобетонных конструкций являются силовые факторы такие, как нагрузки превышающие расчетные значения, воздействия окружающей среды, высокие температуры, нарушение правил эксплуатации и др.

Характерными повреждениями железобетонных строительных конструкций от силовых воздействий являются:

- нормальные и вертикальные трещины,
- чрезмерные прогибы,
- выпучивание сжатой арматуры,
- выкрашивание бетона, в сжатой зоне и др.

Основными структурными разрушениями, вызванными влиянием окружающей среды, являются:

- коррозия арматуры или коррозия бетона,
- разрушение бетона в результате воздействия переменного замораживания и оттаивания.

В случае высоких температур возникают следующие дефекты:

- изменение цвета бетона,
- образование трещин на поверхности бетона, сопровождающееся разрушением защитного слоя,
- образование вертикальные и наклонные трещины в зоне растяжения бетона,
- деформация элементов конструкции выше нормативных значений и т. д.

Оценка технического состояния конструкций является основным этапом, позволяющим принимать проектные решения по восстановлению поврежденных конструкций. Математическая модель оценки технического состояния здания основана на методологии, в которой в зависимости от одной из пяти КТС здания определяют величину его повреждения.

Категории технического состояния конструкций:

Нормальное состояние - Категория 1

Удовлетворительное состояние - Категория 2

Неудовлетворительное состояние - Категория 3

Предаварийное состояние - Категория 4

Аварийное состояние - Категория 5

Определение соответствующих мероприятий для восстановления эксплуатационной пригодности конструкций зависит от категории ее технического состояния.

Пусть задано множество Здание

$$H = \{B, C, S, \dots\}$$

Состоит из множеств конструктивных элементов

Пусть множество Балок

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} : \text{где } n \text{ количество балок в здании}$$

Каждой балке (аналогично для плит) в соответствии с различными категориями её технического состояния присваиваются параметры, описывающие ее дефекты

Ширина раскрытия нормальных трещин  $NT$  мм. (см. рисунок 1 - а)

$$\forall b \in B; NT(b)$$

Ширина раскрытия наклонных трещин  $NA$  мм. (см. рисунок 1 - б)

$$\forall b \in B; NA(b)$$

Прогиб балок  $PB$  (см. рисунок 1 - в)

$$\forall b \in B; PB(b)$$

Снижение прочности бетона  $SP$  % (см. рисунок 1 - г)

$$\forall b \in B; SP(b)$$

Уменьшение поперечного сечения арматуры в результате коррозии  $UA$  % (см. рисунок 1 - г)

$$\forall b \in B; UA(b)$$

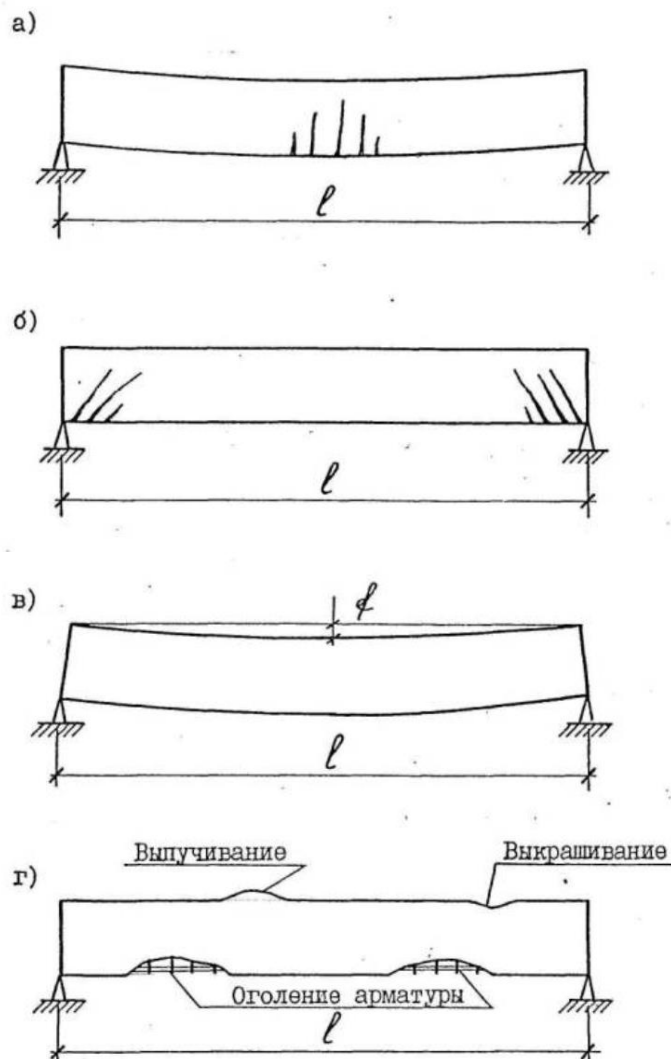


Рис. 1 – Дефекты железобетонных балок (плит)

В зависимости от параметров дефектов определяется КТС железобетонных балок (плит).

Для ширины раскрытия нормальных трещин NTU

$$NTU(b) = \{0.1, 0.3, 0.5, 1, >1\}$$

Для ширины раскрытия наклонных трещин NAU

$$NAU(b) = \{0, 0.2, 0.3, 0.4, >0.4\}$$

Для прогиба балок PBU

$$PBU(b) = \{0, 1/150, 1/100, 1/75, >1/50\}$$

Для снижения прочности бетона SPU

$$SPU(b) = \{0, 0, 20\%, 30\%, >30\%\}$$

Для уменьшения поперечного сечения арматуры в результате коррозии UAU

$$UAU(b) = \{0, 5\%, 10\%, 20\%, >20\%\}$$

Определение КТС для каждой балки (плиты) производится путем сравнения значения её параметров дефектов с соответствующими предельно-допустимыми значениями при различных КТС.

Наихудший показатель дефектов, из всех имеющихся в балке (плите), определяет КТС рассматриваемой балки (плиты).

По самым опасным дефектам определяется КТС конструкции.

Категория технического состояния балки  $K(b)$

$$K(b) \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$\forall b \in B; NT(b) = ntu_i \& NA(b) = nau_j \& PB(b) = pbu_k \& SP(b) = spr_l \& UA(b) = uau_m \\ \Rightarrow K(b) = \max(i, j, k, l, m)$$

Где  $i, j, k, l, m \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

Таким образом, множество балок, имеющих категории технического состояния N

$$BKN = \{b \in B; K(b) = N\}, N \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

Пусть множество колонн

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ : где p количество колонн в здании

Каждой колонне присваиваются следующие параметры дефектов для различных КТС

Ширина раскрытия вертикальных (продольных) трещин PT мм. (см. рисунок 2 - а)

$$\forall c \in C; PT(c)$$

Ширина раскрытия горизонтальных (поперечных) трещин GT мм. (см. рисунок 2 - б)

$$\forall c \in C; GT(c)$$

Уменьшение поперечного сечения колонны в результате коррозии бетона UB % (см. рисунок 2 - в)

$$\forall c \in C; UB(c)$$

Уменьшение поперечного сечения продольной арматуры в результате коррозии US % (см. рисунок 2 - в)

$$\forall c \in C; US(c)$$

Выпучивание сжатой арматуры VA (см. рисунок 2 - г)

$$\forall c \in C; VA(c)$$

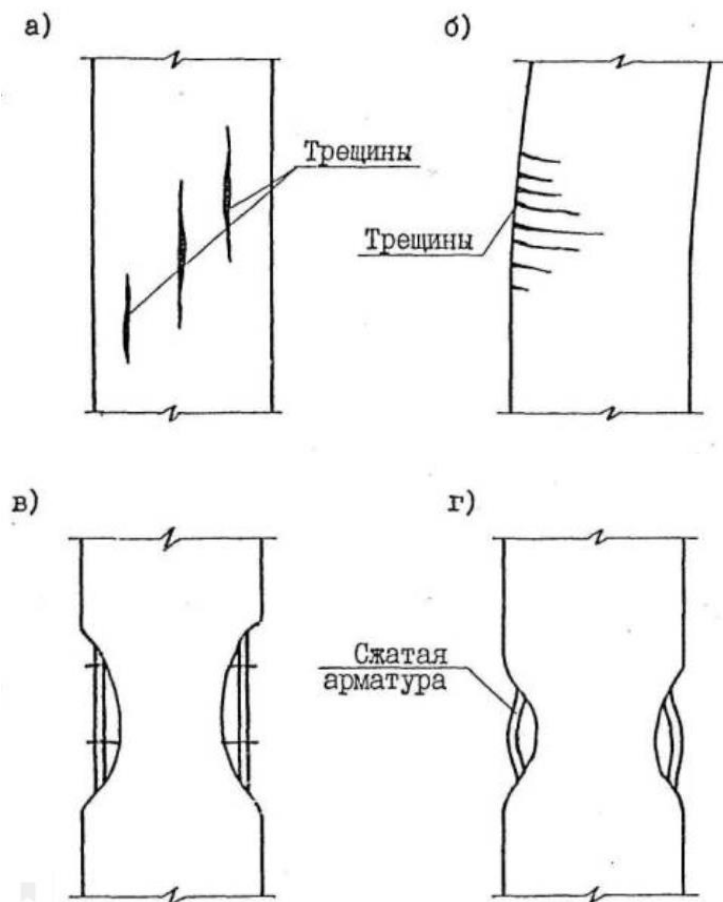


Рис. 2 – Дефекты возникающие в железобетонных колоннах

В зависимости от параметров выявленных дефектов возникших в железобетонных колоннах определяется категория их технического состояния.

Для ширины раскрытия продольных (вертикальных) трещин PTU



$$PTU(c) = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, >0.4\}$$

Для ширины раскрытия поперечных (горизонтальных) трещин GTU

$$GTU(c) = \{0.1, 0.3, 0.4, 0.5, >0.5\}$$

Для уменьшения поперечного сечения колонны в результате коррозии бетона UB

$$UBU(c) = \{0, 5, 10, 20, >20\}$$

Для уменьшения поперечного сечения продольной арматуры в результате коррозии USU

$$USU(c) = \{0, 0, 20\%, 30\%, >30\%\}$$

Для выпучивания сжатой арматуры VAU

$$VAU(c) = \{0, 0, 0, 1, 1\}$$

Оценка КТС каждой колонны производится путем сравнения значения её параметров дефектов с соответствующими предельно-допустимыми значениями при различных КТС.

Наихудший показатель дефектов, из всех имеющихся в колонне, определяет КТС рассматриваемой колонны.

Категория технического состояния колонны  $K(c)$

$$\begin{aligned} K(c) &\in \{1, 2, 3, 4, 5\} \\ \forall c \in C; PT(c) &= ptu_i \& GT(c) = gtu_j \& UB(c) = ubu_k \& US(c) = usu_l \& VA(c) = vau_m \\ \Rightarrow K(c) &= \max(i, j, k, l, m) \end{aligned}$$

где  $i, j, k, l, m \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

Таким образом, множество колонн, имеющих категории технического состояния N

$$CKN = \{c \in C; K(c) = N\}, N \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

Таким образом представленная методология реализованная на примере определения КТС для балок и колонн позволят реализовать подход к определению категории технического состояния всего множества несущих строительных конструкций здания и на основе полученного результата определить итоговую оценку технического состояния всего здания  $N = \{B, C, S, \dots\}$  с целью принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации здания, его реконструкции или сноса.

### Заключение

Разработанная математическая модель для оценки технического состояния здания является основой разработки автоматизированной системы, с помощью которой в крупномасштабных исследованиях могут приниматься комплексные решения о восстановлении отдельных строительных объектов, а также городских районов и микрорайонов, в том числе получившим разрушения в результате военных конфликтов. Построение таких моделей послужит основой для автоматического создания плана дальнейших восстановительных мероприятий с соответствующими объектами на основе анализа данных, собранных по зданиям.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Айюб Ф. Принятие проектных решений по восстановлению строительных объектов на основе BIM технологий (на примере Сирии) / Ф. Айюб, Н.А. Гаряев // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы Сборник материалов семинара, проводимого в рамках VI Международной научной конференции. – 2018. – С. 37-42.
2. Гранев В.В. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений / В.В. Гранев, Ю.В. Фролов, В.Т. Ильин // МИНСТРОЙ РФ, Москва, 1997.
3. Федоров С.С. Современные методы и подходы к автоматизации 3-D армирования в AUTODESK REVIT / С.С. Федоров, С.Д. Казаков, Н.А. Гаряев // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы - 2019 Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 535-537.
4. MOODI F 2001 Development of knowledge-based system for the repair and the maintenance of concrete structures (Newcastle, UK) PhD Thesis, Newcastle university.

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

1. Ajjub F. Prinjatje proektnyh reshenij po vosstanovleniju stroitel'nyh ob#ektov na osnove BIM tehnologij (na primere Sirii) [The design decisions on the restoration of construction facilities based on BIM technologies (on the example of Syria)] / Ajjub F., Garjaev N.A. // Sistemotekhnika stroitel'stva. Kiberfizicheskie stroitel'nye sistemy Sbornik materialov seminar, provodimogo v ramkah VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii [The materials of the seminar held during the VI International scientific conference]. – 2018. – pp. 37–42. [in Russian]

2. Granev V. V. Rekomendacii po usileniju i remontu stroitel'nyh konstrukcij inženernyh sooruzhenij [The recommendations for strengthening and repairing of the building units of engineering structures] / V. V. Granev, Ju. V. Frolov, V. T. Iljin. – M. : MINSTROJ RF, 1997. [in Russian]

3. Fedorov S. S. Sovremennye metody i podhody k avtomatizacii 3-D armirovanija v AUTODESK REVIT [Modern methods and approaches in automation process of 3-D reinforcement in AUTODESK REVIT] / Fedorov S. S., Kazakov S. D., Garjaev N. A. // Sistemotekhnika stroitel'stva. Kiberfizicheskie stroitel'nye sistemy – 2019. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii [System Engineering of Construction. Cyberphysical building systems – 2019. The materials of the all-Russian scientific and practical conference]. – 2019. – pp. 535–537. [in Russian]

4. MOODI F 2001 Development of knowledge-based system for the repair and the maintenance of concrete structures (Newcastle, UK) PhD Thesis, Newcastle university.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.006>

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Научная статья

**Быховцев Е.В. \***

Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия

\* Корреспондирующий автор (byxovcev[at]list.ru)

### Аннотация

Рассмотрена иерархическая структура комплекса специальной техники, как сложной динамической системы, на основании которой весь объект представлен шестью уровнями рангов элементов. На основании предложенной иерархической структуры процесс проектирования представлен фазами замкнутых конструкторских работ. В результате выделены основные этапы моделирования процесса проектирования комплекса специальной техники, на основании которых построен алгоритм автоматизации проектирования. Таким образом, использование современных средств моделирования, позволит отказаться от реальных экспериментов, учитывать максимальное количество параметров, что в итоге позволит снизить издержки, сократить время и трудозатраты, добиться оптимальных параметров.

**Ключевые слова:** комплекс специальной техники, иерархия структуры, алгоритм конструирования, система автоматизации проектирования.

## DEVELOPING DESIGN AUTOMATION SYSTEM FOR SPECIAL EQUIPMENT COMPLEX

Research article

**Bykhovtsev E. V. \***

Omsk Tank-Automotive Institute of Engineering, Omsk, Russia

\* Corresponding author (byxovcev[at]list.ru)

### Abstract

Hierarchical organization of special equipment complex is viewed as a complex dynamic system, whereby the six levels of element ranks represent the whole object. Following the suggested hierarchical organization, the design process comes as phases of independent structural designing. Consequently, the main stages of modelling the special equipment complex design process are found, whereby the algorithm for design automation is developed. This way, usage of modern modelling tools can eliminate live tests, enables the consideration of the maximum amount of parameters, and that can result in keeping costs down, decreasing time expenditure and labour effort, and achieving optimum performance.

**Keywords:** special equipment complex, structure hierarchy, engineering algorithm, design automation system.

Комплекс специальной техники (СТ) - это сложная динамическая система (рис. 1), состоящая из базового и функционального модулей. Базовый модуль комплекса представляет собой типовое унифицированное шасси, включающее в себя корпус (раму), средства подвижности, защиты, вооружения, жизнеобеспечения, электроснабжения и др. Основное предназначение данного модуля – обеспечить размещение, хранение, защиту и доставку технологического оборудования и экипажа к месту проведения функциональных работ. Функциональный модуль включает в себя технологическое оборудование, соответствующее производственному назначению комплекса.

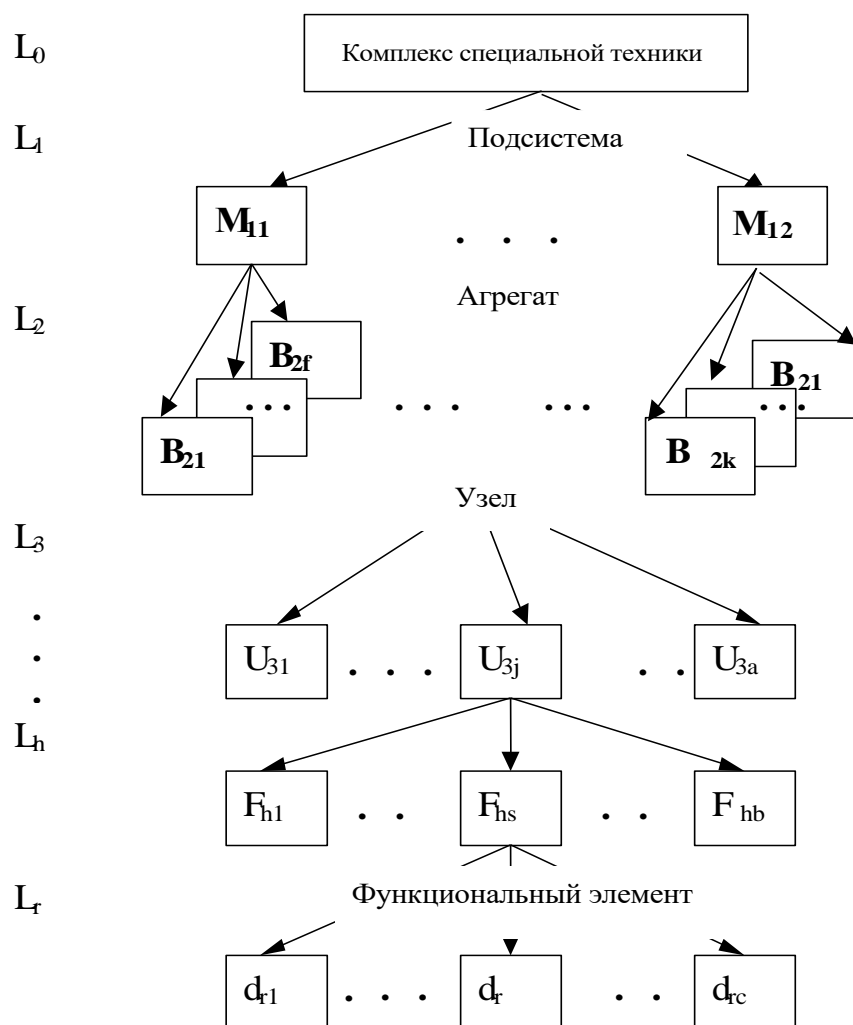


Рис.1 – Иерархическая структура комплекса специальной техники, где  $M$  - подсистем первого ранга,  $B$  - агрегаты второго ранга,  $U$  - узлы третьего ранга,  $F$  - элементы  $h$  ранга,  $d$  - простейшие функциональные элементы, условно  $r$ -ранга,  $L$  - иерархия рангов элементов

Для подобного класса систем, характерны следующие особенности:

- особые требования к тактико-техническим свойствам (подвижности, защищенности, вооруженности, командной управляемости, эксплуатационно-техническим свойствам) и технологическим характеристикам;
- системный характер структуры комплекса СТ и выполняемого с использованием его оборудования технологического процесса функционирования;

- непосредственная связь проявлений свойств надежности комплекса СТ и качества его оборудования с эффективностью. В соответствии с работами [1], [2], комплекс СТ следует рассматривать, с точки зрения его проектирования, производства и эксплуатации, как сложную многоуровневую, иерархическую структуру, которая может быть представлена, в соответствии с часто используемым общим подходом к моделированию сложных технических систем с помощью теории графов. Графами называются схемы, состоящие из точек и соединяющих их отрезки прямых или кривых [2]. Любая техническая схема может быть представлена графом, промежуточные узлы, которого соответствуют рангам элементов разного уровня детализации. На рисунке 1, представлены разные уровни иерархии:  $L_0$  - комплекс специальной техники, представляющий собой, совокупность подсистем,  $L_1$  - подсистемы,  $L_2$  - агрегаты,  $L_3$  - узлы, и  $L_h$  - функциональные элементы - первичные объекты конструкции.

Таким образом, процесс проектирования неразрывно связан с созданием технической системы и является одним из ее этапов. Значит, как предлагается в работах [1], [2] процесс проектирования можно представить, как иерархическую структуру, выраженную фазами замкнутых конструкторских работ (рис. 2).

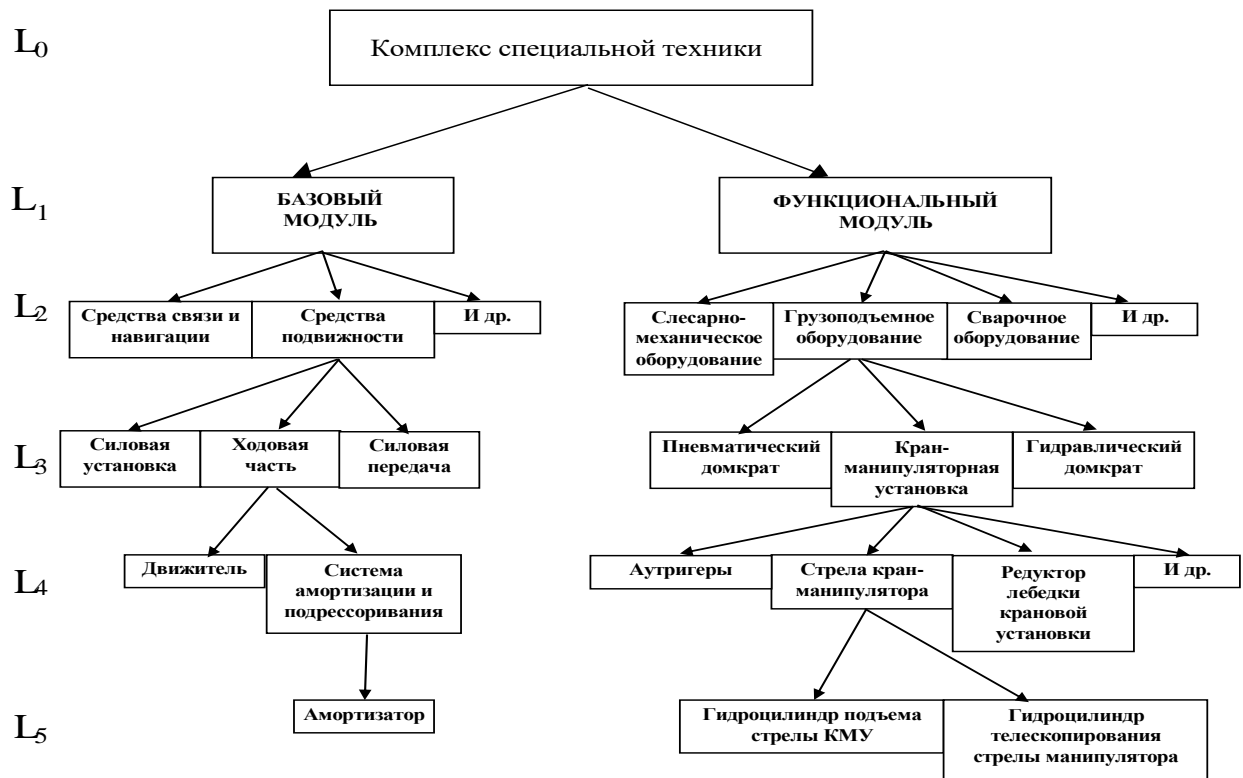


Рис.2 – Иерархическая структура комплекса специальной техники

Построение алгоритма системы автоматизации проектирования (рис. 3) комплекса специальной техники: на начальном этапе перед проектировщиком стоит задача определения потребностей и проблем, а также формулирование возможных решений, после чего создается геометрическая модель объекта, которая анализируется аналитическим моделированием и экспериментальными исследованиями.

При проектировании комплекса специальной техники, необходимо учитывать, что оба модуля объекта являются сложными системами.

На начальном этапе определяется конструкция комплекса СТ: задаются его геометрические размеры, определяется масса, технологическое оснащение и т.д., на этом этапе важно определиться с выбором основных компонентов обоих модулей.

Сложность базового модуля комплекса СТ определяется множеством сочлененных конструктивных элементов, обеспечивающих реализацию определенных тактических задач и тактико-технических свойств данного средства. Основными конструктивными составными частями базового модуля комплекса являются средства обеспечения подвижности, защиты, средств связи и навигации и вооружения.

Сложность функционального модуля объекта определяется количеством технологически самостоятельных составных частей (комплектов технологического оборудования), предназначенных для выполнения частных производственных задач [3], [5], [6].

Таким образом, основная производственная задача комплекса специальной техники включает в себя два сложных процесса: выдвижение (доставку технологического оборудования и экипажа) к месту проведения функциональных работ и непосредственное выполнение этих работ. Уместно отметить, что в данном случае комплекс специальной техники представляет собой человеко-машинную систему, состоящую из экипажа и машины. Затем вводятся входные параметры также для обоих модулей, для базового модуля это такие как показатель средней скорости движения по грунтовым дорогам (шоссе), удельное давление на грунт, минимальный радиус поворота, запас хода по топливу и т.д.

Моделирование процесса проектирования комплекса специальной техники может иметь следующие этапы [7], [8]:

1. Создание сборочной модели, состоящей из элементов, имеющих параметры реальных. При этом используется библиотека стандартных деталей комплексов СТ данного типа и типоразмерный ряд комплексов СТ из информационного обеспечения САПР (ИО).

2. Задание динамических связей, входных параметров системы.

3. Расчет с помощью математического обеспечения САПР (МО): идет расчет параметров системы.

4. Визуализация результатов моделирования. Пользователь в режиме реального времени, может отслеживать изменение системы и выходные характеристики.

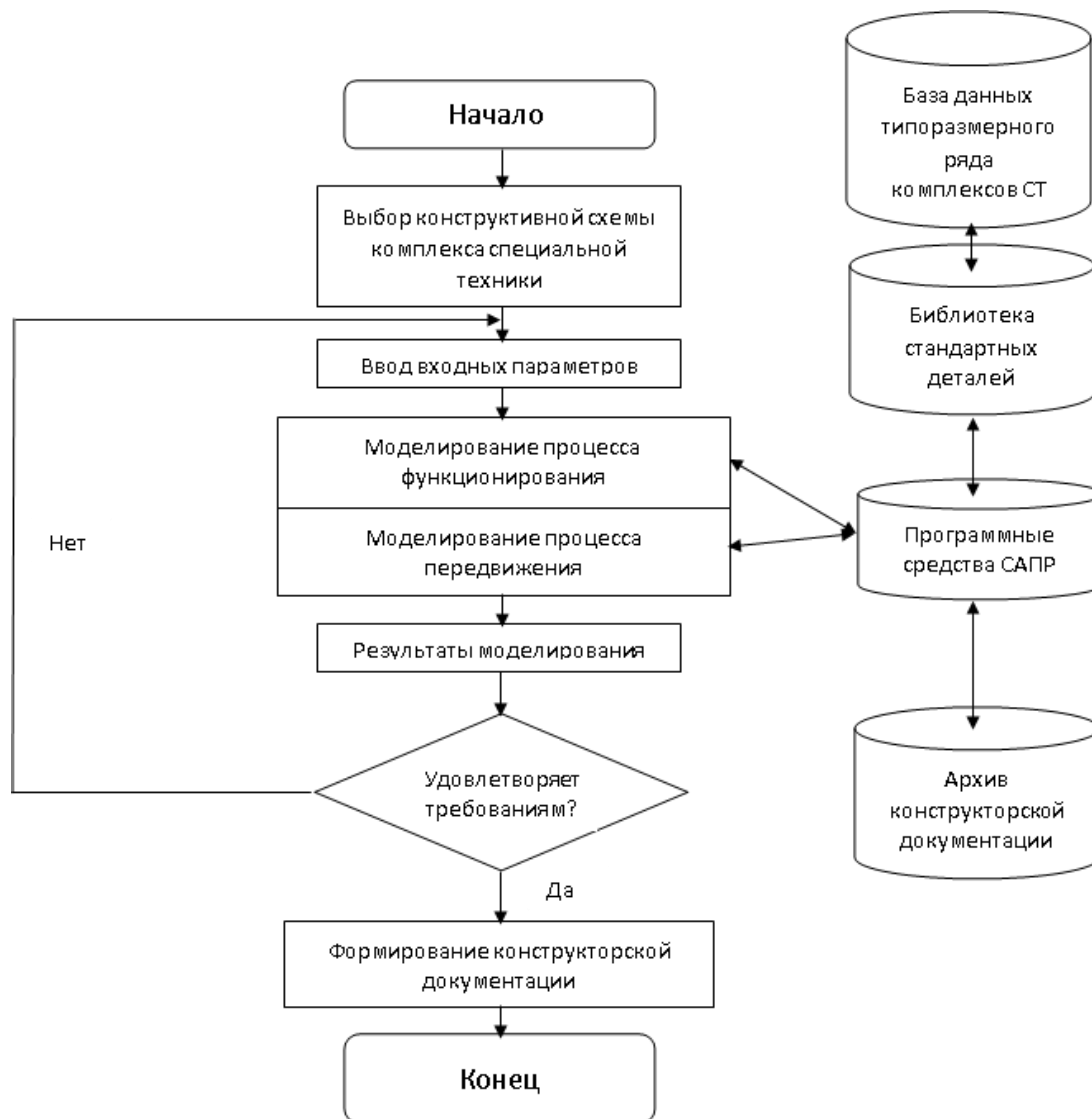


Рис. 3 – Блок-схема алгоритма системы автоматизации проектирования комплекса специальной техники

Далее в зависимости от того, удовлетворяют ли полученные результаты техническим требованиям, идет оформление конструкторской документации, либо корректируются входные параметры, для повторного расчета.

**Вывод информации.** Получение конструкторской документации (чертежей и тестовых документов) с применением ЭВМ не только удобно для конструктора, но и значительно сокращает сроки проектирования. Исполнение графических документов составляет до 30% трудоемкости конструкторских работ, а производительность чертежных автоматов в 400 раз превышает производительность чертежника [9]. В автоматизированном проектировании выходную информацию целесообразно представлять в виде, не требующем дополнительной обработки и соответствующем ЕСКД, хотя это и требует значительных дополнительных усилий на разработку соответствующего программного обеспечения.

Компоновочный чертеж обладает большой плотностью и наглядностью представления информации, но не дает полного количественного описания отсека. Данные о размерах элементов, координатах и установки, основные характеристики агрегата необходимо выдавать в виде таблиц с соответствующими комментариями.

**Вывод графической информации.** Математическое обеспечение для получения графических документов должно содержать программы:

- выбора видов, сечений, размеров;
- построения двумерного изображения;
- удаления невидимых линий;
- построения размерных линий и надписей;
- сокращения холостых проходов;
- вычерчивания.

Задача выбора видов заключается в отображении взаимного положения и относительных размеров каждого элемента компоновки при минимальном количестве избыточной информации.

Простейший алгоритм выбора видов для вычерчивания компоновки агрегата с прямоугольными параллелепипедами заключается в следующем:

- конструктор выбирает два основных вида отсека;
- для каждого вида составляется список элементов в порядке возрастания координат размещения по оси, перпендикулярной плоскости проекции;

- из списка удаляются элементы, видимые на основном виде; видимым считается прибор, два ребра которого не закрываются другими элементами;
- координаты первого из оставшихся приборов списка и определяют плоскость сечения отсека;
- список приборов корректируется, и процесс повторяется до тех пор, пока не будут получены параметры плоскостей сечения, полностью раскрывающие внешний вид компоновки. Схема алгоритма приведена на рис. 6.

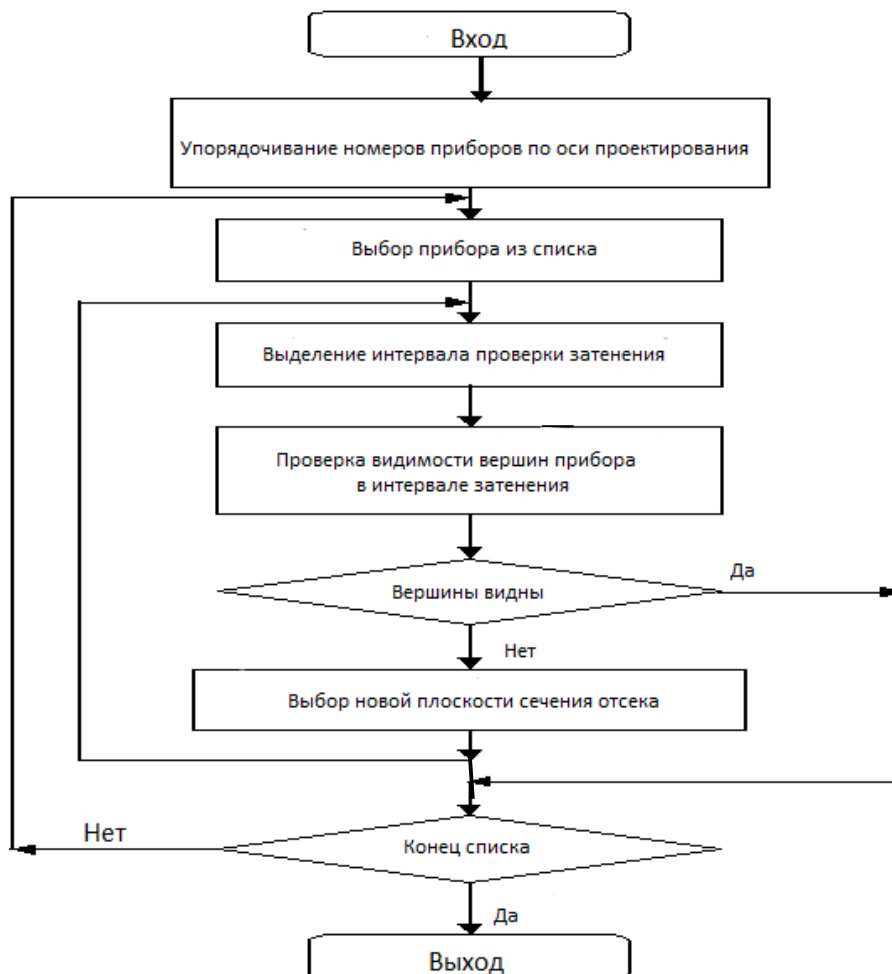


Рис. 6 – Схема алгоритма выбора видов отсека

Основная сложность при построении таких программ заключается в размещении надписей и размерных линий на свободном поле чертежа.

Построение двумерного изображения сводится к проецированию ребер приборов и образующих оболочки на соответствующую координатную плоскость [9]. Выходными параметрами программы построения чертежа являются кортежи координат вершин и признаков вычерчивания ломаной линии, образующей чертеж.

Для удаления невидимых линий в чертеже компоновки, образованной произвольно ориентированными прямоугольными параллелепипедами, использован следующий алгоритм:

- составляются списки вершин, образующих на плоскости ломаные линии, ограничивающие проекции граней параллелепипедов;
- проверяется пересечение ребер для каждой пары проекций граней; для пересекающихся ребер определяются координаты точек пересечения (на плоскости);
- видимость отрезков ребер определяется положением вершин одной грани относительно плоскости другой;
- списки вершин, образующих ломаные линии, дополняются точками пересечения ребер в соответствии с условиями видимости; невидимые вершины исключаются из списков.

Таким образом, выходная информация алгоритма представляет собой списки координат вершин, образующих видимые линии компоновки. Схема алгоритма представлена на рис. 7.

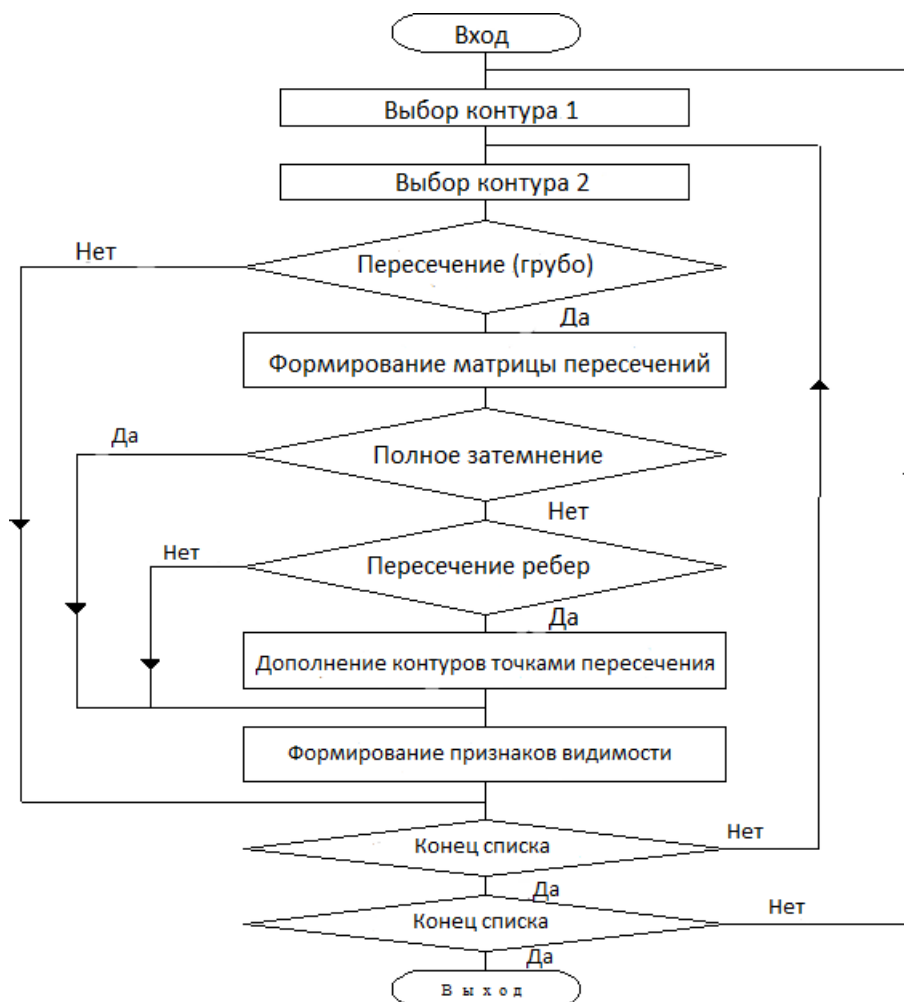


Рис. 7 – Схема алгоритма удаления невидимых линий

Программы построения размерных линий и надписей используют стандартные блоки библиотеки ГРАФОР [10].

Следует отметить, что алгоритм автоматизации проектирования (рис.3), применим для различных программных продуктов САПР, имеющих развитое математическое обеспечение (МО) и графический редактор, позволяющий моделировать объект в 3D режиме. Это такие программы, как Solid Works, ANSYS, Cosmos, APM Structur 3D и др. Использование современных средств моделирование, позволит отказаться от реальных экспериментов, учитывать при проектировании, максимальное количество параметров, а в итоге снизить издержки, сократить время и трудозатраты, добиться оптимальных параметров.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Ахтулов, А.Л. Методология построения и практического применения систем автоматизации проектирования транспортных машин [Текст] / А.Л. Ахтулов // Вестник сибирской автомобильно-дорожной академии. 2004. Выпуск 3. С.14-29
2. Зыков, А.А. Основы теории графов [Текст] / А.А. Зыков. М.: Наука, 1987. 664 с.
3. Методика оценки военно-технического уровня ПСР БТВТ / испол. Е.Г. Соболев [и др.] / НИИЦ БТ 3 ЦНИИ МО РФ. 2018. – 74 с. – Инв. № 4103.
4. Концепция развития подвижных средств восстановления вооружения и военной техники до 2025 года: Е.Г. Соболев и [др.]: НИИЦ БТ 3 ЦНИИ МО РФ, 2017. – 202 с.
5. Свиринов, Р.В. Обоснование состава технологического оборудования в ремонтно-восстановительных органах для ремонта танков в условиях ведения боевых действий: дис. ...канд. техн. наук / Р.В. Свиринов. в.ч. 68054, 1998. – 200 с.
6. Ильин, А.В. Обоснование требований к бронированным ремонтно-эвакуационным машинам по технологическим свойствам [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук. 38 НИИИ МО РФ, 2005. – 220 с.
7. Ахтулов, А.Л. Обеспечение качества проектирования мостовых кранов с учетом динамических характеристик: монография [Текст] / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова [и др.]; под общ. ред. А.Л. Ахтулова. Омск: СибАДИ, 2010. 137 с.
8. Ахтулов, А.Л. Визуальное моделирование двухбалочного мостового крана как сложной динамической системы [Текст] / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова [и др.] // Омский научный вестник. 2014. № 1 (127). С. 147-152
9. Nakala M.K. Current trends in vibration calculation methods // Seminar on Ship vibration, 24-th ESPOO. - 1982. - Vol. 24. - pp. 115-134.
10. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи / В.С. Полозов, О.А. Буденов, С.И. Ротков, Л.В. Широкова. - М.: Машиностроение, 1983. - 280 с.



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

1. Akhtulov, A.L. Metodologija postroenija i prakticheskogo primeneniya sistem avtomatizacii proektirovanija transportnyh mashin [Methodology for the construction and practical application of automation systems for the design of transport vehicles] [Text] / A.L. Akhtulov // Bulletin of the Siberian Automobile and Highway Academy. 2004. Issue 3. P.14-29 [in Russian]
2. Zykov, A.A. Osnovy teorii grafov [Fundamentals of graph theory] [Text] / A.A. Zykov. M.: Nauka, 1987.664 s.
3. Metodika ocenki voenno-tehnicheskogo urovnja PSR BTVT [Methodology for assessing the military-technical level of the PSR BTVT] / executive. E.G. Sobolev [et al.] / NIIC BT 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. 2018.- 74 p. - Inv. No. 4103. [in Russian]
4. Koncepcija razvitiya podviznyh sredstv vosstanovlenija vooruzhenija i voennoj tehniki do 2025 goda [The concept of the development of mobile means of restoring weapons and military equipment until 2025:] E.G. Sobolev and [other].: NIIC BT 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2017. - 202 p. [in Russian]
5. Svirin, R.V. Obosnovanie sostava tehnologicheskogo oborudovanija v remontno-vosstanovitel'nyh organah dlja remonta tankov v uslovijah vedenija boevykh dejstvij: dis. ...kand. tehn. nauk [Justification of the composition of technological equipment in the repair and restoration bodies for the repair of tanks in the conditions of warfare: dis. ... cand. tech. sciences] / R.V. Svirin. h 68054, 1998.- 200 p. [in Russian]
6. Ilyin, A.V. Obosnovanie trebovanij k bronirovannym remontno-jevakuacionnym mashinam po tehnologicheskim svojstvam [Justification of requirements for armored repair and recovery vehicles by technological properties] [Text]: diss. ... cand. tech. sciences. 38 NIIC MO RF, 2005. - 220 p. [in Russian]
7. Akhtulov, A.L. Obespechenie kachestva proektirovanija mostovykh kranov s uchetoj dinamicheskix harakteristik: monografija [Ensuring design quality of bridge cranes taking into account dynamic characteristics: monograph] [Text] / A.L. Akhtulov, L.N. Akhtulova [et al.]; under the general. ed. A.L. Akhtulova. Omsk: SibADI, 2010.137 p. [in Russian]
8. Akhtulov, A.L. Vizual'noe modelirovanie dvuhbalochnogo mostovogo kрана kak slozhnoj dinamicheskoy sistemy [Visual modeling of a two-girder bridge crane as a complex dynamic system] [Text] / A.L. Akhtulov, L.N. Akhtulova [et al.] // Omsk Scientific Herald. 2014. No. 1 (127). P. 147-152 [in Russian]
9. Hakala M.K. Current trends in vibration calculation methods // Seminar on Ship vibration, 24-th ESPOO. - 1982. - Vol. 24. - pp. 115-134.
10. Avtomatizirovannoe proektirovanie. Geometricheskie i graficheskie zadachi [Computer aided design. Geometric and graphical problems] / V.S. Polozov, O.A. Budenov, S.I. Rotkov, L.V. Shirokova. - M.: Mechanical Engineering, 1983. - 280 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.007>**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ МЕДИ**

Научная статья

**Хожиев Ш.Т.<sup>1</sup>, Ганиев А.А.<sup>2,\*</sup>, Ротштейн В.М.<sup>3</sup>, Косимов И.О.<sup>4</sup>, Муродкobilов Д.М.<sup>5</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1879-1931;<sup>1, 2, 4, 5</sup> Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан;<sup>3</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан

\* Корреспондирующий автор (abduvohidganiyev330[at]mail.ru)

**Аннотация**

Экспериментально обнаружены и исследованы различные пики в спектре комбинационного рассеяния (КРС) образцов кремния, имплантированных ионами меди. На основе данных КРС, полученных для образцов с различными режимами имплантации Cu и лазерного отжига, исследована динамика трансформации микроскопической структуры приповерхностного слоя кремния. Полученные экспериментальные данные хорошо объясняются наличием локальных атомов Cu в узлах кристаллической решетки.

**Ключевые слова:** кремний, имплантация, ионы меди, спектр комбинационного рассеяния, микроструктура.

**STUDY OF SILICON SURFACE IMPLANTED WITH COPPER IONS**

Research article

**Khojiyev Sh.T.<sup>1</sup>, Ganiyev A.A.<sup>2,\*</sup>, Rotshteyn V.M.<sup>3</sup>, Kosimov I.O.<sup>4</sup>, Murodkobilov D.M.<sup>5</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1879-1931;<sup>1, 2, 4, 5</sup> Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan;<sup>3</sup> Institute of ion-plasma and laser technologies, Tashkent, Uzbekistan

\* Corresponding author (abduvohidganiyev330[at]mail.ru)

**Abstract**

Various peaks in the Raman spectrum of silicon samples implanted with copper ions were found and studied experimentally. The dynamics of transformation of the microscopic structure of the near-surface layer of silicon is studied on the basis of Raman scattering data obtained under various modes of Cu implantation and laser annealing. The obtained experimental data are well explained by the presence of local Cu atoms in the nodes of the crystal lattice.

**Keywords:** silicon, implantation, copper ion, Raman spectrum, microstructure.

**Введение**

При введении в кремний тяжелых элементов происходят такие интересные эффекты как: низкотемпературная рекристаллизация, с выделением газа [4] и примеси водорода [5], химическая активность инертных тяжелых газов [1], а также образование пористой структуры [2], сопровождаемое усилением КРС и люминесценции [3]. Также значительный интерес к физической природе этих эффектов наблюдается в следствии появления новых практических приложений. Методом КРС было исследовано преобразование микроскопической структуры кристаллической решетки кремния и ее динамических свойств при различных режимах имплантации и лазерного отжига [6], [7].

**Методы и принципы исследования**

Исследования проводились на InVia Raman Spectrometer, производства компании «Renishaw» (Великобритания) (см. рисунок 1). Работа спектрометра основана на методе спектроскопии комбинационного рассеяния света, или рамановской спектроскопии. Использование данного метода обеспечивает проведение идентификации, качественного и количественного анализа органических и неорганических веществ.

В качестве образцов исследовались пластины монокристаллического кремния КДБ-0.5, (кремний с дырочной электропроводностью, легированный бором, с удельным сопротивлением 0.5 Ом/см. Измерения велись при комнатной температуре. В качестве источника возбуждения использовался Cobolt CW 532 nm DPSS лазер с длиной волны излучения 532 нм и номинальной энергией 100 мВт. В процессе измерений использовалась дифракционная решётка с периодом 1800 линий/мм, а в качестве регистрирующего устройства – штатный детектор Renishaw CCD Camera.

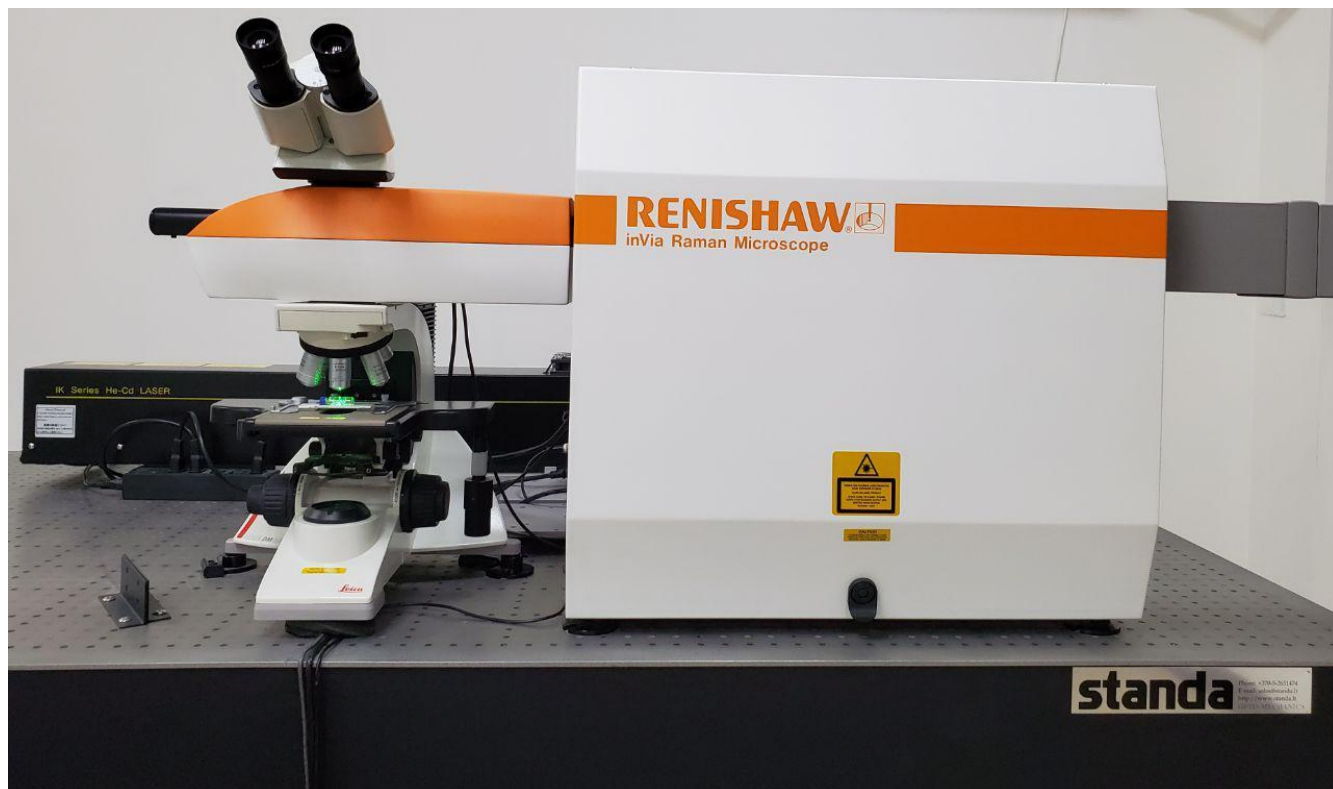


Рис. 1 – Общий вид InVia Raman Spectrometer

Лазерный луч фокусировался на поверхность образцов в пятно диаметром 10 мкм. Мощность излучения на поверхности образца варьировалась в зависимости от величины выходного сигнала на детекторе. Объектив со 100-кратным увеличением использовался для фокусировки возбуждающего света, а также для сбора рассеянного света. Время экспозиции составляло 10 секунд, при этом измерения проводились в режиме "extended", которое позволяет проводить измерения в требуемом спектральном диапазоне длин волн.

#### Основные результаты и их обсуждение

Полученные спектры КРС позволили проследить трансформацию структуры приповерхностного слоя толщиной ~ 100 нм и локализацию атомов Си в матрице Si по мере повышения дозы имплантации, а также при увеличении энергии лазерного облучения. В исходных имплантированных образцах спектр КРС соответствует в основном аморфному состоянию приповерхностного слоя Si. На рис. 2 представлено изображение исследуемого участка поверхности образца, полученное с использованием штатного микроскопа InVia Raman Spectrometer.

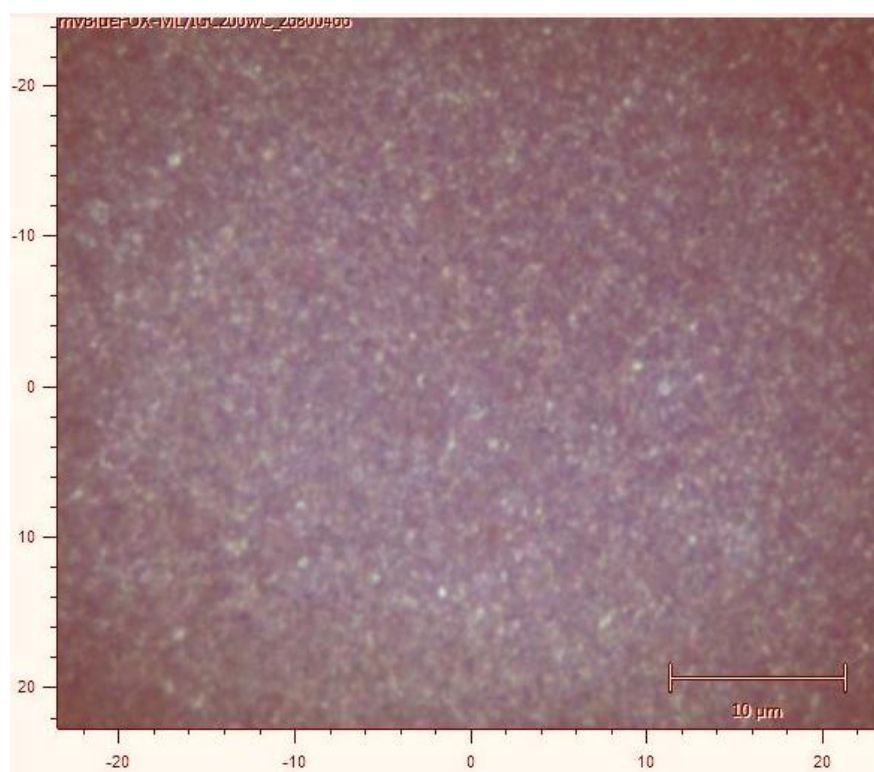


Рис. 2 – Изображение участка поверхности исследуемого образца

На рис. 3 представлен спектр комбинационного рассеяния исследуемого образца монокристаллического кремния, полученный нами с использованием InVia Raman Spectrometer в режиме, описанном ранее [6], [7].

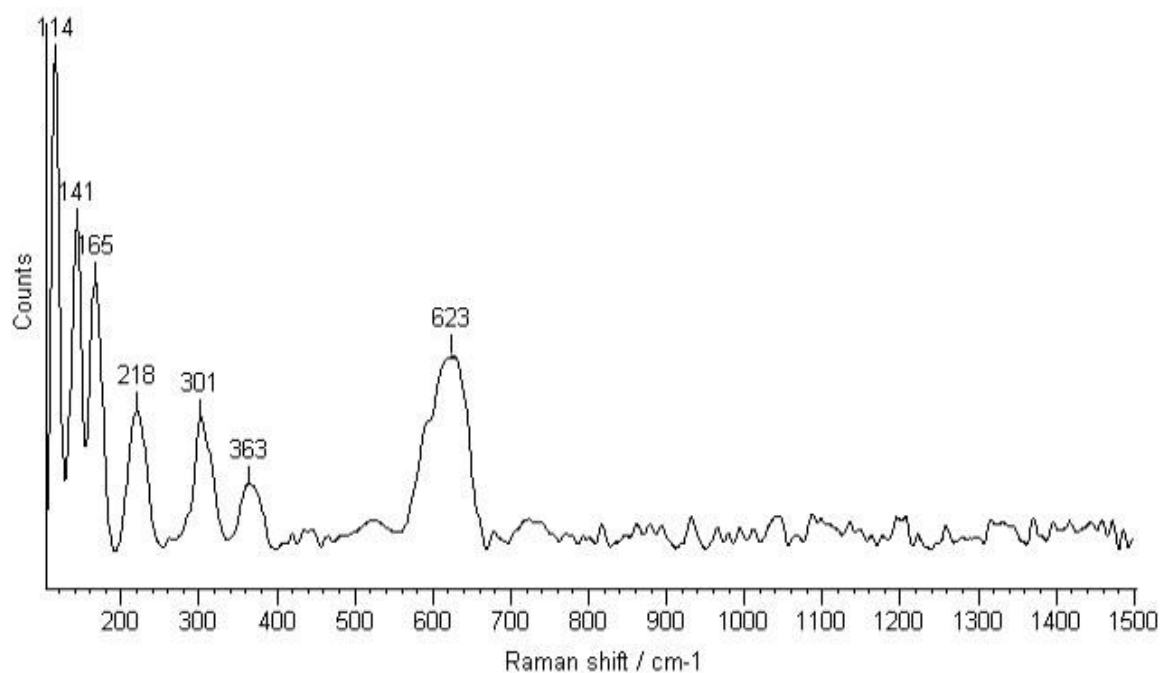


Рис. 3 – Спектр комбинационного рассеяния исследуемого образца

Анализируя полученный данный спектр, следует отметить, что он, наряду с другими полосами, содержит три полосы с максимумами при 301, 363 и 623  $\text{см}^{-1}$ . Положения максимумов этих полос близки к соответствующим значениям для  $\text{CuO}$ , что было определено в [4]. Это позволяет предположить, что исследуемая плёнка имеет химический состав, близкий к  $\text{CuO}$ . А появление таких полос, как (114, 141, 165, 218)  $\text{см}^{-1}$ , связано с несовершенством кристаллической структуры  $\text{Cu}_2\text{O}$  и наличием, наряду с кристаллической, аморфно-кристаллической структуры, что следует из результатов исследований, проведенных авторами работы [3]. Следует отметить, что для удаления пиков, ответственных за  $\text{Cu}_2\text{O}$  и образованных из-за различных точечных дефектов, возникающих в процессе ионной имплантации, применяется последующий отжиг уже имплантированных образцов в вакууме при температуре 500°C.

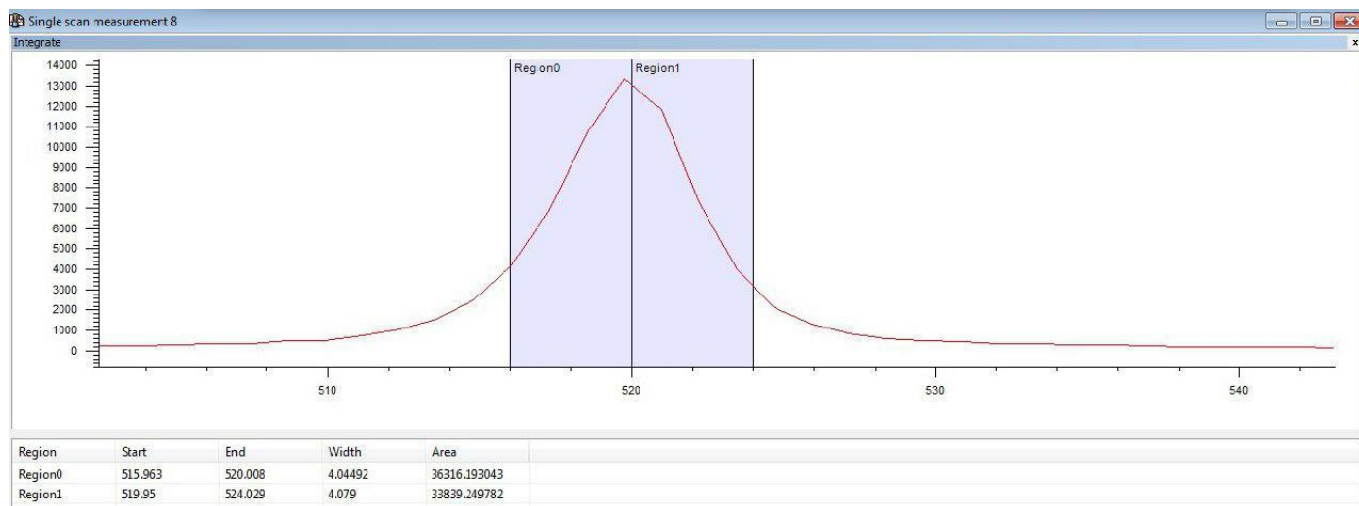


Рис. 4 – Спектры комбинационного рассеяния чистого кремния

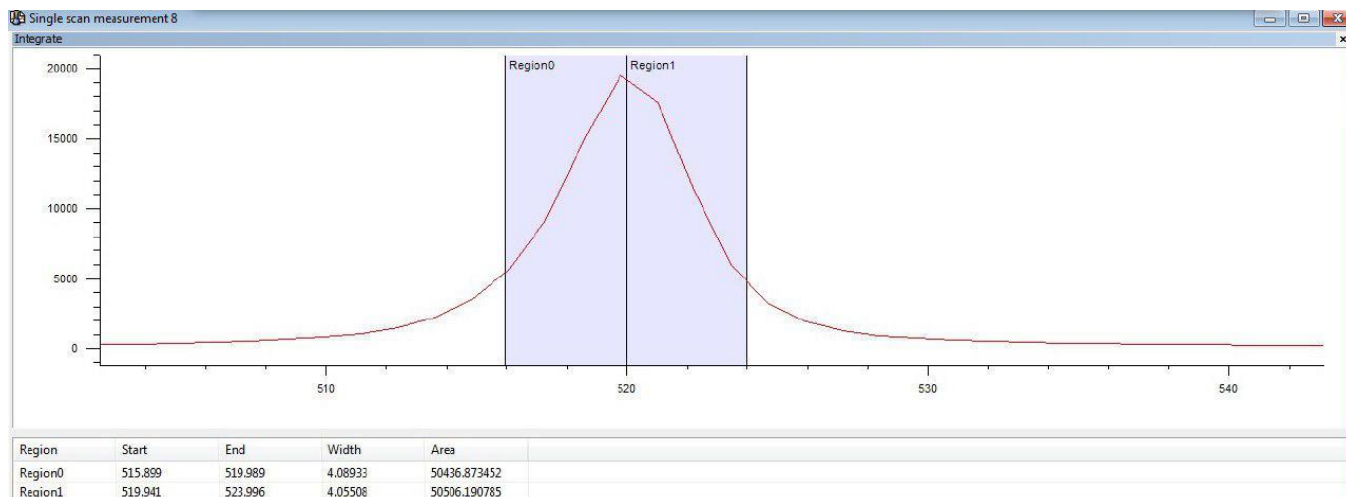


Рис. 5 – Спектры комбинационного рассеяния кремния имплантированного ионами меди

На рис. 4 и 5. показаны спектры комбинационного рассеяния чистого кремния и кремния, имплантированного ионами меди. Используя то, что при возникновении напряжений и дефектов в кристаллической решетке образца происходит соответствующее изменение положения и формы пика кремния в спектре комбинационного рассеивания, можно оценить наличие, или отсутствие таких напряжений и дефектов, исходя из изменения частоты собственных колебаний монокристаллического кремния и изменения отношения площадей левого и правого Region на соответствующих спектрах (см. рисунки 4 и 5).

Также в ряде работ [3], [4], [5] наблюдалось незначительное ( $\sim 3\text{см}^{-1}$ ) увеличение частоты собственных колебаний монокристаллического кремния. Это связывалось с наличием механических напряжений, возникающих благодаря различиям постоянных решеток эпитаксиальной пленки кремния и подложки [5], или вследствие локального лазерного отжига аморфного слоя. Кроме того, это может быть и из-за локального возмущения легирующей примесью замещения [3]. Изучение влияния легирования показало, что как диффузионное легирование, так и в еще большей мере ионная имплантация донорной примеси понижают температуру начала рекристаллизации, что хорошо объясняется повышением концентрации вакансий при таком легировании. Легирование акцепторной примесью (бором) замедляет рост зерен. Примеси никогда не ведут себя как в металлах, в которых примесь всегда тормозит рекристаллизацию. Начало рекристаллизации сопровождается изменением электрофизических свойств. В частности, в поликристаллических плёнках кремния (ППК) при этом понижается поверхностное сопротивление, что важно для ППК в метал-оксид-полупроводниковых (МОП) структурах.

Наибольший интерес представляет изучение влияния кислорода на структуру ППК, поскольку кислород практически всегда присутствует в пленках кремния. Источником кислорода в пленках являются атмосфера отжига и изолирующие слои  $\text{SiO}_2$ . Кислородные включения резко повышают термическую стабильность пленок, особенно аморфных [3]. Можно отметить, что природа и механизм низкотемпературной рекристаллизации с газовыделением остаются еще недостаточно изученными, однако на основании полученных в настоящей работе экспериментальных данных можно предположить, что процесс рекристаллизации стимулируется локальными напряжениями. Этот вывод подкрепляется экспериментально проверенными результатами о процессе кристаллизации аморфного кремния. Полученные экспериментальные данные хорошо объясняются наличием локальных атомов Cu в узлах кристаллической решетки.

### Заключение

По результатам наших исследований можно сделать вывод о том, что спектры комбинационного рассеяния образцов монокристаллического кремния, имплантированного ионами меди, могут быть использованы в качестве инструмента для проведения оценки их структурного совершенства и содержания собственных и примесных дефектов, а также присутствия в кристаллах неконтролируемых примесей и кислорода. Полученные результаты представляют существенный интерес для исследований в области микроэлектроники, дефектообразовании, а также при создании материалов для оптоэлектроники и нанотехнологии.

### Конфликт интересов

Не указан

### Conflict of Interest

None declared

### Список литературы / References

1. Тартаковский И.И. Спектроскопия комбинационного рассеяния света как метод для изучения материалов и "in-situ" исследования токообразующих реакций в композиционных электродах. ТОТЭ / И.И. Тартаковский, Д.А. Агарков. М.: Наука, 2008. – С. 76.
2. Афанасьев В.П. Исследование плёнок оксидов меди, полученных методом реактивного магнетронного распыления с разным составом газовой смеси аргон-кислород / В.П. Афанасьев и др // Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов конференции, Санкт-Петербург, 16–18 ноября 2015г.–СПб: Издательство Политехнического университета, 2015.– С. 216–217.
3. Горелик С.С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков / С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. – М. : МИСИС, 2003.

4. Meyer B.K. Binary copper oxide semiconductor: from materials towards devices / B.K. Meyer, A.Polity, D.Reppin et al. // Phys. Stat. Solid. B. – 2012. – Vol. 249. – P. 1–23.
5. Fujimoto K. Fabrication and characterization of copper oxide-zinc oxide solar cells prepared by electrodeposition / K.Fujimoto, T.Oku, T.Akiyama, A.Suzuki // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2013. – Vol. 433. – P. 012024.
6. Исследование спектров фотолюминесценции образцов селенида цинка методом Рамановской спектроскопии / Ш.Т. Хожиев [и др.]. // Universum: Технические науки: электронный научный журнал. 2020. № 4(73).
7. Исследование кремния легированного ионами бора спектроскопией комбинационного рассеяния (Raman spectroscopy) / Ш.Т. Хожиев [и др.]. // Высшая школа. Научно-практический журнал. № 3 2020.

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

1. Tartakovskij I.I. Spektroskopija kombinacionnogo rassejanija sveta kak metod dlja izuchenija materialov i "in-situ" issledovanija tokoobrazujushhih reakcij v kompozicionnyh jelektrodah. [Raman spectroscopy as a method for studying materials and "in-situ" studies of current-forming reactions in composite electrodes] TOTJe / I.I. Tartakovskij, D.A. Agarkov // M. Nauka. 2008g. P. 76. [in Russian]
2. Afanas'ev V.P. Issledovanie pljonok oksidov medi, poluchennyh metodom reaktivnogo magnetronnogo raspylenija s raznym sostavom gazovoj smesi argon-kislorod [Investigation of copper oxide films obtained by reactive magnetron sputtering with different composition of argon-oxygen gas mixture] / V.P. Afanas'ev et al. // Fiziko-himicheskie problemy vozobnovljaemoj jenergetiki: sbornik trudov konferencii, Sankt-Peterburg, 16–18 nojabrja 2015g.–SPb: Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2015. – P. 216–217. [in Russian]
3. Gorelik S.S. Materialovedenie poluprovodnikov i dijelektrikov. [Materials science of semiconductors and dielectrics] / S.S. Gorelik, M.Ja. Dashevskij– M. : MISIS, 2003. [in Russian]
4. Meyer B.K. Binary copper oxide semiconductor: from materials towards devices / B.K. Meyer, A.Polity, D.Reppin et al. // Phys. Stat. Solid. B. – 2012. – Vol. 249. – P. 1–23.
5. Fujimoto K. Fabrication and characterization of copper oxide-zinc oxide solar cells prepared by electrodeposition / K.Fujimoto, T.Oku, T.Akiyama, A.Suzuki // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2013. – Vol. 433. – P. 012024.
6. Issledovanie spektrov fotoluminescencii obrazcov selenida cinka metodom Ramanovskoj spektroskopii [Investigation of photoluminescence spectra of zinc selenide samples by Raman spectroscopy] / Sh.T. Khozhiev et al // Universum: Tehnicheskie nauki: jelektronnyy nauchnyy zhurnal. 2020. № 4(73). [in Russian]
7. Issledovanie kremnija legirovannogo ionami bora spektroskopiej kombinacionnogo rassejanija (Raman spectroscopy) [Investigation of silicon doped with boron ions by Raman spectroscopy] / Sh.T. Khozhiev et al // Vysshaja shkola. Nauchno-prakticheskij zhurnal. № 3 2020. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.008>**ОЦЕНКА ВРЕМЕННОЙ СЛОЖНОСТИ АЛГОРИТМОВ СОРТИРОВКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

Научная статья

**Журавлев А. А.<sup>1,\*</sup>, Трофимов С. П.<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Уральский Федеральный Университет им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

\* Корреспондирующий автор (SanyaProgrammer2503[at]gmail.com)

**Аннотация**

Алгоритмы играют важную роль в жизни современного человека. Любое действие людей можно считать алгоритмом. Анализ данных – самая популярная область применения алгоритмов. Наиболее известными методами для анализа данных являются алгоритмы сортировки. Важной характеристикой любого алгоритма является временная сложность. В данной статье предлагается оценка временной сложности алгоритмов с помощью метода наименьших квадратов. Основная идея данного метода заключается в минимизации суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений зависимой переменной от значений, предсказанных моделью. В качестве алгоритмов для анализа выбраны пузырьковая сортировка, сортировка вставками и сортировка слиянием. Для каждого алгоритма проведено измерение времени (практического) выполнения сортировки массива с количеством элементов от 10000 до 100000 элементов (с шагом 10000, всего 10 наборов). Теоретическое время для каждого алгоритма соответствует функции одного из трех семейств: линейного, логарифмического и квадратичного. Далее вычисляется сумма квадрата разности практического и теоретического времен для каждого из трех семейств (линейного, логарифмического и квадратичного). Временная сложность соответствует семейству функции с наименьшим значением суммы квадрата разности практического и теоретического времен.

**Ключевые слова:** оценка, алгоритм, сортировка, метод наименьших квадратов**EVALUATING TIME COMPLEXITY OF SORTING THROUGH THE LEAST-SQUARE METHOD**

Research article

**Zhuravlev A. A.<sup>1,\*</sup>, Trofimov S. P.<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

\* Corresponding author (SanyaProgrammer2503[at]gmail.com)

**Abstract**

Algorithms play an essential role in modern life. Any human action might be considered an algorithm. Data analysis is the most popular field of algorithm application. Most well-known methods of data analysis are sorting algorithms. The essential characteristic of any algorithm is time complexity. This article suggests the evaluation of time complexity through the least-square method. The main idea of this method is in minimizing the sum of squared deviations of dependant variable observed values from the model-predicted values. Bubble sort, insertion sort, and merge sort are the algorithms chosen for analysis. For every algorithm array sorting actual running time is measured, where the array included 10000 to 100000 elements (at 10000 intervals, ten sets altogether). Predicted time for every algorithm complies with the function of one of the classes: linear, logarithmic, and quadratic. Then the sum of the squared difference between the actual and the predicted time for every class (linear, logarithmic, and quadratic) is calculated. Time complexity matches the class of functions with the least value of the sum of the squared difference between the actual and the predicted time.

**Keywords:** evaluation, algorithm, sorting, least-square method**Введение**

Алгоритмы играют важную роль в жизни современного человека. Любое действие людей можно считать алгоритмом в той или иной степени. Однако наиболее популярной областью для применения алгоритмов является анализ данных. Алгоритмы сортировки – самые известные методы для анализа набора данных. Важная характеристика любого алгоритма – его временная сложность. Существует множество способов оценить сложность алгоритмов. Одним из них является метод наименьших квадратов (МНК), которому и посвящена данная статья.

Цель данной статьи – оценить временную сложность алгоритмов сортировки с помощью метода наименьших квадратов.

В качестве материала исследования выступают алгоритмы сортировки.

В статье используется эмпирический метод исследования, поскольку основным источником результатов является эксперимент.

**Описание метода наименьших квадратов**

Идея оценивания по методу наименьших квадратов заключается в минимизации суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений зависимой переменной от значений, предсказанных моделью [1], [2].

В данной статье за оцениваемую величину берется временная сложность алгоритма. Анализ проводится по следующему принципу:

- вычисляется практическое время выполнения  $T_{пр}$ , которое необходимо для сортировки определенного количества элементов;
- теоретическое время выполнения является функцией одного из следующих семейств: линейное (вид  $A + C \cdot N$ ), логарифмическое (вид  $A + C \cdot N \cdot \log N$ ) или квадратичное семейство (вид  $A + C \cdot N^2$ ) (здесь  $A$  и  $C$  – некоторые числовые коэффициенты,  $N$  – количество сортируемых элементов);



- вычисляется сумма квадрата разности практического и теоретического времен для каждого из семейств по формуле (1);
- временная сложность  $O$  соответствует семейству функции с наименьшим значением суммы квадратов разности. Для оценки временной сложности будем использовать следующую формулу:

$$S = \sum_{i=1}^n (T_{i, \text{пр}} - T_{i, \text{теор}})^2 \quad (1)$$

где  $S$  – сумма квадратов разности практического и теоретического времен для  $i$ -го значения выборки,  $n$  – количество элементов в выборке,  $T_{i, \text{пр}}$  – практическое время  $i$ -го значения выборки,  $T_{i, \text{теор}}$  – теоретическое время  $i$ -го значения выборки.

В качестве сравнительной статьи используется источник [3].

### Оценка временной сложности некоторых алгоритмов сортировки с помощью метода наименьших квадратов

В данной статье алгоритмами сортировки для оценки временной сложности являются: пузырьковая сортировка, сортировка вставками и сортировка слиянием. Объекты сортировки – целочисленные массивы с количеством элементов от 10000 до 100000 (шаг равен 10000, всего 10 наборов). Каждый из алгоритмов реализован в Visual Studio на языке C#. Для измерения времени сортировки каждого из массивов использовался класс Stopwatch. Для установления вида функции временной сложности использовался Excel.

### Анализ временной сложности пузырьковой сортировки

Алгоритм пузырьковой сортировки имеет временную сложность  $O(n^2)$ . Описание работы пузырьковой сортировки представлено в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 1 [4], [5].

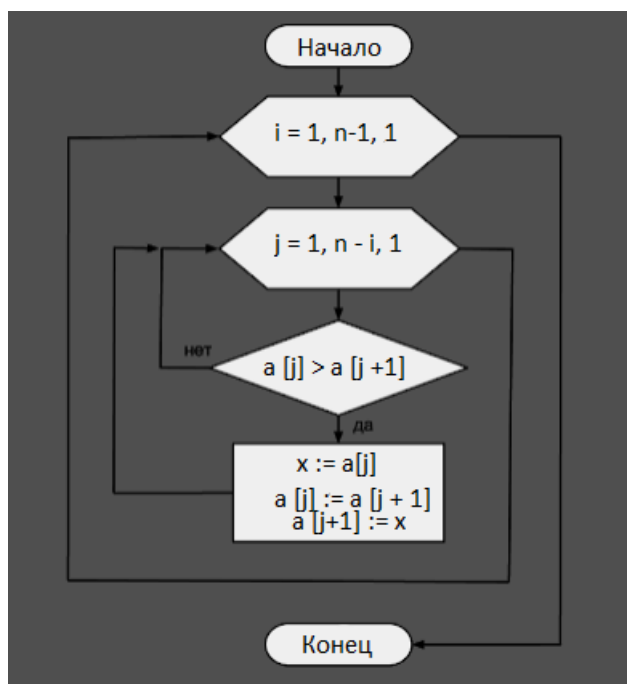


Рис. 1 – Блок-схема пузырьковой сортировки

На рисунке 2 представлено время (практическое) выполнения пузырьковой сортировки для массива с количеством элементов от 10000 до 100000.

|                  |        |           |             |             |        |    |
|------------------|--------|-----------|-------------|-------------|--------|----|
| Время сортировки | 10000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 999    | мс |
| Время сортировки | 20000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 4640   | мс |
| Время сортировки | 30000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 13274  | мс |
| Время сортировки | 40000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 28552  | мс |
| Время сортировки | 50000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 51158  | мс |
| Время сортировки | 60000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 83440  | мс |
| Время сортировки | 70000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 127729 | мс |
| Время сортировки | 80000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 185021 | мс |
| Время сортировки | 90000  | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 258988 | мс |
| Время сортировки | 100000 | элементов | пузырьковым | алгоритмом: | 354071 | мс |

Рис. 2 – Практическое время выполнения пузырьковой сортировки

Данные анализа представлены на рисунке 3.



| ПУЗЫРЬКОВАЯ СОРТИРОВКА                                  |           |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
|---|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| N   | 10000     | 20000    | 30000     | 40000     | 50000     | 60000     | 70000     | 80000     | 90000    | 100000     |
| T <sub>пр</sub>   | 999       | 4640     | 13274     | 28552     | 51158     | 83440     | 127729    | 185021    | 258988   | 354071     |
| T <sub>теор</sub> (N)                                   | 18989,96  | 43602,57 | 68215,182 | 92827,794 | 117440,41 | 142053,02 | 166665,63 | 191278,25 | 215890,9 | 240503,471 |
| (T <sub>пр</sub> - T <sub>теор</sub> (N))^2             | 3,24E+08  | 1,52E+09 | 3,019E+09 | 4,131E+09 | 4,393E+09 | 3,435E+09 | 1,516E+09 | 39153121  | 1,86E+09 | 1,2898E+10 |
| СУММА((T <sub>пр</sub> - T <sub>теор</sub> (N))^2)      | 3,31E+10  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| T <sub>теор</sub> (N*logN)                              | 18781,21  | 41623,48 | 65593,672 | 90296,338 | 115543,67 | 141225,04 | 167267,36 | 193618,69 | 220240,2 | 247101,663 |
| (T <sub>пр</sub> - T <sub>теор</sub> (N*logN))^2        | 3,16E+08  | 1,37E+09 | 2,737E+09 | 3,812E+09 | 4,146E+09 | 3,339E+09 | 1,563E+09 | 73920248  | 1,5E+09  | 1,1442E+10 |
| СУММА((T <sub>пр</sub> - T <sub>теор</sub> (N*logN))^2) | 3,03E+10  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| T <sub>теор</sub> (N^2)                                 | 3133,809  | 12532,24 | 28196,283 | 50125,947 | 78321,23  | 112782,13 | 153508,65 | 200500,79 | 253758,5 | 313281,918 |
| (T <sub>пр</sub> - T <sub>теор</sub> (N^2))^2           | 4557410   | 62287401 | 222674519 | 465435185 | 737841039 | 860960625 | 664590349 | 239623825 | 27347213 | 1663749196 |
| СУММА((T <sub>пр</sub> - T <sub>теор</sub> (N^2))^2)    | 4,95E+09  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N)  | -5622,657 |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N)  | 2,461261  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N*logN)   | -1072,742 |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N * logN)   | 0,149416  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N^2)  | 1         |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N^2)  | 3,13E-05  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |

Рис. 3 – Анализ временной сложности пузырьковой сортировки

На рисунке 3 N – количество элементов массива; T<sub>пр</sub> – практическое время сортировки; T<sub>теор</sub>(N), T<sub>теор</sub>(logN), T<sub>теор</sub>(N<sup>2</sup>) – теоретическое время сортировки для линейного, логарифмического и квадратичного семейств соответственно (T<sub>теор</sub>(N) = A(N) + C(N)\*N, T<sub>теор</sub>(logN) = A(logN) + C(logN)\*N\*logN, T<sub>теор</sub>(N<sup>2</sup>) = A(N<sup>2</sup>) + C(N<sup>2</sup>)\*N<sup>2</sup>); A(N), C(N), A(logN), C(logN), A(N<sup>2</sup>), C(N<sup>2</sup>) – некоторые коэффициенты.

Далее с помощью утилиты «Поиск решения» была найдена минимальная сумма квадрата разности для каждого из семейств. Пример использования «Поиска решения» представлен на рисунке 4. Изменяющиеся ячейки – ячейки с коэффициентами A и C. Ячейка, которую нужно минимизировать – ячейка с суммой квадрата разности практического и теоретического времен.

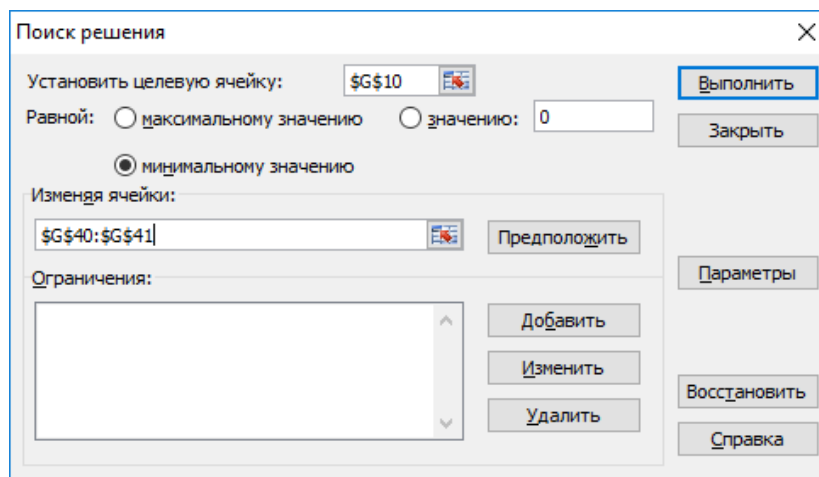


Рис. 4 – Работа с утилитой «Поиск решения»

Как видно из рисунка 3, минимальное значение ( $4,95 \cdot 10^9 < 3,03 \cdot 10^{10} < 3,31 \cdot 10^{10}$ ) имеет сумма для квадратичного семейства. Следовательно, временная сложность пузырьковой сортировки равняется  $O(N^2)$ , что соответствует теории.

#### Анализ временной сложности сортировки вставками

Описание работы сортировки вставками представлено в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 5 [4], [6].

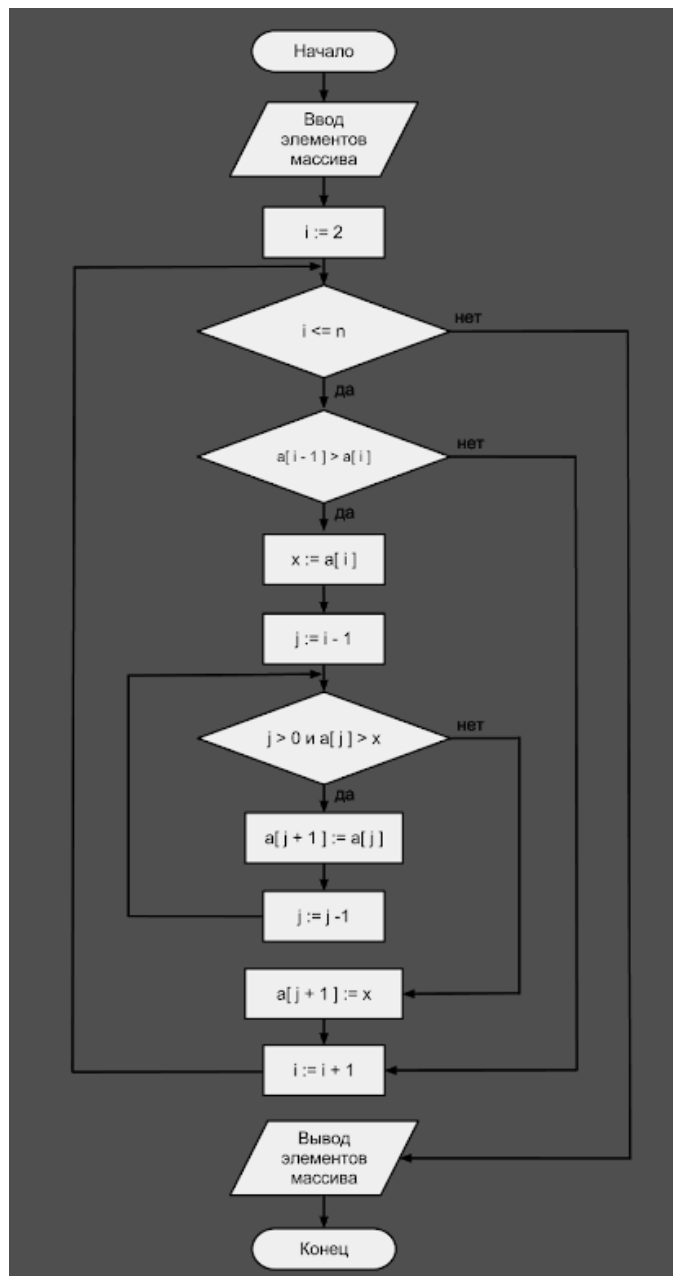


Рис. 5 – Блок-схема сортировки вставками

На рисунке 6 представлено время (практическое) выполнения сортировки вставками для массива с количеством элементов от 10000 до 100000.

|                  |        |           |            |          |       |    |
|------------------|--------|-----------|------------|----------|-------|----|
| Время сортировки | 10000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 164   | мс |
| Время сортировки | 20000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 905   | мс |
| Время сортировки | 30000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 2636  | мс |
| Время сортировки | 40000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 5083  | мс |
| Время сортировки | 50000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 8895  | мс |
| Время сортировки | 60000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 14372 | мс |
| Время сортировки | 70000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 21891 | мс |
| Время сортировки | 80000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 31750 | мс |
| Время сортировки | 90000  | элементов | алгоритмом | вставок: | 44125 | мс |
| Время сортировки | 100000 | элементов | алгоритмом | вставок: | 59889 | мс |

Рис. 6 – Практическое время выполнения сортировки вставками

Данные анализа представлены на рисунке 7.

| СОРТИРОВКА ВСТАВКАМИ                                    |           |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
|---|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| N   | 10000     | 20000    | 30000     | 40000     | 50000     | 60000     | 70000     | 80000     | 90000    | 100000     |
| T <sub>np</sub>   | 164       | 905      | 2636      | 5083      | 8895      | 14372     | 21891     | 31750     | 44125    | 59889      |
| T <sub>теор</sub> (N)                                   | 3143,293  | 7359,328 | 11575,363 | 15791,398 | 20007,433 | 24223,468 | 28439,503 | 32655,538 | 36871,57 | 41087,6077 |
| (T <sub>np</sub> - T <sub>теор</sub> (N))^2             | 8876187   | 41658351 | 79912211  | 114669787 | 123486165 | 97051419  | 42882889  | 819998,67 | 52612207 | 353492353  |
| СУММА((T <sub>np</sub> - T <sub>теор</sub> (N))^2)      | 9,15E+08  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| T <sub>теор</sub> (N*logN)                              | 2417,053  | 6432,115 | 10645,435 | 14987,504 | 19425,311 | 23939,411 | 28516,957 | 33148,817 | 37828,16 | 42549,6963 |
| (T <sub>np</sub> - T <sub>теор</sub> (N*logN))^2        | 5076249   | 30548998 | 64151047  | 98099207  | 110887450 | 91535355  | 43903303  | 1956687,7 | 39650157 | 300651451  |
| СУММА((T <sub>np</sub> - T <sub>теор</sub> (N*logN))^2) | 7,86E+08  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| T <sub>теор</sub> (N^2)                                 | 534,5295  | 2135,118 | 4802,7652 | 8537,4715 | 13339,237 | 19208,061 | 26143,944 | 34146,886 | 43216,89 | 53353,9467 |
| (T <sub>np</sub> - T <sub>теор</sub> (N^2))^2           | 137292,1  | 1513190  | 4694871,5 | 11933373  | 19751240  | 23387484  | 18087532  | 5745062,1 | 824669,5 | 42706921   |
| СУММА((T <sub>np</sub> - T <sub>теор</sub> (N^2))^2)    | 1,29E+08  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N)  | -1072,742 |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N)  | 0,421603  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N*logN)   | -1072,742 |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N * logN)   | 0,026263  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N^2)  | 1         |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N^2)  | 5,34E-06  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |

Рис.7 – Анализ временной сложности сортировки вставками

Как видно из рисунка 7, минимальное значение ( $1,29 * 10^8 < 7,86 * 10^8 < 9,15 * 10^8$ ) имеет сумма для квадратичного семейства. Следовательно, временная сложность сортировки вставками равняется  $O(N^2)$ , что соответствует теории.

#### Анализ временной сложности сортировки слиянием

Описание работы сортировки слиянием представлено в виде блок-схемы, изображенной на рисунках 8 и 9 [7], [8].

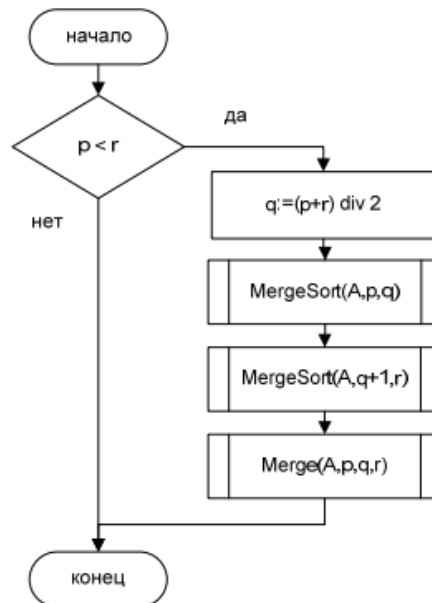


Рис. 8 – Блок-схема сортировки слиянием

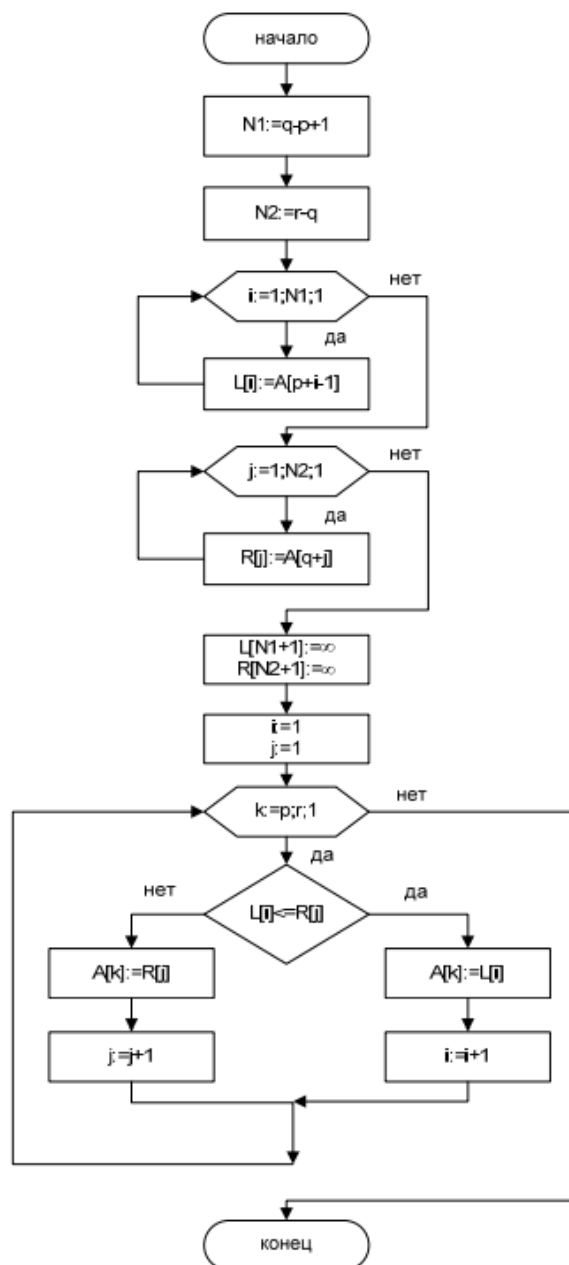


Рис. 9 – Блок-схема слияния подмассивов

На рисунке 10 представлено время (практическое) выполнения сортировки слиянием для массива с количеством элементов от 10000 до 100000.

|                  |        |           |            |          |     |    |
|------------------|--------|-----------|------------|----------|-----|----|
| Время сортировки | 10000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 2   | мс |
| Время сортировки | 20000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 40  | мс |
| Время сортировки | 30000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 50  | мс |
| Время сортировки | 40000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 183 | мс |
| Время сортировки | 50000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 199 | мс |
| Время сортировки | 60000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 217 | мс |
| Время сортировки | 70000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 240 | мс |
| Время сортировки | 80000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 264 | мс |
| Время сортировки | 90000  | элементов | алгоритмом | слияния: | 288 | мс |
| Время сортировки | 100000 | элементов | алгоритмом | слияния: | 315 | мс |

Рис.10 – Практическое время выполнения сортировки слиянием

Данные анализа представлены на рисунке 11.

| СОРТИРОВКА СЛИЯНИЕМ           |           |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
|-------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| N                             | 10000     | 20000    | 30000     | 40000     | 50000     | 60000     | 70000     | 80000     | 90000    | 100000     |
| Тпр                           | 2         | 40       | 50        | 183       | 199       | 217       | 240       | 264       | 288      | 315        |
| Теор(N)                       | 1,999999  | 40,27017 | 78,54035  | 116,81053 | 155,0807  | 193,35088 | 231,62105 | 269,89123 | 308,1614 | 346,431579 |
| (Тпр - Теор(N))^2             | 1E-12     | 0,072994 | 814,55159 | 4381,0465 | 1928,9048 | 559,28102 | 70,206762 | 34,706568 | 406,4822 | 987,944171 |
| СУММА((Тпр - Теор(N))^2)      | 9183,197  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| Теор(N*logN)                  | 26,50213  | 57,94805 | 90,946736 | 124,95379 | 159,71065 | 195,06504 | 230,91633 | 267,19302 | 303,8416 | 340,820623 |
| (Тпр - Теор(N*logN))^2        | 600,3542  | 322,1325 | 1676,6352 | 3369,3631 | 1543,6533 | 481,14259 | 82,513    | 10,19536  | 250,9568 | 666,704561 |
| СУММА((Тпр - Теор(N*logN))^2) | 9003,651  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| Теор(N^2)                     | 4,924762  | 16,69905 | 36,322859 | 63,796195 | 99,119054 | 142,29144 | 193,31335 | 252,18478 | 318,9057 | 393,476216 |
| (Тпр - Теор(N^2))^2           | 8,554234  | 542,9343 | 187,06417 | 14209,547 | 9976,2034 | 5581,3693 | 2179,6437 | 139,59947 | 955,1645 | 6158,51647 |
| СУММА((Тпр - Теор(N^2))^2)    | 39938,6   |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N)                          | -36,27018 |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N)                          | 0,003827  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N*logN)                     | -0,829918 |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N * logN)                   | 0,000206  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| A(N^2)                        | 1         |          |           |           |           |           |           |           |          |            |
| C(N^2)                        | 3,92E-08  |          |           |           |           |           |           |           |          |            |

Рис.11 – Анализ временной сложности сортировки слиянием

Как видно из рисунка 11, минимальное значение ( $9003,651 < 9183,197 < 39938,6$ ) имеет сумма для логарифмического семейства. Следовательно, временная сложность сортировки слиянием равняется  $O(\log N)$ , что соответствует теории.

Получаем, совпадение теоретической временной сложности и временной сложности, вычисленной по методу наименьших квадратов, для каждого из трех алгоритмов (пузырьковая сортировка, сортировка вставками и сортировка слиянием). Таким образом, способ оценки временной сложности алгоритмов с помощью метода наименьших квадратов можно считать корректным.

### Заключение

В данной статье проведена оценка временной сложности алгоритмов сортировки с помощью метода наименьших квадратов, основная идея которого заключается в минимизации суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений зависимой переменной от значений, предсказанных моделью.

### Результаты исследования

В качестве алгоритмов сортировки выбраны пузырьковая сортировка, сортировка вставками и сортировка слиянием. Практическая (время работы алгоритма, затрачиваемое на сортировку определенного количества элемента) и теоретическая (соответствуют функции одного из семейств: линейного, логарифмического и квадратичного) временные сложности совпадают для каждого из выбранных алгоритмов. Следовательно, данный метод оценки можно считать корректным.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Метод наименьших квадратов [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/Q6cgM> (дата обращения: 15.06.2020)
2. Метод наименьших квадратов [Электронный ресурс]. URL: [http://mathprofi.ru/metod\\_naimenshih\\_kvadratov.html](http://mathprofi.ru/metod_naimenshih_kvadratov.html) (дата обращения: 15.06.2020)
3. Падве В. А., Мазуров Б. Т. Метод наименьших квадратов (история и развитие) // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. № 1. С. 150-154
4. Блок схемы алгоритмов [Электронный ресурс]. URL: <https://sites.google.com/site/arraylazarus/scheme> (дата обращения: 15.06.2020)
5. Пузырьковая сортировка [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/Q6chJ> (дата обращения: 15.06.2020)
6. Сортировка вставками [Электронный ресурс]. URL: [http://algotist.ru/sort/insert\\_sort.php](http://algotist.ru/sort/insert_sort.php) (дата обращения: 15.06.2020)
7. Блок-схемы алгоритмов. ГОСТ. Примеры [Электронный ресурс]. URL: [https://pro-prof.com/a\\_rchives/1462](https://pro-prof.com/a_rchives/1462) (дата обращения: 15.06.2020)
8. Сортировка слиянием [Электронный ресурс]. URL: [http://algotist.ru/sort/merge\\_sort.php](http://algotist.ru/sort/merge_sort.php) (дата обращения: 15.06.2020)

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

1. Metod naimen'shih kvadratov [Least-square method] [Electronic resource]. URL: <https://clck.ru/Q6cgM> (accessed: 15.06.2020)
2. Metod naimen'shih kvadratov [Least-square method] [Electronic resource]. URL: [http://mathprofi.ru/metod\\_naimenshih\\_kvadratov.html](http://mathprofi.ru/metod_naimenshih_kvadratov.html) (accessed: 15.06.2020)
3. Padve V. A., Mazurov B. T. Metod naimen'shih kvadratov (istoriya i razvitie) [Least-square method (history and development)] // Interexpo GEO-Siberia. 2017. № 1. pp. 150-154
4. Blok skhemy algoritmov [Block schemes of algorithms] [Electronic resource]. URL: <https://sites.google.com/site/arraylazarus/scheme> (accessed: 15.06.2020)
5. Puzyr'kovaya sortirovka [Bubble sort] [Electronic resource]. URL: <https://clck.ru/Q6chJ> (accessed: 15.06.2020)
6. Sortirovka vstavkami [Insertion sort] [Electronic resource]. URL: [http://algotist.ru/sort/insert\\_sort.php](http://algotist.ru/sort/insert_sort.php) (accessed: 15.06.2020)
7. Blok-skhemu algoritmov. GOST. Primery [Block schemes of algorithms. GOST. Examples] [Electronic resource]. URL: <https://pro-prof.com/archives/1462> (accessed: 15.06.2020)
8. Sortirovka sliyanem [Merge sort] [Electronic resource]. URL: [http://algotist.ru/sort/merge\\_sort.php](http://algotist.ru/sort/merge_sort.php) (accessed: 15.06.2020)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.009>**ОЦЕНКА ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ЯКОБИАНА ДЛЯ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ**

Научная статья

**Зуев А.И.<sup>1,\*</sup>, Аверьянов Д.А.<sup>2</sup>, Антаненков А.А.<sup>3</sup>, Булатов Р.В.<sup>4</sup>, Бурмейстер М.В.<sup>5</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-1853-3222;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-0836-3135;<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-8787-7299;<sup>1, 2, 3, 4</sup> НИУ «МЭИ», Москва, Россия;<sup>5</sup> Научно-технический Центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (zuevali[at]mpei.ru)

**Аннотация**

Исследована оценка вторых производных определителя матрицы Якоби (якобиана) уравнений установившегося режима для сложной электроэнергетической системы, а также произведен анализ их влияния на апериодическую составляющую статической устойчивости энергосистем. Создан автоматизированный алгоритм по вычислению якобиана, также его первых и вторых производных. Показано применение алгоритма на тестовой схеме IEEE-14 для нахождения предельного режима по статической апериодической устойчивости с использованием результатов расчета последовательного утяжеления всех нагрузочных узлов схемы.

**Ключевые слова:** предельный режим, статическая апериодическая устойчивость, установившийся режим, электроэнергетическая система, якобиан, первые и вторые производные якобиана.

**ESTIMATION OF THE SECOND JACOBIAN DERIVATIVES FOR A COMPLEX ELECTRIC POWER SYSTEM AND THEIR INFLUENCE ON STATIC STABILITY**

Research article

**Zuev A.I.<sup>1,\*</sup>, Averyanov D.A.<sup>2</sup>, Antanenkov A.A.<sup>3</sup>, Bulatov R.V.<sup>4</sup>, Burmeister M.V.<sup>5</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-1853-3222;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-0836-3135;<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-8787-7299;<sup>1, 2, 3, 4</sup> NRU "MEI", Moscow, Russia;<sup>5</sup> Scientific and Technical Centre of the Federal Network Company of the Unified energy system, Moscow, Russia

\* Corresponding author (zuevali[at]mpei.ru)

**Abstract**

In this article, the authors study the estimation of the second derivatives of the determinant of the Jacobi matrix (Jacobian) of steady-state equations for a complex electric power system and analyze their influence on the aperiodic component of the static stability of power systems. An automated algorithm for calculating the Jacobian, as well as its first and second derivatives, has been created. The application of the algorithm is shown on the test scheme *IEEE-14* for finding the limit mode for static aperiodic stability using the results of calculating the sequential weighting of all load nodes of the scheme.

**Keywords:** limit mode, static aperiodic stability, steady-state mode, electric power system, Jacobian, the first and the second derivatives of the Jacobian.

**Введение**

В настоящее время проблема поиска области существующих режимов (ОСР) по статической апериодической устойчивости сохраняется. Задача исследования заключается в упрощении поиска ОСР на основе результатов расчета утяжеления нагрузочных узлов и значений контролируемых величин. Это позволит ускорить и упростить работу диспетчеров на подстанциях при оперативном планировании и ведении режима.

Выпущено большое количество научных трудов по использованию якобиана, а также информации о его вторых производных в качестве показателя по оценке статической апериодической устойчивости. Впервые в учебном пособии [1] было описано применение вторых производных якобиана для исследования сходимости метода Ньютона при расчете установившегося режима (УР) энергосистемы. Однако не было предложено компьютеризированного алгоритма, который использовал бы интересующую информацию о якобиане и его вторых производных для оценки апериодической устойчивости. Позднее, в задачнике [2] расчеты УР и последующая оценка апериодической устойчивости ведутся лишь по оценке знака якобиана без использования информации о его вторых производных, что является неполным анализом апериодической устойчивости. В диссертации [3] введено понятие «обобщенные показатели» для оценки апериодической устойчивости. В качестве них автором были взяты вторые производные потерь активной мощности и вторые производные якобиана. В работе был разработан компьютеризированный алгоритм с использованием данных обобщенных показателей, который был успешно апробирован на диспетчерских пунктах Амурской энергосистемы. Однако с течением времени, данный алгоритм устарел, в связи с чем появляется необходимость обновления программного обеспечения (ПО). Обзор зарубежных монографий [4], [7], [8] по рассматриваемой теме показал, что исследования с использованием информации о якобиане энергосистемы ведутся до сих пор, но работ с использованием вторых производных не было найдено, что подтверждает актуальность данного исследования.

### Формирование алгоритма

В работе [3] уже было рассмотрено влияние обобщенных параметров на задачи управления установившегося режима, в том числе якобиана, его первых и вторых производных. Автор рассматривает влияние этих величин для случая простейшей системы «генератор – шины бесконечной мощности» при утяжелении нагрузки. В результате расчета были получены следующие характеристики (рисунок 1).

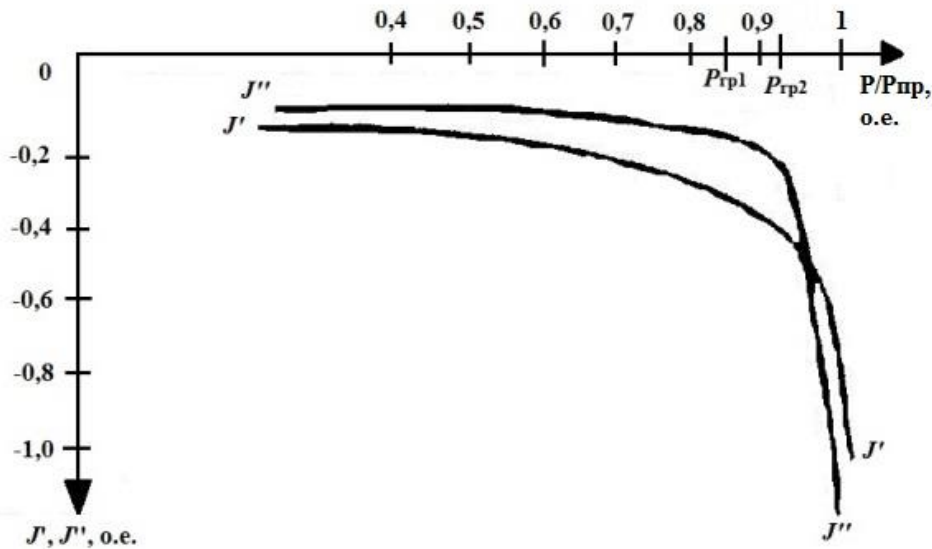


Рис. 1 – Зависимость первых  $J'$  и вторых производных якобиана  $J''$  при утяжелении нагрузки для случая простейшей схемы «генератор – шины бесконечной мощности»

Из данного графика можно сделать следующие выводы [3]: при увеличении мощности нагрузки  $P$  наблюдается незначительное уменьшение значения вторых производных якобиана  $J''$ . Однако, при приближении к области предельных режимов даже небольшое увеличение  $P$  приводит к значительному увеличению  $J''$ . Таким образом, такое распределение нагрузок, а соответственно и УР, при котором  $J''_{(i-1)} < 0$ , а  $J''_{(i)} \ll J''_{(i-1)}$ , является претендентом на существование предельного режима по аperiodической статической устойчивости. В этом случае принимается, что УР, рассчитанный на  $i$ -ой итерации, является предельным режимом по аperiodической статической устойчивости. Граничная точка между областями с незначительным и интенсивным увеличением второй производной якобиана по модулю может служить характеристикой, определяющей приближение режима к области существующих режимов, что наглядно продемонстрировано в рамках данной исследовательской работы.

Также следует упомянуть о том, что внутри заведомо устойчивых режимов значение якобиана  $J$  имеет выпуклость сверху, поскольку в этом случае  $J'' < 0$ . По концам рассматриваемого интервала утяжеления  $J'' \rightarrow -\infty$ , при этом  $J$  имеет точки перегиба в виде выпуклости при приближении к ОСР.

Ниже представлен план разработки алгоритма для оценки якобиана и его вторых производных при утяжелении нагрузочных узлов.

Алгоритм выполнения этой задачи выглядит следующим образом [9]:

1. Загрузка исходных данных в *RastrWin3* и их вывод в отчет, обработка исходных данных, подготовка к расчёту.

Исходные данные загружаются в программно-вычислительный комплекс (ПВК) *RastrWin3* либо в формате *.rg2*, либо импортируются из других форматов, например, – *.cdu*. Поэтому для корректной работы алгоритма параметры схемы необходимо представить именно в таком виде.

2. Расчет режима при представлении нагрузки постоянным отбором мощности и вывод значения якобиана, рассчитанного на каждой итерации. в отчет.

Перед расчётом режима в ПВК *RastrWin3* необходимо задать все нагрузки и генерацию исходной схемы. Для этого в алгоритме применяется встроенная утилита *RastrWin3* под названием «групповая коррекция» [10].

При расчётах рабочих режимов электрических сетей нагрузка обычно характеризуется неизменными активной и реактивной мощностями  $P, Q = const$ . Такое представление нагрузки соответствует замене действительных характеристик нагрузки условными. Эти изменения обычно соответствуют условиям, принимаемым при проектных расчетах электрических сетей [2, 11] и приемлемо при расчетах УР.

3. Поочередное утяжеление каждого нагрузочного узла схемы, вывод результатов утяжеления в файл.

Утяжеление реализовано в виде цикла, на каждом шаге которого производится расчет установившегося режима. По результатам каждого шага цикла утяжеления в отчет выводятся контролируемые величины.

Согласно методическим указаниям по расчёту устойчивости энергосистем [12], критерием достижения предельного режима является расхождение расчёта режима или снижение напряжения менее чем на  $0,7U_{ном}$ . Также в качестве дополнительного критерия окончания расчетов утяжеления принимается превышение количества максимальных итераций на шаге расчёта, равных десяти, так как среднее количество итераций при расчётах УР в ПВК.

По результатам расчёта в  $i$ -ом узле при достижении предельного режима производится возврат исходных значений нагрузок во всех нагрузочных узлах для дальнейшего расчёта утяжеления в  $(i+1)$ -ом узле.

В отчет выводятся значения якобиана  $J$  для каждого значения нагрузки в узле. По полученным значениям якобиана далее производится расчёт  $J'$  и  $J''$  и построение необходимых графиков.



Расчет первых и вторых производных якобиана нагляднее можно проиллюстрировать с помощью примера. Пусть в результате расчета утяжеления режима для абстрактного узла 1 были получены следующие значения:

$$J_1 = J(P_{H1} = 19,9 \text{ МВт}) = 8,36 \cdot 10^{67}, J_2 = J(P_{H2} = 24,9 \text{ МВт}) = 7,93 \cdot 10^{67} \quad (1)$$

$$\Delta P = P_{H2} - P_{H1} = 24,9 - 19,9 = 5 \text{ МВт} \quad (2)$$

Тогда первые и вторые производные якобиана приближенно будут определяться следующим образом:

$$J_1' = \frac{J_1}{\Delta P} = \frac{8,36 \cdot 10^{67}}{5 \text{ МВт}} = 1,672 \cdot 10^{67} \text{ МВт}^{-1} \quad (3)$$

$$J_2' = \frac{J_2}{\Delta P} = \frac{7,93 \cdot 10^{67}}{5 \text{ МВт}} = 1,586 \cdot 10^{67} \text{ МВт}^{-1} \quad (4)$$

$$J_2'' = \frac{J_1' - J_2'}{\Delta P} = \frac{1,672 \cdot 10^{67} \text{ МВт}^{-1} - 1,586 \cdot 10^{67} \text{ МВт}^{-1}}{5 \text{ МВт}} = 1,72 \cdot 10^{65} \text{ МВт}^{-2} \quad (5)$$

#### 4. Извещение о завершении расчёта в окне консоли *RastrWin3*.

Для того чтобы пользователь смог отслеживать процесс работы алгоритма, после каждого выполненного пункта в окне консоли выдается сообщение об удачном завершении этапа расчета.

#### 5. Оформление отчета в *Microsoft Excel*, построение необходимых графиков.

Задача алгоритма для *Microsoft Excel* состоит в расчёте  $J'$  и  $J''$  и построении графиков  $J(\Pi)$  и  $J''(\Pi)$ , а также придании лаконичного и наглядного вида результатам расчёта. Для каждого нагрузочного узла должны быть получены 2 графика.

На рисунке 2 представлена блок-схема разрабатываемого алгоритма.



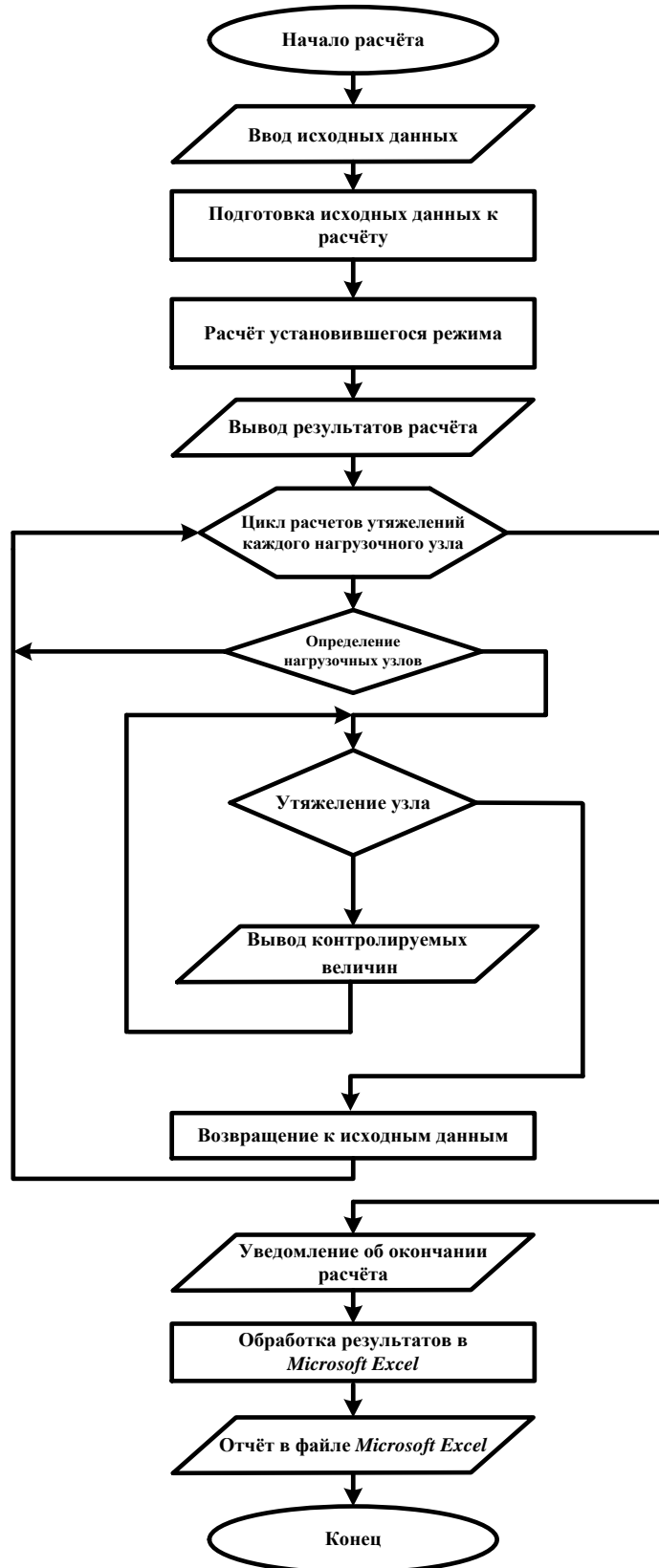
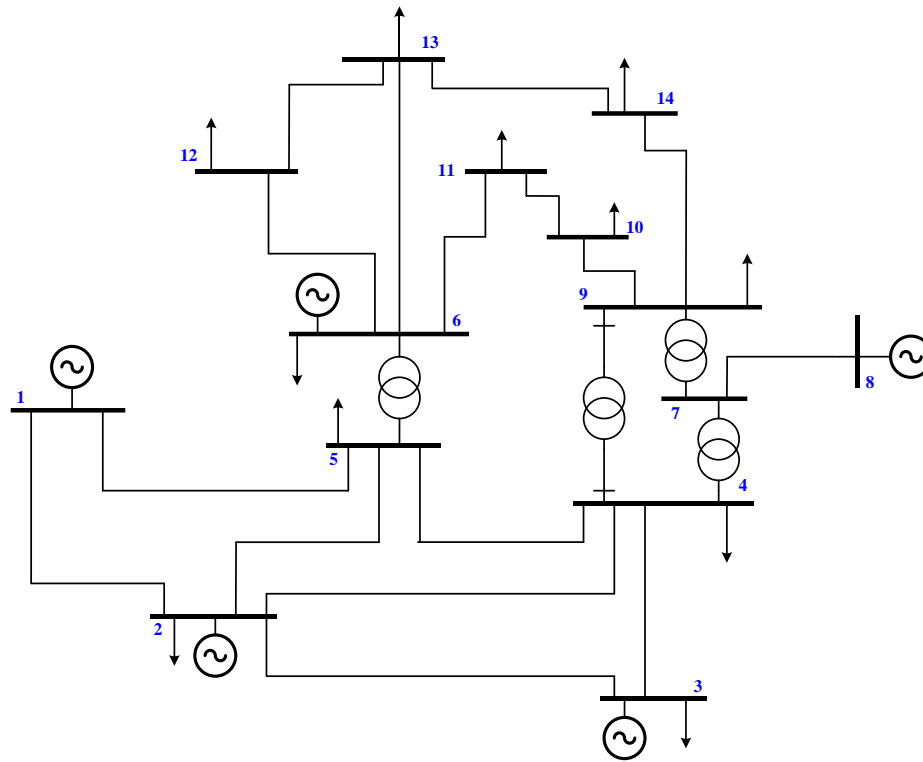


Рис. 2 – Блок-схема разрабатываемого алгоритма

**Апробация алгоритма на тестовой схеме IEEE-14**

В качестве проверки работоспособности созданного алгоритма необходимо апробировать его на тестовой схеме. Тестовые схемы – это ряд стандартных схем различных электрических сетей, составленный в ходе получения опыта эксплуатации и управления в электроэнергетике, используемый для решения научных и инженерных задач, таких как: расчеты УР, моделирование переходных процессов, расчеты надежности электроснабжения, оптимизация режимов энергосистем и др. В общем случае позволяют протестировать предлагаемые решения на схемах близких к реальным и обеспечить повторяемость результатов исследований. В качестве тестовой схемы выбрана схема *IEEE-14* (рисунок 3) [13]. Схема отображает часть среднезападной системы США от февраля 1962 года и была составлена в качестве испытательной в 1993 году. Схема включает в себя 14 узлов, из которых в 5 узлах действуют синхронные машины и в 11 сконцентрированы потребители электроэнергии.

Рис. 3 – Тестовая схема *IEEE-14* [9]

В таблице 1 представлены исходные данные для узлов схемы, а в таблице 2 – по ветвям [14].

Таблица 1 – Исходные данные по узлам схемы *IEEE-14*

| Узел | Тип  | $U_{\text{ном}}$ , кВ | $B_{\text{ш}}$ , мСм | Напряжение |               | $P_{\text{н}}$ , МВт | $Q_{\text{н}}$ , Мвар | $P_{\text{г}}$ , МВт | $Q_{\text{г}}$ , Мвар | $Q_{\text{min}}$ , Мвар | $Q_{\text{max}}$ , Мвар |
|------|------|-----------------------|----------------------|------------|---------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
|      |      |                       |                      | $U$ , кВ   | $\phi$ , град |                      |                       |                      |                       |                         |                         |
| 1    | База | 230                   | -                    | 243,8      | 0             | -                    | -                     | 232,3                | -16,8                 | -                       | -                       |
| 2    | Ген  | 230                   | -                    | 240,35     | -4,983        | 21,7                 | 12,7                  | 40                   | 43,446                | -40                     | 50                      |
| 3    | Ген  | 230                   | -                    | 232,3      | -12,725       | 94,2                 | 19                    | 0,001                | 25,022                | -                       | 40                      |
| 4    | Нагр | 230                   | -                    | 234,064    | -10,313       | 47,8                 | -3,9                  | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 5    | Нагр | 230                   | -                    | 234,488    | -8,774        | 7,6                  | 1,6                   | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 6    | Ген  | 115                   | -                    | 123,050    | -14,221       | 11,2                 | 7,5                   | 0,001                | 12,737                | -6                      | 24                      |
| 7    | Нагр | 115                   | -                    | 122,075    | -13,36        | -                    | -                     | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 8    | Ген  | 115                   | -                    | 125,35     | -13,36        | -                    | -                     | 0,001                | 17,664                | -6                      | 24                      |
| 9    | Нагр | 115                   | 1,4367               | 121,432    | -14,939       | 29,5                 | 16,6                  | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 10   | Нагр | 115                   | -                    | 120,483    | -15,097       | 9                    | 5,8                   | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 11   | Нагр | 115                   | -                    | 121,544    | -14,791       | 3,5                  | 1,8                   | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 12   | Нагр | 115                   | -                    | 121,347    | -15,076       | 6,1                  | 1,6                   | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 13   | Нагр | 115                   | -                    | 120,794    | -15,156       | 13,5                 | 5,8                   | -                    | -                     | -                       | -                       |
| 14   | Нагр | 115                   | -                    | 119,086    | -16,034       | 14,9                 | 5                     | -                    | -                     | -                       | -                       |

Таблица 2 – Исходные данные по ветвям схемы *IEEE-14*

| № нач. | № кон. | $R$ , Ом | $X$ , Ом | $B_{\text{ш}}$ , мСм | $k_{\text{гр}}$ |
|--------|--------|----------|----------|----------------------|-----------------|
| 1      | 2      | 10,2520  | 31,3010  | 0,0998               | -               |
| 1      | 5      | 28,5819  | 117,9882 | 0,0993               | -               |
| 2      | 3      | 24,8577  | 104,7261 | 0,0828               | -               |
| 2      | 4      | 30,7402  | 93,2733  | 0,0643               | -               |
| 2      | 5      | 30,1266  | 91,9825  | 0,0654               | -               |
| 3      | 4      | 35,4483  | 90,4749  | 0,0242               | -               |
| 4      | 5      | 7,0622   | 22,2762  | -                    | -               |
| 4      | 7      | 0,0001   | 105,8105 | -                    | 0,511           |
| 4      | 9      | 0,0001   | 276,2604 | -                    | 0,516           |
| 5      | 6      | 0,0001   | 115,8037 | -                    | 0,536           |
| 6      | 11     | 12,5611  | 26,3045  | -                    | -               |
| 6      | 12     | 16,2548  | 33,8309  | -                    | -               |
| 6      | 13     | 8,7483   | 17,2282  | -                    | -               |

Окончание таблицы 2 – Исходные данные по ветвям схемы IEEE-14

| № нач. | № кон. | R, Ом   | X, Ом   | B <sub>ш</sub> , мСм | k <sub>тр</sub> |
|--------|--------|---------|---------|----------------------|-----------------|
| 7      | 8      | 0,0001  | 23,2958 | -                    | -               |
| 7      | 9      | 0,0001  | 14,5488 | -                    | -               |
| 9      | 10     | 4,2069  | 11,1751 | -                    | -               |
| 9      | 14     | 16,8103 | 35,7578 | -                    | -               |
| 10     | 11     | 10,8511 | 25,4013 | -                    | -               |
| 12     | 13     | 29,2167 | 26,4341 | -                    | -               |
| 13     | 14     | 22,6055 | 46,0256 | -                    | -               |

Параметры данной схемы перенесены в соответствующие графы таблиц «Узлы» и «Ветви» в ПВК *RastrWin3*. Результаты расчета УР для схемы IEEE-14 с использованием алгоритма приведены в таблицах 3 – 4.

Таблица 3 – Результаты расчёта УР для схемы IEEE-14. Данные по узлам

| Номер узла | Название узла | P <sub>нагр</sub> , МВт | Q <sub>нагр</sub> , Мвар | P <sub>ген</sub> , МВт | Q <sub>ген</sub> , Мвар | U <sub>узел</sub> , кВ | Фаза, град |
|------------|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------|
| 1          | Узел 1        | 0                       | 0                        | 232,383                | -16,777                 | 243,8                  | 0          |
| 2          | Узел 2        | 21,7                    | 12,7                     | 40                     | 43,446                  | 240,35                 | -0,087     |
| 3          | Узел 3 (СК)   | 94,2                    | 19                       | 0,001                  | 25,022                  | 232,3                  | -0,222     |
| 4          | Узел 4        | 47,8                    | -3,9                     | 0                      | 0                       | 234,085                | -0,180     |
| 5          | Узел 5        | 7,6                     | 1,6                      | 0                      | 0                       | 234,510                | -0,153     |
| 6          | Узел 6 (СК)   | 11,2                    | 7,5                      | 0,001                  | 12,737                  | 123,05                 | -0,248     |
| 7          | Узел 7        | 0                       | 0                        | 0                      | 0                       | 122,067                | -0,233     |
| 8          | Узел 8 (СК)   | 0                       | 0                        | 0,001                  | 17,664                  | 125,35                 | -0,233     |
| 9          | Узел 9        | 29,5                    | 16,6                     | 0                      | 0                       | 121,416                | -0,261     |
| 10         | Узел 10       | 9                       | 5,8                      | 0                      | 0                       | 120,850                | -0,263     |
| 11         | Узел 11       | 3,5                     | 1,8                      | 0                      | 0                       | 121,538                | -0,258     |
| 12         | Узел 12       | 6,1                     | 1,6                      | 0                      | 0                       | 121,345                | -0,263     |
| 13         | Узел 13       | 13,5                    | 5,8                      | 0                      | 0                       | 120,792                | -0,265     |
| 14         | Узел 14       | 14,9                    | 5                        | 0                      | 0                       | 119,076                | -0,280     |

Таблица 4 – Результаты расчёта УР для схемы IEEE-14. Данные по ветвям

| № нач. | № кон. | S <sub>нач</sub> , МВ·А | S <sub>кон</sub> , МВ·А | ΔP, МВт | ΔQ, Мвар |
|--------|--------|-------------------------|-------------------------|---------|----------|
| 1      | 2      | 156,9-j20,4             | 152,6-j27,7             | 4,297   | 13,119   |
| 1      | 5      | 75,5+j3,6               | 72,8-j2,1               | 2,763   | 11,405   |
| 2      | 3      | 73,2+j3,6               | 70,9-j1,6               | 2,323   | 9,786    |
| 2      | 4      | 56,1-j1,6               | 54,5-j3,1               | 1,677   | 5,087    |
| 2      | 5      | 41,5+j1,1               | 40,6+j2                 | 0,904   | 2,759    |
| 3      | 4      | 23,3-j4,4               | 23,7-j4,8               | 0,373   | 0,953    |
| 4      | 5      | 61,2-j15,8              | 61,7-j14,2              | 0,514   | 1,622    |
| 4      | 7      | 28,1-j9,6               | 28,1-j11,3              | 0       | 1,699    |
| 4      | 9      | 16,1-j0,4               | 16,1-j1,7               | 0       | 1,303    |
| 5      | 6      | 44,1+j12,5              | 44,1+j8,1               | 0       | 4,424    |
| 6      | 11     | 7,4+j3,6                | 7,3+j3,5                | 0,056   | 0,116    |
| 6      | 12     | 7,8+j2,5                | 7,7+j2,4                | 0,072   | 0,150    |
| 6      | 13     | 17,7+j7,2               | 17,5+j6,8               | 0,212   | 0,418    |
| 7      | 8      | +j17,2                  | +j17,7                  | 0       | 0,463    |
| 7      | 9      | 28,1+j5,8               | 28,1+j5                 | 0       | 0,802    |
| 9      | 10     | 5,2+j4,2                | 5,2+j4,2                | 0,013   | 0,034    |
| 9      | 14     | 9,4+j3,6                | 9,3+j3,3                | 0,116   | 0,247    |
| 10     | 11     | 3,8+j1,6                | 3,8+j1,7                | 0,013   | 0,030    |
| 12     | 13     | 1,6+j0,8                | 1,6+j0,8                | 0,006   | 0,006    |
| 13     | 14     | 5,6+j1,8                | 5,6+j1,7                | 0,054   | 0,110    |

В качестве доказательства исправности работы написанного алгоритма представлено утяжеление узлов 12 (табл. 5 и рис. 4) и 13 (табл. 6 и рис. 5) тестовой схемы, а также проведен анализ полученных результатов.

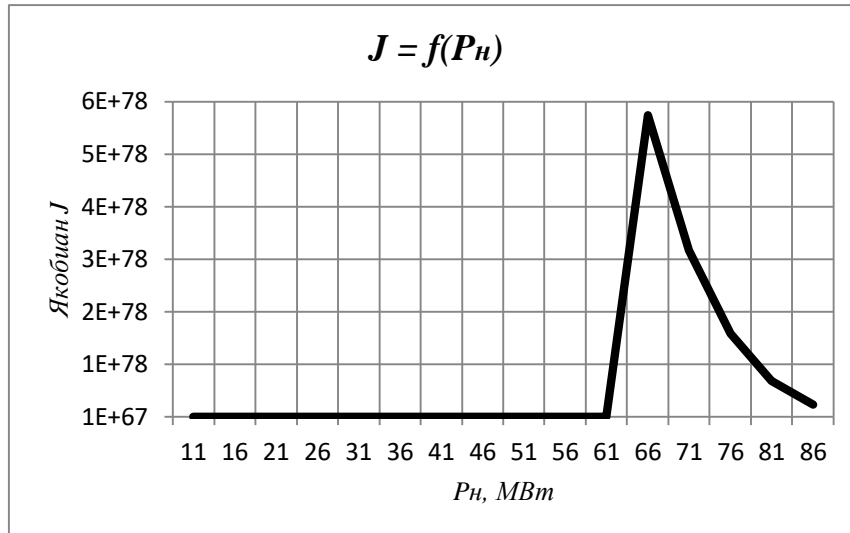
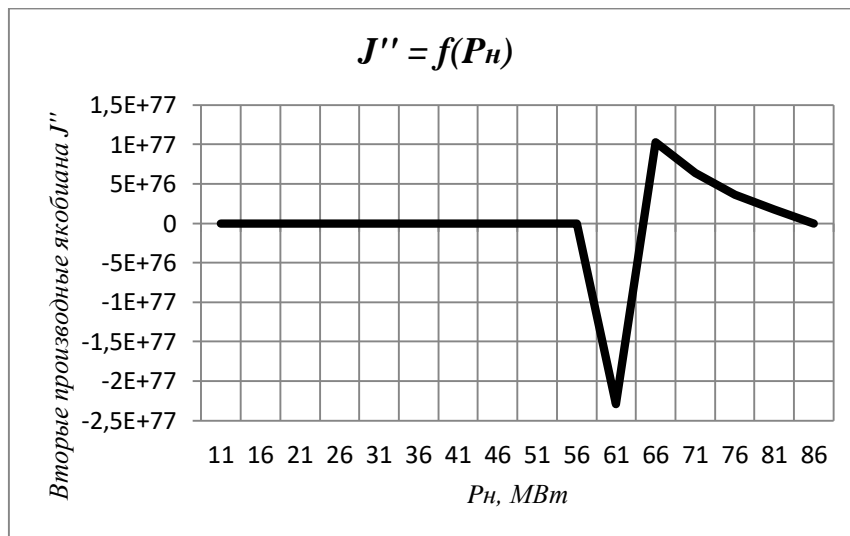
Таблица 5 – Результаты расчёта утяжеления для узла 12

| P <sub>в</sub> , МВт | U, кВ   | Фаза, град | S <sub>нач</sub> , МВ·А | S <sub>кон</sub> , МВ·А | ΔP, МВт | J         | J'        | J''        |
|----------------------|---------|------------|-------------------------|-------------------------|---------|-----------|-----------|------------|
| 11                   | 120,836 | -0,281     | 10,7+j3                 | 10,6+j2,7               | 13,988  | 8,537E+67 | 1,707E+67 | 1,023E+65  |
| 16                   | 120,314 | -0,299     | 13,7+j3,6               | 13,4+j3,1               | 14,653  | 8,281E+67 | 1,656E+67 | 1,045E+65  |
| 21                   | 119,783 | -0,317     | 16,6+j4,1               | 16,3+j3,5               | 15,390  | 8,020E+67 | 1,604E+67 | 1,064E+65  |
| 26                   | 119,240 | -0,335     | 19,6+j4,8               | 19,2+j3,9               | 16,200  | 7,754E+67 | 1,551E+67 | -9,367E+69 |
| 31                   | 118,686 | -0,354     | 22,6+j5,5               | 22+j4,3                 | 17,086  | 2,342E+71 | 4,685E+70 | 4,104E+68  |
| 36                   | 118,120 | -0,373     | 25,6+j6,2               | 24,9+j4,7               | 18,051  | 2,240E+71 | 4,480E+70 | -4,103E+72 |
| 41                   | 117,043 | -0,393     | 28,7+j6,9               | 27,7+j5                 | 19,122  | 1,028E+74 | 2,056E+73 | 6,837E+71  |
| 46                   | 115,833 | -0,413     | 31,7+j7,7               | 30,6+j5,3               | 20,300  | 8,572E+73 | 1,714E+73 | 6,151E+71  |
| 51                   | 114,550 | -0,435     | 34,8+j8,6               | 33,4+j5,6               | 21,591  | 7,034E+73 | 1,407E+73 | 5,460E+71  |

Окончание таблицы 5 – Результаты расчёта утяжеления для узла 12

| $P_n$ ,<br>МВт | $U$ , кВ | Фаза,<br>град | $S_{нач}$ , МВ·А | $S_{кон}$ , МВ·А | $\Delta P$ ,<br>МВт | $J$       | $J'$      | $J''$      |
|----------------|----------|---------------|------------------|------------------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| 56             | 113,183  | -0,456        | 37,9+j9,5        | 36,2+j5,9        | 23,006              | 5,669E+73 | 1,134E+73 | 4,773E+71  |
| 61             | 111,723  | -0,479        | 41,1+j10,5       | 39+j6,3          | 24,560              | 4,476E+73 | 8,952E+72 | -2,295E+77 |
| 66             | 109,674  | -0,505        | 44,3+j11,7       | 41,9+j6,6        | 26,368              | 5,739E+78 | 1,148E+78 | 1,028E+77  |
| 71             | 107,267  | -0,534        | 47,6+j12,9       | 44,7+j6,9        | 28,434              | 3,168E+78 | 6,337E+77 | 6,348E+76  |
| 76             | 104,542  | -0,566        | 50,9+j14,4       | 47,5+j7,2        | 30,819              | 1,581E+78 | 3,163E+77 | 3,596E+76  |
| 81             | 101,375  | -0,602        | 54,4+j16,1       | 50,3+j7,6        | 33,635              | 6,824E+77 | 1,365E+77 | 1,792E+76  |
| 86             | 97,547   | -0,644        | 57,9+j18,1       | 53+j7,9          | 37,084              | 2,344E+77 | 4,689E+76 | —          |

Режим разошёлся

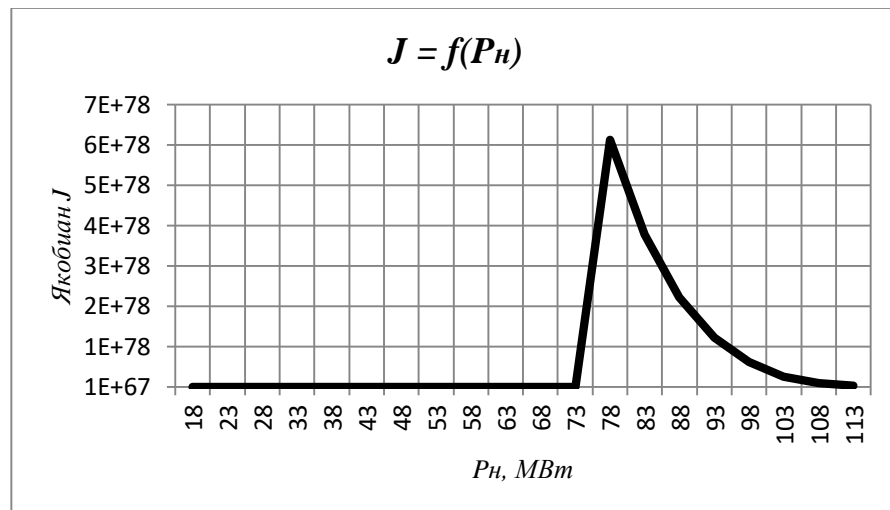
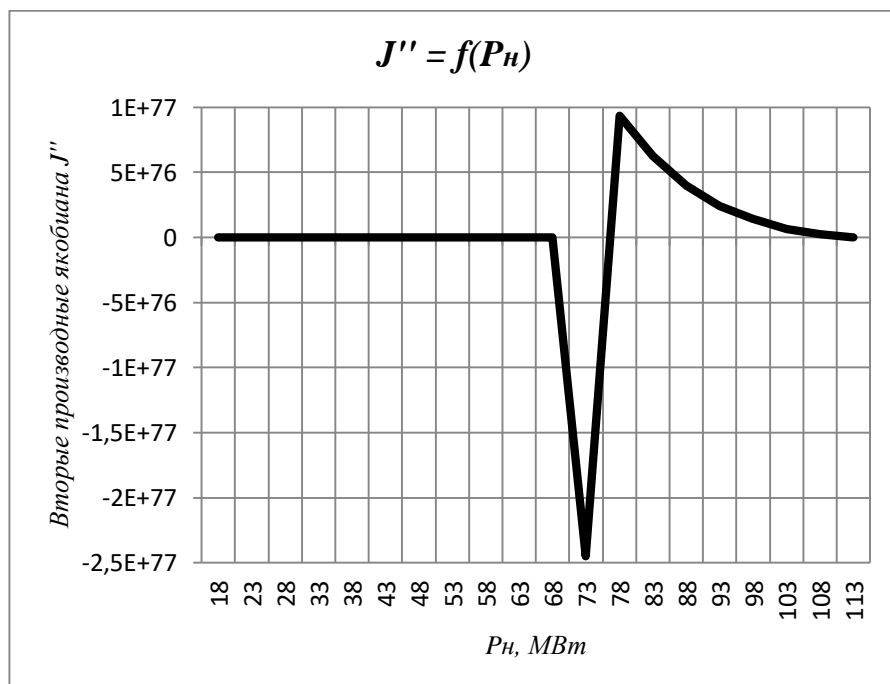
Рис. 4 – График  $J(P_n)$  для узла 12Рис. 5 – График  $J''(P_n)$  для узла 12

По представленным таблицам и зависимостям видно, что наблюдается увеличение значений  $J''$  по модулю на 5 порядков при приближении к  $P_n = 26$  МВт затем их снижение на порядок при  $P_n = (26 \div 31)$  МВт. После происходит увеличение значений  $J''$  по модулю на 4 порядка и их постепенное снижение при  $P_n = (36 \div 56)$  МВт. Однако, начиная с  $P_n = 61$  МВт, наблюдается резкое увеличение  $J''$  по модулю сразу на 6 порядков, а затем их постепенное снижение. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при достижении  $P_n = 61$  МВт, ЭЭС находится в околопредельном режиме по статической аperiodической устойчивости [3].

Экстремумы, получаемые при построении зависимостей, свидетельствуют о том, что при достижении  $P_n = 61$  МВт ЭЭС выходит на верхний предел по реактивной мощности в генераторных узлах  $Q_{max}$ . В этом случае в ПБК *RastrWin3* используется модель генератора  $P_G, Q_G = const$  при наступлении ограничения по реактивной мощности с одновременным расчетом якобиана по установившейся форме, то есть при моделировании  $P_G, U_G = const$ .

Таблица 6 – Результаты расчета утяжеления для узла 13

| $P_n$ ,<br>МВт  | $U$ , кВ | Фаза,<br>град | $S_{нач}$ , МВ·А | $S_{кон}$ , МВ·А | $\Delta P$ ,<br>МВт | $J$       | $J'$      | $J''$      |
|-----------------|----------|---------------|------------------|------------------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| 18              | 120,527  | -0,279        | 20,9+j7,6        | 20,6+j7          | 14,005              | 8,550E+67 | 1,710E+67 | 9,618E+64  |
| 23              | 120,257  | -0,294        | 24+j8            | 23,6+j7,3        | 14,663              | 8,309E+67 | 1,662E+67 | 9,728E+64  |
| 28              | 119,982  | -0,309        | 27,2+j8,4        | 26,7+j7,5        | 15,365              | 8,066E+67 | 1,613E+67 | 9,821E+64  |
| 33              | 119,704  | -0,324        | 30,3+j8,9        | 29,8+j7,7        | 16,112              | 7,820E+67 | 1,564E+67 | -9,474E+69 |
| 38              | 119,419  | -0,340        | 33,5+j9,4        | 32,8+j8          | 16,905              | 2,369E+71 | 4,739E+70 | 3,783E+68  |
| 43              | 119,131  | -0,355        | 36,7+j9,9        | 35,9+j8,3        | 17,746              | 2,275E+71 | 4,550E+70 | 3,767E+68  |
| 48              | 118,838  | -0,370        | 39,9+j10,5       | 39+j8,6          | 18,636              | 2,181E+71 | 4,361E+70 | -3,931E+72 |
| 53              | 117,975  | -0,387        | 43,1+j10,8       | 42+j8,5          | 19,605              | 9,850E+73 | 1,970E+73 | 5,758E+71  |
| 58              | 117,175  | -0,403        | 46,3+j11,2       | 44,9+j8,6        | 20,632              | 8,410E+73 | 1,682E+73 | 5,311E+71  |
| 63              | 116,319  | -0,421        | 49,5+j11,6       | 48+j8,6          | 21,730              | 7,082E+73 | 1,416E+73 | 4,691E+71  |
| 68              | 115,430  | -0,438        | 52,7+j12,1       | 50,9+j8,6        | 22,897              | 5,910E+73 | 1,182E+73 | 4,155E+71  |
| 73              | 114,493  | -0,456        | 55,9+j12,6       | 53,9+j8,6        | 24,140              | 4,871E+73 | 9,742E+72 | -2,449E+77 |
| 78              | 112,855  | -0,477        | 59,2+j13,3       | 56,9+j8,8        | 25,584              | 6,124E+78 | 1,225E+78 | 9,363E+76  |
| 83              | 111,222  | -0,498        | 62,5+j14         | 60+j8,9          | 27,131              | 3,783E+78 | 7,566E+77 | 6,257E+76  |
| 88              | 109,446  | -0,522        | 65,9+j14,8       | 62,9+j8,9        | 28,831              | 2,219E+78 | 4,437E+77 | 4,008E+76  |
| 93              | 107,490  | -0,546        | 69,3+j15,6       | 65,9+j9          | 30,716              | 1,217E+78 | 2,434E+77 | 2,418E+76  |
| 98              | 105,309  | -0,573        | 72,7+j16,6       | 68,9+j9,1        | 32,829              | 6,123E+77 | 1,225E+77 | 1,439E+76  |
| 103             | 102,625  | -0,605        | 76,3+j17,7       | 71,9+j9,1        | 35,387              | 2,526E+77 | 5,051E+76 | 6,544E+75  |
| 108             | 99,558   | -0,641        | 79,9+j19,1       | 74,9+j9,2        | 38,342              | 8,898E+76 | 1,780E+76 | 2,674E+75  |
| 113             | 95,693   | -0,684        | 83,6+j20,7       | 77,7+j9,2        | 42,056              | 2,213E+76 | 4,426E+75 | –          |
| Режим разошёлся |          |               |                  |                  |                     |           |           |            |

Рис. 6 – График  $J(P_n)$  для узла 13Рис. 7 – Графики  $J''(P_n)$  для узла 13

По аналогии с предыдущим анализом установлено, что при достижении  $P_n = 73$  МВт, ЭЭС находится в околопредельном режиме по статической аperiodической устойчивости.

### Результаты

В ходе проведенного исследования был разработан алгоритм для нахождения якобиана, его первых и вторых производных на современном ПВК *RastrWin3* с последующей доработкой отчета в *Microsoft Excel*. Он был апробирован на тестовой схеме энергосистемы, что свидетельствует об адекватности результатов исследования. В ходе проведенного анализа были получены значения околопредельной мощности нагрузки по статической аperiodической устойчивости для двух произвольных узлов рассматриваемой энергосистемы.

### Заключение

Установлена важность применения таких обобщенных показателей режима, как якобиан, его первые и вторые производные с точки зрения определения границы области допустимых режимов электроэнергетической системы.

Разработан алгоритм для нахождения обобщенных показателей якобиана, его первых и вторых производных, успешно реализованный на современном программно-вычислительном комплексе *RastrWin3* с последующей доработкой отчета в *Microsoft Excel*.

Успешная апробация алгоритма на тестовой схеме *IEEE-14* позволила сделать важные выводы касательно рассматриваемых в данной работе обобщенных показателей, а именно:

- при некотором установившемся режиме, который находится достаточно далеко от предела по статической устойчивости, якобиан и его вторые производные меняются достаточно незначительно;
- при приближении к пределу по статической аperiodической устойчивости вторые производные якобиана резко возрастают по абсолютной величине;
- крайняя точка между областями с незначительным и интенсивным увеличением второй производной якобиана по модулю может служить характеристикой, определяющей приближение режима к области существующих режимов.

### Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность д.т.н., проф., Чемборисовой Н.Ш. в подготовке и сопровождении работы по данному исследованию.

### Acknowledgement

The authors are sincerely grateful to PhD in Engineering, Professor Chemborisova N. Sh. in preparation and maintenance of work on this study.

### Конфликт интересов

Не указан

### Conflict of Interest

None declared

### Список литературы / References

1. Идельчик В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем, М.: Энергия, 1977. – 192 с.
2. Ежков В. В. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / В. В. Ежков, Г. К. Зарудский, Э. Н. Зуев и др. – Москва, Высшая школа, 1999. – 352 с.
3. Чемборисова Н. Ш. Обобщенные показатели в задачах управления установившимися режимами в расчетах электроэнергетических систем, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук – Иркутск, 2004.
4. Jerosolimski M. A new method for fast calculation of Jacobian matrices: automatic differentiation for power system simulation / Jerosolimski M., Levacher L. // IEEE Transactions on Power Systems, 9(2), pp. 700-706, 1994.
5. Zhang Y. P. Research on the relationship of the singular point for load flow jacobian matrix and the critical point of voltage collapse / Zhang Y. P., Huang W., Liu Z. Q., Yang J. Y., Cai X. L., Zhang J. H. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.
6. Naik S. D. On critical mode of bifurcation point and loadability in shunt compensated multi-bus power system / Naik S. D., Khedkar M. K., Bhat S. S. // International Conference on Power and Energy Systems, 2011.
7. Raja Masood Larik A statistical jacobian application for power system optimization of voltage stability / Raja Masood Larik, Mohd, Wazir Mustafa, Manoj Kumar Panjwani, 2019.
8. Yue Songa State-in-mode analysis of the power flow Jacobian for static voltage stability / Yue Songa, David J, Hilla, Tao Liua, 2019.
9. Чемборисова Н. Ш. Использование моделей элементов сети и ПК RASTR WIN при расчетах и анализе режимов ЭЭС: учебное пособие по курсу «Применение ЭВМ в электроэнергетике» по направлению «Электроэнергетика и электротехника» / Н. Ш. Чемборисова, М. В. Бурмейстер, И. Х. Юсупов – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 68 с.
10. Нейумин В. Г. Программный комплекс «RastrWin3», Руководство пользователя / В. Г. Нейумин, Е. В. Машалов, А. С. Александров, А. А. Багрянцев. 25.12.2018.
11. Веников В.А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: Учебник для студентов вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981, – 288 с.
12. Приказ Министерства энергетики РФ от 3 августа 2018 г. № 630 «Методические указания по устойчивости энергосистем».
13. Тестовые схемы [Электронный ресурс] // URL: [https://powersystem.info/index.php?title=Тестовые\\_схемы](https://powersystem.info/index.php?title=Тестовые_схемы) (дата обращения: 07.06.2020).
14. Официальный сайт Отдела энергетики Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения РАН [Электронный ресурс] // URL: [http://energy.komisc.ru/downloads/schemes/ieee\\_14.txt](http://energy.komisc.ru/downloads/schemes/ieee_14.txt) (дата обращения: 07.06.2020).

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

1. Idelchik V. I. Raschety ustanovivshisya rezhimov elektricheskikh sistem [Calculation of steady-state modes of electrical systems] / M.: Energy, 1977. – 192 p. [in Russian]
2. Ezhkov V. V. [Electrical systems and networks in examples and illustrations] / Ezhkov V. V., Zarudskij G. K., Zuev E. N. and other. M.: High School, 1999. – 352 p. [in Russian]
3. Chemborisova N. Sh. Obobshchennye pokazateli v zadachah upravleniya ustanovivshimisya rezhimami v raschetah elektroenergeticheskikh sistem, Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Generalized indicators in the problems of steady state control in the calculations of electric power systems, Thesis for the degree of PhD in Engineering] – Irkutsk, 2004. [in Russian]
4. Jerosolimski M. A new method for fast calculation of Jacobian matrices: automatic differentiation for power system simulation / Jerosolimski M., Levacher L. // IEEE Transactions on Power Systems, 9(2), pp. 700-706, 1994.
5. Zhang Y. P. Research on the relationship of the singular point for load flow jacobian matrix and the critical point of voltage collapse / Zhang Y. P., Huang W., Liu Z. Q., Yang J. Y., Cai X. L., Zhang J. H. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.
6. Naik S. D. On critical mode of bifurcation point and loadability in shunt compensated multi-bus power system / Naik S. D., Khedkar M. K., Bhat S. S. // International Conference on Power and Energy Systems, 2011.
7. Raja Masood Larik A statistical jacobian application for power system optimization of voltage stability / Raja Masood Larik, Mohd, Wazir Mustafa, Manoj Kumar Panjwani, 2019.
8. Yue Songa State-in-mode analysis of the power flow Jacobian for static voltage stability / Yue Songa, David J, Hilla, Tao Liua, 2019.
9. Chemborisova N. Sh. Ispol'zovanie modelej elementov seti i PK RASTR WIN pri raschetah i analize rezhimov EES: uchebnoe posobie po kursu "Primenenie EVM v elektroenergetike" po napravleniyu "Elektroenergetika i elektrotehnika", [Using models of network elements and RASTR WIN in calculations and analysis of power system regimes: a tutorial on the course "Computer Applications in the Power Engineering" in the direction "Power Engineering and Electrical Engineering"] / Chemborisova N. Sh., Burmejster M. V., Yusupov I. H. M.: Publishing House MPEI, 2018. – 68 p. [in Russian]
10. Nejumin V. G. Programmnyj kompleks «RastrWin3», Rukovodstvo pol'zovatelya [Software product «RastrWin3», User's manual] / Nejumin V. G., Mashalov E. V., Aleksandrov A. S., Bagryancev A. A., 25.12.2018. [in Russian]
11. Venikov V. A. Elektricheskie sistemy. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki: Uchebnik dlya studentov vuzov [Electrical systems. Mathematical Problems in Power Engineering: Textbook for university students – 2nd edition] – M.: High School, 1981. – 288 p. [in Russian]
12. Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 3 avgusta 2018 g. № 630 "Metodicheskie ukazaniya po ustojchivosti energosistem" [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated August 3, 2018 No. 630 "Guidelines for the stability of power systems"] [in Russian]
13. Testovye skhemy [Test schemes] [Electronic resource] // URL: [https://powersystem.info/index.php?title=Тестовые\\_схемы](https://powersystem.info/index.php?title=Тестовые_схемы) (accessed: June 6, 2020). [in Russian]
14. Oficial'nyj sajt Otdela energetiki Instituta social'no-ekonomicheskikh i energeticheskikh problem Severa Komi nauchnogo centra Ural'skogo otdeleniya RAN [The official website of the Energy Department of the Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences] [Electronic resource] // URL: [http://energy.komisc.ru/downloads/schemes/ieee\\_14.txt](http://energy.komisc.ru/downloads/schemes/ieee_14.txt) (accessed: June 6, 2020). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.010>**МОНИТОРИНГ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ  
НА БАЗЕ КОГНИТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Научная статья

**Клименко Ю.А.<sup>1,\*</sup>, Преображенский А.П.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5116-6164;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6911-8053;<sup>1,2</sup> Воронежский институт высоких технологий, г. Воронеж, Россия

\* Корреспондирующий автор (klm71165[at]mail.ru)

**Аннотация**

В работе обсуждаются возможности системного анализа распределительных электрических сетей энергетической системы с применением когнитивных измерений. Они необходимы для того, чтобы проводить настройку электрических сетей для работы в требуемых режимах. Приведена структурная схема нечёткого логического вывода, позволяющего учесть изменения в параметрах энергетической системы, показаны возможные значения функции работоспособности. Указаны признаки распределительных сетей энергетической системы, которые могут быть полезны для классификации. Отмечается важность мониторинга распределительной электрической сети с точки зрения эксплуатационных условий для заданных временных интервалов. С этой целью предложена система нечетких рассуждений. По результатам моделирования была введена лингвистическая переменная "уровень риска аварийности".

**Ключевые слова:** алгоритм, мониторинг, электрическая сеть, когнитивность, измерение, признак, классификация, лингвистическая переменная.

**MONITORING OF THE ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK  
BASED ON COGNITIVE MEASUREMENTS**

Research article

**Klimenko Yu. A.<sup>1,\*</sup>, Preobrazhenskiy A.P.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5116-6164;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6911-8053;<sup>1,2</sup> Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

\* Corresponding author (klm71165[at]mail.ru)

**Abstract**

In this article, the authors discuss the possibilities of the system analysis of power distribution networks of an energy system using cognitive measurements. These measurements are necessary in order to configure the electrical networks to operate according to the required performance modes. A block diagram of a fuzzy logic system output that allows to change the parameters of the energy system is presented, and possible values of the performance function are shown. The characteristics of distribution networks of the energy system that can be useful for classification are defined. The authors emphasize the importance of monitoring of the distribution network in terms of operating conditions for specified time intervals. For this purpose, a system of fuzzy logic output is given. Based on the model's results, a new linguistic variable "accident risk level" was introduced.

**Keywords:** algorithm, monitoring, electrical network, cognition, measurement, indicator, classification, linguistic variable.

**Введение**

В настоящее время при управлении распределительными электрическими сетями (РЭС) энергетических систем [1] применяются интеллектуальные автоматизированные комплексы. При этом, поскольку решаются задачи мониторинга [2], исследователи и разработчики опираются на формирование и активное применение подходов и систем, базирующихся на знаниях. Знания рассматриваются в виде метаданных. Это данные, которые анализируются совместно с методами для того, чтобы их анализировать и обрабатывать. Когда мы разрабатываем интеллектуальную систему, то мы исходим из того, что будет строиться цикл инженерии знаний. В него входят несколько этапов. В ходе их реализации знания приобретаются, представляются, пополняются, передаются. Важно при практическом решении задач обращать внимание на начальный этап, в ходе которого знания приобретаются. Их источники бывают разными: знания извлекаются из экспертов, будут получены от текстовых или графических источников, будут обнаружены как результат анализа сенсорных данных. Когда разрабатывается интеллектуальная система мониторинга РЭС энергетических систем, то в ней большое значение отводится получению знаний на базе разных измерений. Например, для участка РЭС необходимо проводить измерения по энергетическим показателям, значениям токов, напряжений и т.д. [3]

После того, как проведены измерения, они могут быть использованы для того, чтобы решать задачи *диагностики* (оценки) компонентов РЭС энергетических систем, осуществления *прогнозирования* их последующего функционирования и *поддержки принятия решений* о том, насколько возможна их эксплуатация и при каких условиях.

Целью данной работы является разработка предложений по использованию аппарата нечёткой логики в системе мониторинга РЭС.

**Системный анализ распределительной электрической сети**

В ходе эксплуатации с течением времени в РЭС энергетической системы происходит изменение потребительских свойств. Связано это физическим и моральным износом, а также влиянием внешних факторов. Если будут выходить из строя отдельные компоненты РЭС, то ее работоспособность может быть утрачена полным образом. Это можно объяснить тем, что с точки зрения системного плана она характеризуется линейной структурой.





Рис. 1 - Структурная схема нечёткого логического вывода

Для разных классов компонентов описание функций работоспособности может осуществляться на основе разных параметров (рис. 1). Если мы анализируем состояние функции по определенному моменту времени, то при оценке относительно какого-либо параметру, ее значения могут быть следующими:

- «безопасное», при этом значение контролируемого параметра мы будем наблюдать внутри безопасного диапазона, не будет существовать его выход в предупредительный диапазон: тогда будет выполнение функции, для системы будет безопасное состояние:

- «предупредительное» - значение контролируемого параметра мы будем наблюдать внутри предупредительного диапазона:

- «опасное» - мы будем наблюдать выход контролируемого параметра вне предельного диапазона.

Когда мы осуществляем процесс классификации анализируемые компоненты будут группироваться в классы. Они являются классификационными таксонами, при этом мы используем выбранные признаки - основания классификации [4]. Для того, чтобы классифицировать распределительные сети энергетической системы можно указать такие признаки как:

К<sub>1</sub> - назначение: общего назначения (электроснабжение промышленных, сельскохозяйственных, транспортных и бытовых потребителей), автономные (электроснабжение автономных и мобильных объектов: космических аппаратов, автономных станций, транспортных средств, судов, самолетов, роботов и др.), технологических объектов (электроснабжение производственных и других инженерных сетей), контактные (специальные, для передачи электроэнергии на движущиеся вдоль сети транспортные средства (локомотив, метро, трамвай, троллейбус);

К<sub>2</sub> - место расположения и характеру потребителей (промышленные, городские, сельские, сети электрифицированных железных дорог, сети магистральных нефте- и газопроводов)

К<sub>3</sub> - выполняемые функции (системообразующие, питающие, распределительные);

К<sub>4</sub> - схема соединений (замкнутые, разомкнутые);

К<sub>5</sub> - конструктивное исполнение: воздушные, кабельные, проводки внутри зданий и сооружений, токопроводы промышленных предприятий

К<sub>6</sub> - протяженность;

К<sub>7</sub> - род тока (переменный трехфазный ток, переменный однофазный, постоянный ток);

К<sub>8</sub> - величина напряжения (напряжением до 1 кВ, напряжением выше 1 кВ);

К<sub>9</sub> - режим работы нейтрали (глухозаземленная, изолированная)

К<sub>10</sub> - количество цепей

К<sub>11</sub> - сечение провода

К<sub>12</sub> - количество трансформаторных подстанций.

Согласно «Методике комплексного определения показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе, показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства проведение мониторинга распределительной электрической сети» [5] заключается в систематическом наблюдении за ее функционированием и соблюдением эксплуатационных условий для заданных временных интервалов с привлечением специальных технических средств и датчиков, которые будут располагаться на определенных участках сети. Рассматриваем мы мониторинг как совокупность работ в системах наблюдения за РЭС, при этом ведется диагностика, обследования и испытания. В ходе мониторинга происходит выполнение экспериментальной оценки по измеряемым количественным параметрам, а также качественным признакам, которые характеризуют техническое состояние РЭС, к которым относятся: величина электрического тока; величина электрического напряжения; поперечное сечение проводника; температура нагрева проводника; потери электроэнергии.

#### Описание системы нечетких рассуждений в задаче мониторинга распределенных энергетических систем

Системы нечеткого вывода преобразуют значения входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе применения нечётких продукционных правил [6]. Системы нечёткого вывода содержат базу нечётких продукционных правил и реализуют нечёткий вывод заключений в виде посылок в форме нечётких лингвистических выражений [7].

Таблица 1 – Нечеткие продукционные правила определения риска аварийности

| Термины ЛП "состояние электрической сети" | Продукционные правила  |
|---|--|
| Хорошее                                   | Если "состояние электрической сети" = хорошее И "величина электрического тока" = номинальная И "величина электрического напряжения" = номинальная И "поперечное сечение проводника" = нормативное И "температура нагрева проводника" = нормативная И "потери электроэнергии" = низкие ТО "уровень риска аварийности" = низкий                    |
| Удовлетворительное                        | Если "состояние электрической сети" = удовлетворительное И "величина электрического тока" = повышенная И "величина электрического напряжения" = пониженная И "поперечное сечение проводника" = нормативное И "температура нагрева проводника" = предельная И "мощность потерь электроэнергии" = средние ТО "уровень риска аварийности" = средний |
| Неудовлетворительное                      | Если "состояние электрической сети" = неудовлетворительное И "величина электрического тока" = высокая И "величина электрического напряжения" = пониженная И "поперечное сечение проводника" = уменьшенное И "температура нагрева проводника" = критическая И "потери электроэнергии" = высокие ТО "уровень риска аварийности" = высокий          |

Продукционная система нечётких правил представляет собой совокупность правил вида "ЕСЛИ", "ТО". Каждое правило имеет некоторый коэффициент определённости который определяет степень истинности заключения, получаемого по конкретному нечёткому правилу. Для заключения используются нечёткие выражения. Базовыми выражением нечётких продукционных правил является лингвистическая переменная (ЛП) "состояние электрической сети" [8]. Посылками нечётких правил являются значения ЛП: величина электрического тока, величина электрического напряжения, поперечное сечение проводника, температура нагрева проводника, мощность потерь электроэнергии. Заключением является ЛП "уровень риска аварийности" с деонтическими базовыми определениями "низкий", "средний", "высокий".

#### Характеристики алгоритма Мамдани

В системах нечеткого вывода используется большое число алгоритмов. Среди них можно отметить алгоритм Мамдани. Его рассматривали 45 лет назад как подход в задаче, связанной с управлением паровым двигателем. Укажем ключевые составляющие в этом алгоритме:

- 1) Формируется база правил в системах нечеткого вывода для распределенных энергетических систем.
- 2) Осуществляется процесс фазификации входных переменных.
- 3) Происходит агрегирование подусловий по нечетким правилам продукции. Чтобы определять степень истинности условий по каждому правилу нечетких продукций приходится исходить из парных нечетких логических операций. Для тех правил, в которых есть отличие от 0 степени истинности условий, мы будем признавать активность и мы их будем применять в последующих расчетах.
- 4) Происходит активизация подзаключений по нечетким правилам продукций. Происходит учет лишь активных правил нечетких продукций, что ведет к тому, что сокращается время вывода.
- 5) Происходит аккумуляция по заключениям в нечетких правилах продукций. При этом приходится применять формулу, которая описывает объединение нечетких множеств. Они будут соответствовать термам подзаключений, которые будут связаны с одними и теми же выходными лингвистическими переменными.

#### Результаты моделирования

Предлагается ввести ЛП "уровень риска аварийности" с терм-множеством : очень высокий, высокий, выше среднего, средний, ниже среднего, низкий, очень низкий.

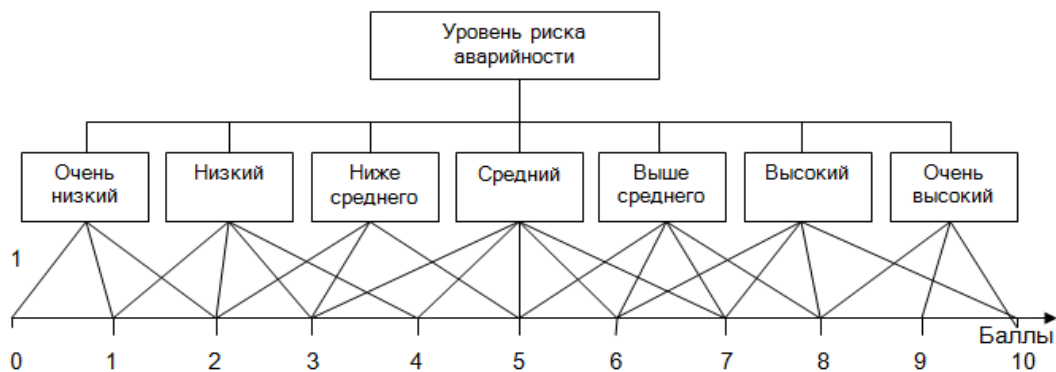


Рис. 2 – ЛП "уровень риска аварийности" с базовыми значениями

Базовыми термы: высокий, средний, низкий. Составные термы: очень высокий, выше среднего, ниже среднего, очень низкий.

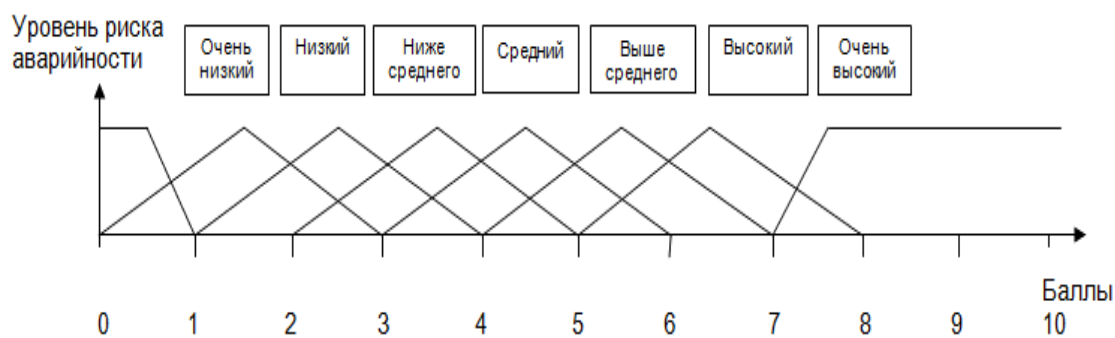


Рис. 3 – Терм-множество ЛП "уровень риска аварийности"

### Выводы

В работе рассмотрена задача мониторинга распределенной энергетической системы, базирующаяся на едином подходе исследования влияния различных внешних факторов. При этом учитывалась нечеткость и неточность в исходной информации, которая относилась к таким количественным параметрам, как величина электрического тока, величина электрического напряжения, поперечное сечение проводника, температура нагрева проводника, потери электроэнергии. Введен набор лингвистических переменных: состояние электрической сети, уровень риска аварийности. Проведено построение и реализация моделей нечеткого вывода.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Львович Я.Е. Об управлении работой распределенных энергетических систем /Львович Я.Е., Львович И.Я., Преображенский А.П., Клименко Ю.А., Чопоров О.Н. // В сборнике: XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С. 2473-2478.
2. Клименко Ю.А. Оптимизационное моделирование распределенных электрических систем / Клименко Ю.А. // В сборнике: Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. Труды Международной молодежной научной школы. 2019. С. 92-93.
3. Клименко Ю.А. Анализ характеристик распределенных электрических систем. / Клименко Ю.А. / В сборнике: Интеллектуальные информационные системы. Труды Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. 2019. С. 23-25
4. Шнейдер Ю.А. Системы и модели / Ю.А. Шнейдер, А.А Шаров. - М: Радио и связь, 1982. - 152 с.
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2016 года № 1401" О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе, показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей" [Электронный источник], / [http:// www.garant.ru/](http://www.garant.ru/) (дата обращения 29.06.2020).
6. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений : Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 167 с.
7. Леоненков А. В. Нечёткое моделирование в среде Matlab и Fuzzy Tech. - СПб. : БХВ - Петербург, 2005. - 725 с.
8. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986. - 311 с.

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

1. L'vovich Y.E. Ob upravlenii rabotoj raspredelennyh energeticheskikh sistem [On the control of distributed energy systems] /L'vovich Y.E., L'vovich I.YA., Preobrazhenskij A.P., Klimenko Y.A., CHoporov O.N. // V sbornike: XIII Vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019. Sbornik trudov XIII Vserossijskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN [In the collection: XIII all-Russia meeting on control problems VCPU-2019. Proceedings of the XIII all-Russian meeting on VSPU management problems-2019. V. A. Trapeznikov Institute of management problems]. 2019. P. 2473-2478. [in Russian]
2. Klimenko Y.A. Optimizatsionnoe modelirovanie raspredelennyh elektricheskikh sistem [Optimization modeling of distributed electrical systems] / Klimenko Y.A. // V sbornike: Optimizatsiya i modelirovanie v avtomatizirovannykh sistemah. Trudy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj shkoly [in the collection: Optimization and modeling in automated systems. Proceedings of the International youth scientific school]. 2019. P. 92-93. [in Russian]
3. Klimenko Y.A. Analiz harakteristik raspredelennyh elektricheskikh sistem [Analysis of the characteristics of distributed electrical systems] / Klimenko YU.A. / V sbornike: Intellektual'nye informacionnye sistemy. Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 2-h chastyah [in the collection: Intelligent information system. Proceedings of the International scientific and practical conference. In 2 parts.] 2019. P. 23-25. [in Russian]
4. Shnejder Ju.A., Sharov A.A.. Sistemy i modeli [Systems and models] . - M: Radio i svjaz', 1982 . - 152 p. [in Russian]
5. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19 dekabrja 2016 goda № 1401" O kompleksnom opredelenii pokazatelej tehniko-jekonomicheskogo sostojaniya ob#ektov jelektroenergetiki, v tom chisle, pokazatelej fizicheskogo iznosa i jenergeticheskoy jeffektivnosti ob#ektov jelektrosetevogo hozjajstva, i ob osushhestvlenii monitoringa takih pokazatelej"[On a comprehensive definition of indicators of the technical and economic state of electric power facilities, including indicators of physical deterioration and energy efficiency of electric grid facilities, and on monitoring such indicators] [Elektronnyj istochnik], / <http://www.garant.ru> / (accessed 29.06.2020). [in Russian]
6. Zade L. Ponjatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie k prinjatiju priblizhjonnyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]: Per. s angl.-M.: Mir,1986. - 167p.
7. Leonenkov A. V. Nechjotkoe modelirovanie v srede Matlab i Fuzzy Tech [Fuzzy modeling in Matlab and Fuzzy Tech]. - SPb. : BHV - Peterburg, 2005. - 725 p. [in Russian]
8. Nechjotkie mnozhestva v modeljah upravlenija i iskusstvennogo intellekta [Fuzzy sets in control and artificial intelligence models] / Pod red. D.A. Pospelova. - M.: Nauka,1986. - 311 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.011>**ФОРМИРОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО МОЩНОСТНОГО РЯДА  
РОТОРНО-ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ АВИАЦИИ**

Обзорная статья

**Кузнецов Г.А.<sup>1,\*</sup>, Кутуров Д. В.<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

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

**Аннотация**

В статье описано современное состояние с производством авиационных поршневых двигателей в России. Отмечена высокая потребность в авиационных поршневых двигателях в широком диапазоне мощностей. Предложено мощностной ряд авиационных поршневых двигателей поделить на пять классов мощности: от особо малой до особо большой мощности. В мире наблюдается активизация работ по созданию нетрадиционных для авиации роторно-поршневых двигателей (РПД). Отмечены преимущества и недостатки таких двигателей по сравнению с поршневыми. Проанализированы мощностные ряды современных авиационных РПД. По результатам исследований сформирован унифицированный мощностной ряд авиационных РПД по предложенным классам мощности в диапазоне от 8 до 1500 л.с. Показано возрождение роторно-поршневого авиадвигателестроения в России и лидирующая роль ЦИАМ в этом процессе. В частности установлено, что за последние 6 лет созданы перспективные разработки российских РПД. Это объясняется большим спросом на отечественные поршневые двигатели, повышением национальной безопасности России, переходом на импортозамещение в условиях санкций, финансированием перспективных разработок.

**Ключевые слова:** авиационные роторно-поршневые двигатели, двигатели беспилотных летательных аппаратов, двигатели легкомоторной авиации, мощностные ряды, типоразмерные ряды, импортозамещение.

**THE FORMATION OF A UNIFIED POWER RANGE FOR ROTARY-PISTON ENGINES  
OF THE RUSSIAN AVIATION**

Review article

**Kuznetsov G. A.<sup>1,\*</sup>, Kuturov D. V.<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

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

**Abstract**

In this article, the authors describe the current state of the production of aircraft piston engines in Russia. There is a high demand for the aircraft piston engines in a wide range of power. It is suggested to divide the power range of the aircraft piston engines into five power classes: from very low to very high power capabilities. Globally, there is an increase in the production of non-traditional rotary-piston engines for aviation (RPE). Certain advantages and disadvantages of such engines in comparison with the piston engines are noted. The capacity range of modern aircraft RPE is analyzed. Based on the results of the research, a unified power range of aviation RPE was formed for the suggested power classes in the range from 8 to 1500 HP. The authors also demonstrate the revival of rotary-piston aircraft engine manufacturing in Russia and the leading role of Central Institute of Aviation Motors in this process. In particular, it is verified that over the past 6 years, some promising projects of the Russian RPE have been developed. This is due to the high demand for the domestic piston engines, an increased national security level in Russia, the transition to import substitution under sanctions pressure, and the financing of promising inventions.

**Keywords:** aircraft rotary-piston engines, engines of unmanned aerial vehicles, single-engined aeroplane, capacity range, standard series, import substitution.

**Введение**

Россия является одной из ведущих авиационных стран мира, имеющих развитое авиастроение. В состав российской авиационной техники входят беспилотные и пилотируемые летательные аппараты. На них устанавливаются современные в основном поршневые двигатели. Производство конкурентоспособных авиационных поршневых двигателей (АПД) в России является приоритетной задачей в силу высокой добавленной стоимости. Мировой рынок поршневых двигателей оценивается в несколько десятков миллиардов долларов в год [1].

В последнее время в научной среде все больше внимания уделяется проблематике импортозамещения иностранных АПД двигателями российского производства. Особенно это важно при производстве беспилотной техники, так как применение импортных двигателей на беспилотных аппаратах в условиях санкций западных стран и США оказывает существенное влияние на национальную безопасность России. По данным Росавиации, в России на гражданских летательных аппаратах около 90% АПД иностранного производства [2].

В работе [3] проведен анализ рынка отечественной поршневой авиации, состоящий из трех сегментов: беспилотные летательные аппараты (БЛА), сверхлегкие летательные аппараты (СЛА) и легкие летательные аппараты (ЛЛА). Исследованиями установлено, что на 90% отечественных БЛА, СЛА и ЛЛА установлены иностранные АПД.

Государственная программа РФ «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы» предусматривает существенное увеличение отечественной авиационной техники. Для этого необходимо создание новых конкурентоспособных двигателей различных классов мощности. В перечне мероприятий стратегии развития поршневого двигателестроения России указывается на разработку перспективного семейства АПД мощностью до 500 кВт для легкой и сверхлегкой авиации, а также специальной авиационной техники [4].

В последнее время со стороны иностранных и отечественных разработчиков авиационных поршневых двигателей для беспилотной и пилотируемой авиационной техники проявляется интерес к роторно-поршневым двигателям (РПД) типа Ванкеля.

Цель работы – формирование унифицированного мощностного ряда отечественных РПД для российской авиации исходя из потребностей рынка в условиях поставленной задачи импотрозамещения.

### **Классификация поршневых двигателей по классам мощности**

В настоящее время для большинства беспилотных и пилотируемых ЛА в отечественной авиации применяются поршневые двигатели. Одним из классификационных признаков поршневых двигателей является мощность. В зависимости от мощности поршневые двигатели подразделяют на группы или классы. Так, в работе [5] дизельные двигатели по эффективной мощности условно разделены на 3 группы: маломощные (менее 100 л.с.); средней мощности (от 100 до 2000 л.с.); мощные (от 2000 до 20000 л.с. и более).

В основу мощностного ряда авиационных двигателей положена, как правило, максимальная мощность двигателя. Так, в работе [6] для пилотируемой авиации АПД условно подразделяются по величине развиваемой мощности на три группы: маломощные (от 100 до 500 л.с.); средней мощности (от 500 до 1500 л.с.); большой мощности (от 1500 до 3500 л.с. и более).

В работе [1] авиационные четырехтактные поршневые двигатели условно разбиваются на два класса: низкой (60-250 л.с.) и высокой (более 250 л.с.) мощности.

В работе [7] предложено поделить типоразмеры двигателей в зависимости от назначения ЛА (от малых БЛА до спортивных самолетов) на пять классов мощности с диапазоном: 0,5...40 л.с., 45...80 л.с., 80...120 л.с., 120...300 л.с. и 360...420 л.с.

В работе [8] рассматриваются три класса мощности поршневых двигателей для БЛА: малой (до 15 л.с.), средней (16...100 л.с.) и большой мощности (свыше 101 л.с.). В работе [9] АПД для пилотируемой авиации подразделяют в зависимости от мощности на три класса: от 20 до 600 л.с. – малой мощности; от 600 до 1250 л.с. – средней мощности; свыше 1250 л.с. – высокой мощности.

В связи с выше изложенным предлагается для отечественной беспилотной и пилотируемой авиации ввести пять классов мощности поршневых двигателей: особо малой (до 20 л.с.), малой (20...100 л.с.), средней (100...500 л.с.), большой (500...2500 л.с.), особо большой мощности (свыше 2500 л.с.).

### **Роторно-поршневые двигатели**

По сравнению с традиционными поршневыми двигателями РПД при одинаковой мощности имеют следующие преимущества: компактность и меньшая масса; простота конструкции и меньшее количество деталей; низкий уровень шума и вибраций; хорошая уравновешенность и высокая равномерность крутящего момента; низкий удельный расход топлива и др.

Основные недостатки РПД: ненадежная работа уплотнения газового зазора; быстрый износ рабочих поверхностей; большая теплонапряженность; большие габариты масляной и водяной системы; сложная технология изготовления рабочих поверхностей ротора и корпуса; высокая стоимость изготовления и др. Характерной особенностью РПД является нетрадиционная для отечественного авиадвигателестроения технология производства, технического обслуживания, ремонта и эксплуатации РПД.

Еще одним преимуществом РПД является модульность конструкции двигателя. То есть, отработав одну секцию двигателя, можно создать унифицированный мощностной ряд, изготавливая двигатели в одно-, двух- и многосекционном исполнении. При этом возможно иметь всего лишь 2 или 3 типоразмера двигателя. Кроме того, мощностной ряд может быть расширен установкой турбонагнетателя. Таким образом, принцип модульности при разработке РПД позволит с минимальными затратами создать гамму двигателей в большом диапазоне мощностей, применяя унифицированные элементы.

### **Мощностные ряды зарубежных авиационных РПД**

Работы по созданию и производству РПД активно ведутся за рубежом многими фирмами: Великобритании (UAV, Cubewano), Германии (Wankel SuperTech), США (Pratt Whitney), Швейцарии (Mistral), Австралии (Austro Engine) и др. Производителям РПД выгодно создавать несколько типоразмеров РПД, формируя из них мощностные ряды. Так, американская фирма Freedom Motors разработала мощностной ряд двигателей Rotapower в диапазоне от 2,5 до 270 л.с. (табл.1) [10]. Мощностной ряд имеет 13 РПД трех классов мощности: особо малой (4), малой (5) и средней мощности (4).

Таблица 1 – Мощностной ряд авиационных РПД Rotapower

| Мощность двигателя, л.с.              | Рабочий объем, см <sup>3</sup> | Количество секций |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| РПД особо малой мощности (до 20 л.с.) |                                |                   |
| 2,5                                   | 27                             | 1                 |
| 4                                     | 40                             | 1                 |
| 7                                     | 75                             | 2                 |
| 20                                    | 150                            | 1                 |
| РПД малой мощности (20...100 л.с.)    |                                |                   |
| 28                                    | 200                            | 1                 |
| 40                                    | 300                            | 2                 |
| 50                                    | 450                            | 2                 |
| 65                                    | 650                            | 1                 |
| 100                                   | 900                            | 2                 |
| РПД средней мощности (100...500 л.с.) |                                |                   |
| 130                                   | 1300                           | 2                 |
| 150                                   | 1350                           | 3                 |
| 200                                   | 1800                           | 4                 |
| 270                                   | 2700                           | 6                 |

**Мощностные ряды отечественных авиационных РПД**

В СССР наибольших успехов в создании РПД достигли в СКБ РПД «АвтоВАЗ» (Тольятти). На предприятии в течение продолжительного времени занимались разработкой и серийным производством автомобильных и лодочных РПД. Были созданы опытные образцы авиационных двигателей. Мощностной ряд авиационных РПД в диапазоне мощностей от 45 до 280 л.с. представлен в табл. 2 [10].

Таблица 2 – Мощностной ряд авиационных РПД «АвтоВАЗ»

| Марка двигателя                       | Количество секций | Мощность двигателя, л.с. | Применение                      | Примечание |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------|------------|
| РПД малой мощности (20...100 л.с.)    |                   |                          |                                 |            |
| ВАЗ-1187(Ф)                           | 1                 | 45                       | СЛА (1991-1995гг.)              | Опытный    |
| РПД средней мощности (100...500 л.с.) |                   |                          |                                 |            |
| ВАЗ-416                               | 2                 | 160                      | Самолет и вертолет (1993-96гг.) | Единичный  |
| ВАЗ-4305                              | 2                 | 210                      | Самолет                         | Опытный    |
| ВАЗ-426                               | 3                 | 270                      | Самолет и вертолет              | Единичный  |
| ВАЗ-531                               | 3                 | 280                      | Вертолет                        | Опытный    |

Предприятием «АвтоВАЗ» был предложен проект мощного ряда авиационных РПД среднего класса мощности, состоящий из 7 двигателей в диапазоне от 150 до 300 л.с. [11]. К сожалению, после очередных финансовых кризисов 1990-2000 гг. работы в СКБ РПД «АвтоВАЗ» по роторно-поршневым двигателям были приостановлены.

В 1974-1977 гг. в воронежском ОКБМ был изготовлен и испытан опытный экземпляр РПД мощностью 400 л.с. Однако работы над РПД-400 были прекращены из-за ряда трудноразрешимых проблем [1].

В ОАО СКБМ (вошедшем в ОАО «Кузнецов» в 2010 г.) для удовлетворения потребностей в малой и беспилотной авиации был разработан проект мощного ряда РПД в диапазоне мощностей от 8 до 200 л.с. (табл.3) [11]. На основе трех типоразмеров разработаны 15 двигателей трех классов мощности: особо малой (4), малой (8) и средней мощности (3).

Таблица 3 – Мощностной ряд авиационных РПД ОАО «Кузнецов»

| Мощность двигателя, л.с.                 | Типоразмер | Количество секций | Частота вращения вала, об/мин |
|--|------------|-------------------|-------------------------------|
| РПД особо малой мощности (20...100 л.с.) |            |                   |                               |
| 8  | 1          | 1                 | 7000                          |
| 12                                       | 1          | 1                 | 10000                         |
| 16                                       | 1          | 2                 | 7000                          |
| 18                                       | 1          | 1                 | 15000                         |
| РПД малой мощности (20...100 л.с.)       |            |                   |                               |
| 24                                       | 1          | 2                 | 10000                         |
| 30                                       | 2          | 1                 | 5200                          |
| 40                                       | 2          | 1                 | 6500                          |
| 50                                       | 2          | 1                 | 8500                          |
| 60                                       | 2          | 2                 | 5200                          |
| 70                                       | 3          | 1                 | 6500                          |
| 80                                       | 2          | 2                 | 6500                          |
| 100                                      | 2          | 2                 | 8500                          |

Окончание таблицы 3 – Мощностной ряд авиационных РПД ОАО «Кузнецов»

| Мощность двигателя, л.с.              | Типоразмер | Количество секций | Частота вращения вала, об/мин |
|---------------------------------------|------------|-------------------|-------------------------------|
| РПД средней мощности (100...500 л.с.) |            |                   |                               |
| 140                                   | 3          | 2                 | 6500                          |
| 180                                   | 3          | 2                 | 7500                          |
| 200                                   | 3          | 2                 | 9000                          |

В ОАО «Кузнецов» в соответствии с запросом ОАО «Туполев» был разработан проект двухсекционного атмосферного двигателя РПД-160 для перспективного БЛА. Взлетная мощность бензинового двигателя составляла 160 л.с. при 8000 об/мин., сухая масса 60 кг. Позднее в ОАО «Кузнецов» был разработан проект двухсекционного атмосферного двигателя РПД-100, взлетной мощностью 100 л.с. при 8500 об/мин. и сухой массой 50 кг.

В профессиональном образовательном учреждении «118 Отдельный учебный центр специального назначения» (ПОУ «118 ОУЦСН») был предложен проект мощностного ряда РПД в диапазоне мощностей от 50 до 1500 л.с. (табл.4). На основе двух типоразмеров разработаны 8 двигателей трех классов мощности: малой (2), средней (4) и большой мощности (2) [12].

Таблица 4 – Мощностной ряд авиационных РПД ПОУ «118 ОУЦСН»

| Мощность двигателя, л.с.               | Типоразмер | Количество секций |
|--|------------|-------------------|
| РПД малой мощности (20...100 л.с.)     |            |                   |
| 50                                     | 1          | 1                 |
| 100                                    | 1          | 2                 |
| РПД средней мощности (100...500 л.с.)  |            |                   |
| 150                                    | 1          | 3                 |
| 200                                    | 1          | 4                 |
| 250                                    | 2          | 1                 |
| 500                                    | 2          | 2                 |
| РПД большой мощности (500...2500 л.с.) |            |                   |
| 1000                                   | 2          | 4                 |
| 1500                                   | 2          | 6                 |

Проведенный ЦИАМ анализ рынка малой авиации и авиационных двигателей подтверждает, что для обеспечения легкомоторной авиации двигателями необходимо создать мощностной ряд в диапазоне от 50 до 300 л.с. Одним из перспективных направлений является разработка РПД используя модульный принцип конструирования. Так, на основе двух типоразмеров предлагается 4 двигателя двух классов мощности: малой (2) и средней мощности (2) (табл.5) [13].

Таблица 5 – Мощностной ряд авиационных РПД ЦИАМ

| Марка двигателя                       | Количество секций | Мощность двигателя, л.с. | Применение |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------------|------------|
| РПД малой мощности (20...100 л.с.)    |                   |                          |            |
| РПД-50                                | 1                 | 50                       | БЛА, СЛА   |
| РПД-100                               | 2                 | 100                      | БЛА, СЛА   |
| РПД средней мощности (100...500 л.с.) |                   |                          |            |
| РПД-200                               | 2                 | 200                      | Самолет    |
| РПД-300                               | 3                 | 300                      | Вертолет   |

При формировании унифицированного мощностного ряда отечественных авиационных РПД предложено 18 типоразмеров двигателя в диапазоне от 8 до 1500 л.с. четырех классов мощности (табл.6). При этом для класса особо малой мощности предлагается 4 двигателя, для классов малой и средней мощности – по 6 двигателей, для класса большой мощности – 2 двигателя. Для этого предполагается использовать всего 3 типоразмера РПД с количеством секций до двух (при мощности РПД от 8 до 500 л.с.), четырех и шести секций (при мощности РПД 1000 и 1500 л.с. соответственно).

Таблица 6 – Мощностной ряд РПД российской авиации (проект)

| Мощность двигателя, л.с.              | Типоразмер | Количество секций |
|---------------------------------------|------------|-------------------|
| РПД особо малой мощности (до 20 л.с.) |            |                   |
| 8                                     | 1          | 1                 |
| 12                                    | 1          | 1                 |
| 16                                    | 1          | 1                 |
| 18                                    | 1          | 2                 |
| РПД малой мощности (20...100 л.с.)    |            |                   |
| 24                                    | 1          | 2                 |
| 30                                    | 1          | 2                 |
| 50                                    | 2          | 1                 |
| 70                                    | 2          | 1                 |
| 80                                    | 2          | 1                 |
| 100                                   | 2          | 1                 |



Окончание таблицы 6 – Мощностной ряд РПД российской авиации (проект)

| Мощность двигателя, л.с.               | Типоразмер | Количество секций |
|--|------------|-------------------|
| РПД средней мощности (100...500 л.с.)  |            |                   |
| 120                                    | 2          | 2                 |
| 160                                    | 2          | 2                 |
| 200                                    | 2          | 2                 |
| 250                                    | 3          | 1                 |
| 300                                    | 3          | 1                 |
| 500                                    | 3          | 2                 |
| РПД большой мощности (500...2500 л.с.) |            |                   |
| 1000                                   | 3          | 4                 |
| 1500                                   | 3          | 6                 |

Как показал анализ рынка отечественной авиационной техники, наибольшей частотой применения отличаются двигатели мощностью 100 и 120 л.с. [3]. В связи с этим перспективным направлением является работа по созданию РПД мощностью порядка 100 л.с. Предлагается применить РПД второго типоразмера с одной или двумя секциями.

### Перспективные разработки отечественных авиационных РПД

На сегодняшний день в России лидером в разработке РПД является ЦИАМ. В рамках НИР «Перспектива» в ЦИАМ был разработан односекционный атмосферный РПД-демонстратор рабочим объемом 654 см<sup>3</sup>, мощностью 100 л.с. при 6500 об/мин., массой 60 кг [14]. Двигатель прошел холодную и горячую обкатки.

В ЦИАМ совместно с «Фондом перспективных исследований» был разработан перспективный турбированный односекционный роторно-поршневой двигатель-демонстратор рабочим объемом 400 см<sup>3</sup>, максимальной мощностью 120 л.с. и массой роторно-статорного модуля 28 кг [15]. Для увеличения ресурса работы РПД были применены композиты в износостойкой вставке статора, радиальных, масляеъемных и торцевых уплотнениях ротора, подшипниковых узлах, износостойком покрытии эксцентрикового вала.

В результате стендовых испытаний РПД подтверждена работоспособность деталей и покрытий из керамических композиционных материалов на основе карбонитрида титана и карбида кремния. Высокотемпературная керамика в камере сгорания позволила применить более бедные топливно-воздушные смеси и за счет этого добиться низкого удельного расхода топлива. Система турбонаддува и электронная система подачи топлива позволили значительно улучшить удельные характеристики. По методике ЦИАМ полный ресурс РПД должен составлять 5000 часов.

### Заключение

В России с возрождением поршневой авиации возник острый дефицит отечественных двигателей всех классов мощности. Предложенный унифицированный мощностной ряд роторно-поршневых двигателей в широком диапазоне мощностей от 8 до 1500 л.с. позволит увеличить серийность и снизить себестоимость производства. В условиях поставленной задачи импортозамещения унификация мощностного ряда роторно-поршневых двигателей приобретает особую значимость.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Гришин Ю.А. Анализ и перспективы развития поршневых авиационных двигателей / Ю.А. Гришин. Москва, ЦАГИ, 2000, 52 с.
2. Ерохин Е.И. ROTAХозамещение. Российские поршневые двигатели для легкой авиации и БЛА / Е.И. Ерохин. Взлет, 2015, № 11, с. 14-21.
3. Кузнецов Г.А. Мощностные ряды отечественных поршневых двигателей беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов. Colloquium-journal (Warszawa, Polska) / Г.А. Кузнецов, Е.Д. Крылов, 2020, № 2(54), с. 213-225.
4. Стратегия развития поршневого двигателестроения России на период до 2020 года. Двигателестроение, 2016, № 1, с. 3-7.
5. Дизели. Справочник. Ваншейдт В.А., ред. Ленинград, Машиностроение, 1977, 480 с.
6. Рыбальчик В.С. Теория поршневых авиационных двигателей / В.С. Рыбальчик, С.В. Поляков, В.Ф. Герасименко. Москва, Воениздат, 1955, 352 с.
7. Гомберг А.А. Двигатели для легкомоторной авиации: старые проблемы и новые перспективы / А.А. Гомберг. Двигатель, 2010, № 3, с.36-37.
8. Завалов О.А. Современные винтокрылые беспилотные летательные аппараты / О.А. Завалов. Москва, МАИ-ПРИНТ, 2008, 196 с.
9. Эксплуатация автомобильных и авиационных ДВС / по ред.С.В. Лукачева. Самара, Изд-во СГАУ, 2006, 427 с.
10. Кочеров Е.П. К вопросу о развитии тематики роторно-поршневых двигателей за рубежом и в России. Вестник Самарского университета / Е.П. Кочеров, В.А. Кононов, В.В. Окорочков, В.М. Окорочкова, В.М. Иванова. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2011, № 3, ч. 4, с. 207-214.
11. Окорочков В.В. Актуальность и направление развития роторно-поршневой тематики / В.В. Окорочков, В.М. Окорочкова, В.В. Шафранов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2014, № 3, ч. 3, с. 82-91.

12. Денисенко Ю.Н. Отечественные технологии – отечественному двигателестроению. Технические концепции и проекты создания авиационных двигателей для малой и региональной авиации. Презентация по материалам докл. науч.-техн. конф / Ю.Н. Денисенко, И.П. Седунов. Москва, ЦИАМ, 2017. URL: [https://aviatp.ru/15\\_118OUC.pdf](https://aviatp.ru/15_118OUC.pdf) (дата обращения 10.04.2020).

13. Финкельберг Л.А. Состояние, перспективы развития и ключевые направления по созданию авиационных поршневых двигателей для авиации общего назначения. Технические концепции и проекты создания авиационных двигателей для малой и региональной авиации. Презентация по материалам докл. науч.-техн. конф / Л.А. Финкельберг. Москва, ЦИАМ, 2017. URL: [https://aviatp.ru/7\\_Perspektivy\\_razvitiya\\_porchnevyh\\_dvigatelay.pdf](https://aviatp.ru/7_Perspektivy_razvitiya_porchnevyh_dvigatelay.pdf) (дата обращения 10.04.2020).

14. Костюченков А.Н. Разработка односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора на основе современной комплексной методики расчета / А.Н. Костюченков, А.А. Зеленцов, П.В. Семенов, В.П. Минин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2014, № 5, ч. 2, с. 173-181.

15. ЦИАМ сконструировал авиационный двигатель с 3D-печатными деталями. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/tsiam-skonstruiroval-aviatsionnyy-dvigatel-s-3d-pechatnymi-detalyami/> опубл.07.02.2020 (дата обращения 10.04.2020).

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

1. Grishin Yu.A. Analiz i perspektivy razvitiya porshnevykh aviatsionnykh dvigateley [Analysis and development prospects of piston aircraft engines] / Grishin Yu.A. Moscow, TsAGI Publ., 2000, 52 p. [in Russian]

2. Yerokhin Ye.I. Vzlet [Take-off] / Yerokhin Ye.I., 2015, no. 11, pp. 14-21. [in Russian]

3. Kuznetsov G.A. Moshhnostnye rjady otechestvennykh porshnevykh dvigatelej bespilotnykh i pilotiruemykh letatel'nykh apparatov [Power ranges of domestic piston engines of unmanned and manned aircraft] / Kuznetsov G.A., Krylov Ye.D Colloquium-journal (Warszawa, Polska), 2020, no. 2(54), pp. 213-225. [in Russian]

4. Strategiya razvitiya porshneвого dvigatelestroeniya Rossii na period do 2020 goda. Dvigatelistroenie [Strategy for the development of the Russian piston engine industry for the period up to 2020 Engine Engineering], 2016, no. 1, pp. 3-7. [in Russian]

5. Vansheydt V.A. Diseli. Spravochnik [Diesels. Directory] / Vansheydt V.A.. Leningrag, Mashinostroenie, Publ., 1977, 480 p. [in Russian]

6. Rybal'chik V.S. Teoriya porshnevykh aviatsionnykh dvigateley [Piston engine theory] / Rybal'chik V.S., Polyakov S.V., Gerasimenko V.F., Dobrynin A.A., ed. Moscow, Voenizdat Publ., 1955, 352 p. [in Russian]

7. Gomberg A.A. Dvigateli dlja legkomotornoj aviatsii: starye problemy i novye perspektivy [Engines for light-engine aviation: old problems and new prospects] / A.A. Gomberg. Engine, 2010, no. 3, pp. 36-37. [in Russian]

8. Zavalov O.A. Sovremennyye vintokrylyye bespilotnyye letatel'nyye apparaty [Modern unmanned rotorcrafts] / Zavalov O.A.. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2008, 196 p. [in Russian]

9. Lukachev S.V. Ekspluatatsiya avtomobil'nykh i aviatsionnykh DVS. [Operation of automotive and aviation ICEs] / Lukachev S.V. . Samara, SSAU Publ., 2006, 427 p. [in Russian]

10. Kocherov E.P. K voprosu o razvitiy tematiki rotorno-porshnevykh dvigatelej za rubezhom i v Rossii. Vestnik Samarskogo universiteta [On the development of the subject of rotary-piston engines abroad and in Russia. Bulletin of Samara University] / E.P. Kocherov, V.A. Kononov, V.V. Okorochkov, V.M. Okorochkova, V.M. Ivanova // Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technology and Engineering, 2011, no. 3, part. 4, pp. 207-214. [in Russian]

11. Okorochkov V.V. Aktual'nost' i napravlenie razvitiya rotorno-porshnevoj tematiki [Relevance and direction of development of rotary-piston topics] / V.V. Okorochkov, V.M. Okorochkova, V.V. Shafranov // Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technology and Engineering, 2014, no. 3, part. 3, pp. 82-91. [in Russian]

12. Denisenko Yu. N. Otechestvennye tekhnologii – otechestvennomu dvigatelestroeniyu [Domestic technologies – to domestic engine building]. Tekhnicheskiye kontseptsii i proyekty sozdaniya aviatsionnykh dvigateley dlya maloy i regional'noy aviatsii. Prezentatsiya po materialam dokl. nauch.-tekhn. konf. [Technical concepts and projects for creating aircraft engines for small and regional aviation. Presentation on the materials of the report. scientific and technical conf.] / Denisenko Yu. N., Sedunov I.P.. Moscow, TsIAM, 2017. Available at: URL: [https://aviatp.ru/15\\_118OUC.pdf](https://aviatp.ru/15_118OUC.pdf) (accessed April 10, 2020). [in Russian]

13. Finkelberg L.A. Sostoyaniye, perspektivy razvitiya i klyuchevye napravleniya po sozdaniyu aviatsionnykh porshnevykh dvigateley dlya aviatsii obshchego naznacheniya [State, development prospects and key areas for the development of aviation piston engines for general aviation]. Tekhnicheskiye kontseptsii i proyekty sozdaniya aviatsionnykh dvigateley dlya maloy i regional'noy aviatsii. Prezentatsiya po materialam dokl. nauch.-tekhn. konf. [Technical concepts and projects for creating aircraft engines for small and regional aviation. Presentation on the materials of the report. scientific and technical conf.]. Moscow, TsIAM, 2017. Available at: URL: [https://aviatp.ru/7\\_Perspektivy\\_razvitiya\\_porchnevyh\\_dvigatelay.pdf](https://aviatp.ru/7_Perspektivy_razvitiya_porchnevyh_dvigatelay.pdf) (accessed April 10, 2020). [in Russian]

14. Kostyuchenkov A.N. Razrabotka odnosekcionnogo rotorno-porshneвого dvigatelja-demonstratora na osnove sovremennoj kompleksnoj metodiki rascheta [Development of a single-section rotary-piston engine demonstrator based on modern complex calculation methods] / A.N. Kostyuchenkov, A.A. Zelencov, P.V. Semenov, V.P. Minin // Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technology and Engineering, 2014, no. 5, part. 2, pp. 173-181. [in Russian]

15. TsIAM skonstruiroval aviatsionnyy dvigatel s 3d-pechatnymi detal'yami [TsIAM designed an aircraft engine with 3D-printed parts] Available at: URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/tsiam-skonstruiroval-aviatsionnyy-dvigatel-s-3d-pechatnymi-detalyami/> opubl.07.02.2020 (accessed April 10, 2020). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.012>**ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЁДА С ПОМОЩЬЮ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА**

Научная статья

**Лесовская М.И.<sup>1,\*</sup>, Игошин А.С.<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

\* Корреспондирующий автор: (lesmari[at]rambler.ru)

**Аннотация**

С помощью хемилюминесцентного (ХЛ) анализа выявлены достоверные различия между образцами натурального мёда с гарантированным качеством и обезличенными образцами из торговой сети. Образцы натурального мёда проявляли однотипные антиоксидантные свойства в умеренной степени, снижение продукции свободных радикалов относительно контроля не превышало 20–40%. Образцы из торговой сети обладали либо прооксидантными свойствами, либо аномально высокой антиоксидантной активностью. Результаты ХЛ-анализа хорошо согласовались с данными традиционного лабораторного исследования и имели преимущества в скорости, наглядности и воспроизводимости.

**Ключевые слова:** мёд, качество, фальсификация, свободные радикалы, антиоксиданты, прооксиданты, хемилюминесценция.

**RAPID HONEY QUALITY CONTROL BY MEANS OF CHEMILUMINESCENT ANALYSIS**

Research article

**Lesovskaia M. I.<sup>1,\*</sup>, Igoshin A. S.<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

\* Corresponding author: (lesmari[at]rambler.ru)

**Abstract**

Through chemiluminescent analysis, a significant difference was found between the samples of pure honey of guaranteed quality and de-identified samples taken from distributing facilities. The samples of pure honey demonstrated same-type anti-oxidant character moderately, decrease in producing the free radicals in comparison with the control group was no more than 20–40%. The samples taken from distributing facilities demonstrated either pro-oxidant character or abnormally high anti-oxidant activity. The results of chemiluminescent analysis comply with the data obtained through traditional laboratory analysis, and got the advantage of speed, being illustrative, and repeatability.

**Keywords:** honey, quality, falsification, free radicals, anti-oxidant, pro-oxidant, chemiluminescence.

**Введение**

Мёд занимает уникальное положение в ряду природных нутриентов как продукт животного происхождения, созданный без антропогенных технологий, посредством пчелиных биофабрик. Помимо натуральных моносахаридов, в его составе содержатся многочисленные биологически активные соединения (водорастворимые витамины, минеральные компоненты, органические кислоты, гликозиды, биофлавоноиды, ферменты, короткоцепочечные пептиды с гормональными эффектами и др.), которые в подобном сочетании и компонентном соотношении не встречаются ни в каком другом природном субстрате [1]. Несмотря на химическое разнообразие, все эти компоненты объединены общей функциональной способностью регулировать скорость и направленность протекания окислительно-восстановительных процессов [2]. Данные процессы лежат в основе поддержания гомеостаза на всех уровнях биологической организации. При этом процессы с участием молекулярного кислорода включают стадии, связанные с образованием свободных радикалов. Нарушение равновесия их образования и элиминации, т.е. редокс-баланса, является ключевой причиной нарушения нормального метаболизма клеток и тканей, а следовательно, включает механизмы патогенеза [3].

Показано, что полиморфные природные комплексы биологически активных компонентов в зависимости от условий способны стимулировать или тормозить продукцию свободных радикалов [4, с. 31]. Поэтому можно предположить, что сортозависимые сочетания большого числа компонентов в составе мёда, в зависимости от биохимических условий стимулирующих или тормозящих продукцию свободных радикалов, формируют антиоксидантную или прооксидантную способность данного вида мёда в целом. Оценка такой способности является необходимым компонентом интегральной биологической ценности данного продукта.

В соответствии с действующим ГОСТ 19792-2017, биологическую ценность мёда определяют в рамках полипараметрического подхода, когда состав и содержание химических компонентов определяют по отдельности (сахароза, редуцирующие сахара, свободная кислотность и др.) [5]. Данный подход, как и органолептический анализ, не позволяет судить о функциональной активности мёда в отношении свободных радикалов. В то же время именно этот параметр необходим для определения биологической ценности мёда для выявления фальсификатов, число которых в торговой сети беспрестанно увеличивается при отсутствии надёжных инструментальных методов контроля качества.

Таким образом, актуальной проблемой является поиск экспрессных информативных методов определения качества мёда, выявления и отбраковки фальсификатов. Решение данной проблемы может быть осуществлено с использованием хемилюминесцентного (ХЛ) анализа. Принцип метода состоит в оценке изменения уровня продукции свободных радикалов в ходе реакции Фентона, сущность которой заключается в распаде пероксида водорода под влиянием ионов  $\text{Fe}^{2+}$  [6]. В присутствии люминола  $\text{C}_8\text{H}_7\text{N}_3\text{O}_2$  химическая энергия цепной реакции преобразуется в энергию световых квантов, подсчёт которых производится с помощью биохемилюминметра. Исходная гипотеза заключалась в том, что с помощью хемилюминесцентного анализа скрининг образцов мёда для выявления фальсификатов можно проводить намного эффективнее с получением воспроизводимых результатов.

Целью настоящей работы было сопоставление двух методических подходов (традиционный полипараметрический и инновационный монопараметрический) для определения информативности хемилюминесцентного метода при экспресс-оценке качества мёда.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования были две группы образцов мёда (рис. 1). Первая группа включала пять образцов фермерского мёда от индивидуальных производителей. Натуральное происхождение и качество этих сортов было гарантировано поручительством конкретных пасечников. Вторая группа объединяла четыре образца, приобретённых в торговой сети (ритейл-образцы), качество которых не было надёжно гарантировано. Кроме того, в эту группу в качестве «нулевого контроля» был включён инвертный сироп, приготовленный общеизвестным способом из сахарозы с добавлением лимонной кислоты [7].

В рамках полипараметрического подхода в соответствии с действующим ГОСТ 19792-2017 определяли суммарный уровень органических кислот (активная кислотность) методом кислотно-щелочного титрования; содержание сахарозы – методом рефрактометрии; общий белок – биуретовым методом; уровень аскорбиновой кислоты методом колориметрии по реакции с метиленовым синим; суммарное количество восстановителей – методом перманганатометрического титрования [8].



Рис. 1 – Характеристика исследуемых образцов

Для определения суммарного количества антиоксидантов или прооксидантов использовали хемилюминесцентный анализ, который проводили с использованием РС-управляемого биохемилюминометра БХЛМ-3606. Методика исследования описана [9]. Реакционную модельную смесь, в которой проходила генерация свободных радикалов, получали соединением 100 мкл пероксида водорода, 150 мкл люминола, 50 мкл сульфата железа (добавляли непосредственно перед началом измерения). В смесь вносили 100 мкл 3%-ного раствора тестируемого образца мёда в дистиллированной воде, в контроле – равное количество дистиллированной воды. При проведении ХЛ-анализа фиксировали параметры: высота пика (I, имп/с), площадь под кинетической кривой (S, тыс.имп.). Продолжительность записи кинетики в каждой повторности составляло 480 с, каждое измерение проводили не менее чем в трёх повторностях. Массив полученных данных проверяли на соответствие закону нормального распределения и равенства дисперсий независимых выборок. Для оценки достоверности межвыборочных различий результаты обрабатывали статистически с использованием t-критерия Стьюдента. Различия принимались значимыми при  $p < 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

Результаты измерения кислотных компонентов в каждой группе образцов отображены на рис. 2; на рис. 2а показано содержание суммы органических кислот (активная кислотность), на рис. 2б – уровень аскорбиновой кислоты, выполняющей специфичные функции в регуляции редокс-баланса. Из приведённых результатов видно, что значения в группе ритейл-образцов оказались выше как по уровню общей кислотности ( $p < 0,05$ ), так и по индивидуальному содержанию витамина С.

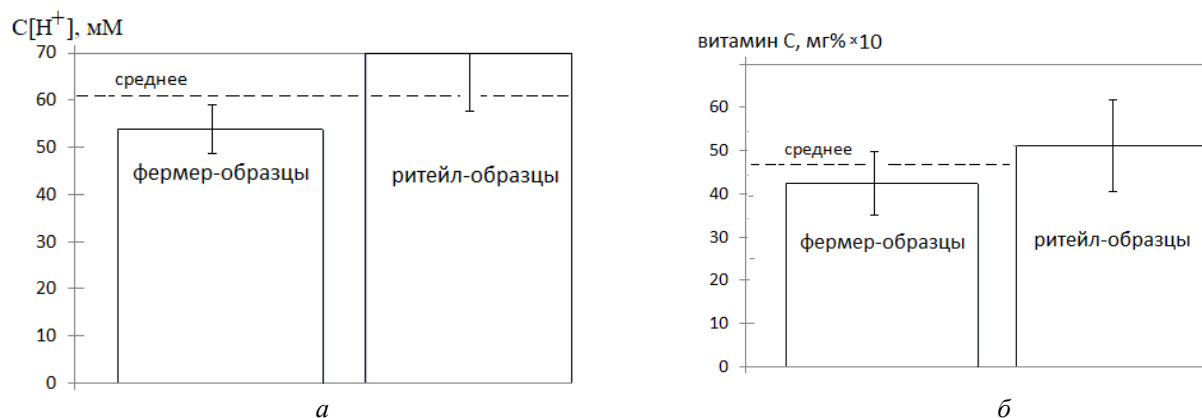


Рис. 2 – Содержание органических кислот и витамина С в фермерских и ритейл-образцах мёда

Ещё более выраженные межгрупповые различия были выявлены по уровням сахарозы и пептидов (рис. 3).

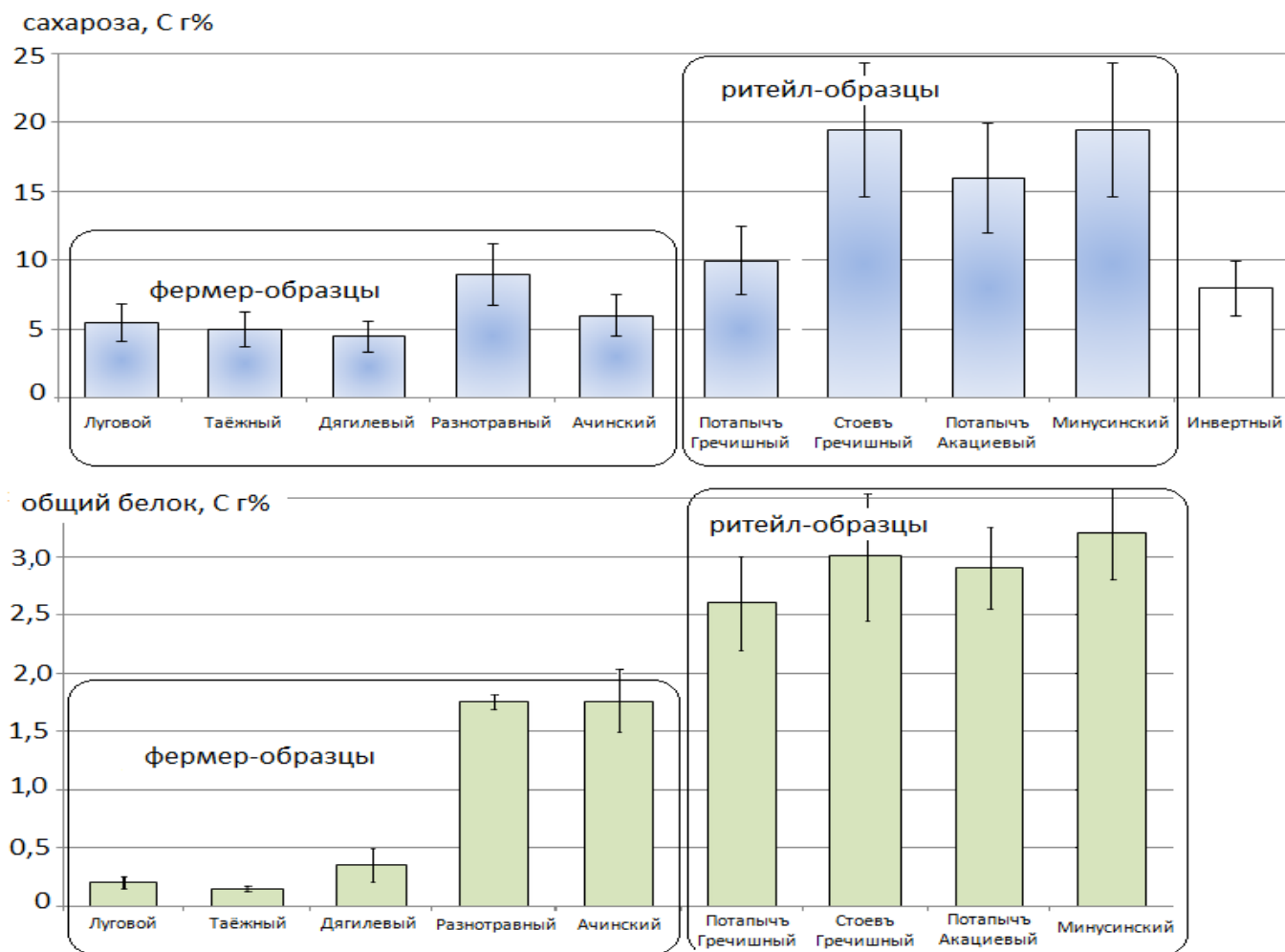


Рис. 3 – Содержание сахарозы и общего белка в фермерских и ритейл-образцах мёда

Из приведённых результатов видно, что в ритейл-образцах достоверно выше содержание сахарозы и белковых соединений, что вполне согласуется с имеющимися данными о наиболее распространённых способах фальсификации мёда, направляемого в торговую сеть, к которым относится замещение части продукта, в частности, инвертным сиропом и мучной суспензией или сывороткой [10]. Повышенное содержание сахарозы в составе мёда может быть следствием нарушения технологии пчеловодства (незрелый мёд; искусственные подкормки пчёл и т.д.) Общим результатом при этом будет снижение пищевой и биологической ценности мёда, т.е. потеря природного качества продукта.

На рис. 4 показаны результаты определения суммы редуцирующих соединений в составе анализируемых образцов.

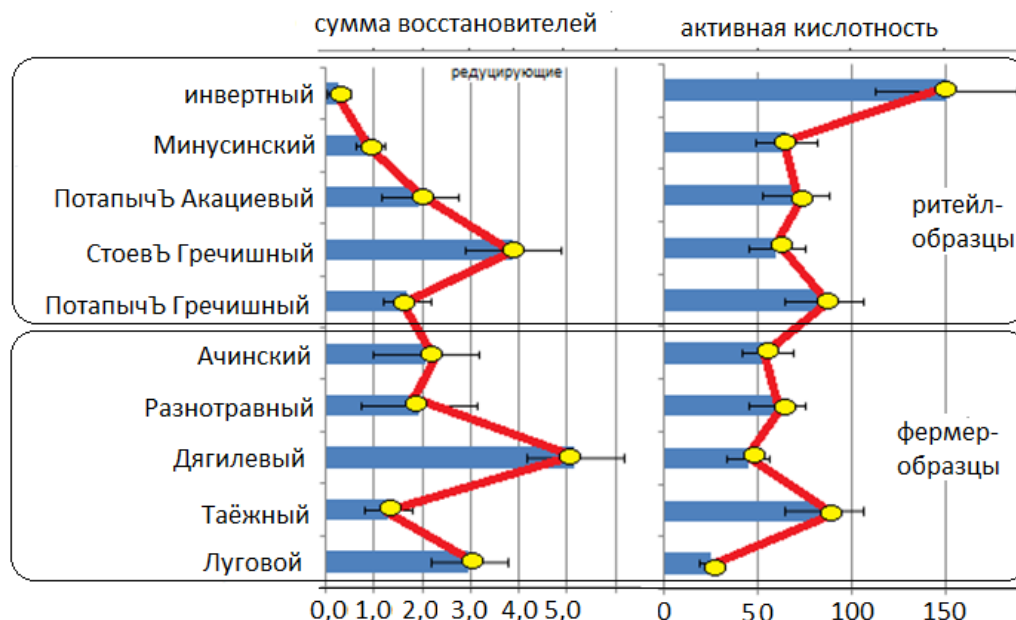


Рис. 4 – Содержание восстановителей и кислотных эквивалентов в фермерских и ритейл-образцах мёда

В перманганатометрическом определении восстановителей использовали титрование сильным окислителем, а в описанном выше ацидиметрическом (при определении активной кислотности) – титрование сильным основанием. Поэтому результаты, полученные в этих определениях, должны комплементарно соответствовать друг другу. Действительно, высокому содержанию кислотных эквивалентов соответствовало низкое содержание восстановителей, и наоборот. Полученные результаты подтвердили методическую валидность проведённых измерений. В то же время выявление подобных фальсификаций в производственной практике представляет реальные трудности, будучи связанным с лабораторными исследованиями, затратами времени и дополнительными издержками, что делает экономически невыгодным выявление фальсификатов с помощью лабораторной аналитики.

Выявление фальсифицированных образцов может быть ускорено и упрощено с помощью хемилюминесцентного анализа, результаты которого приведены на рис. 5–7. Суммарному содержанию антиоксидантов в исследуемом материале соответствует величина снижения уровня свободных радикалов относительно контроля на кинетических кривых (рис. 5, 6) и на гистограмме, отображающей светосумму за время наблюдения процесса (рис. 7).

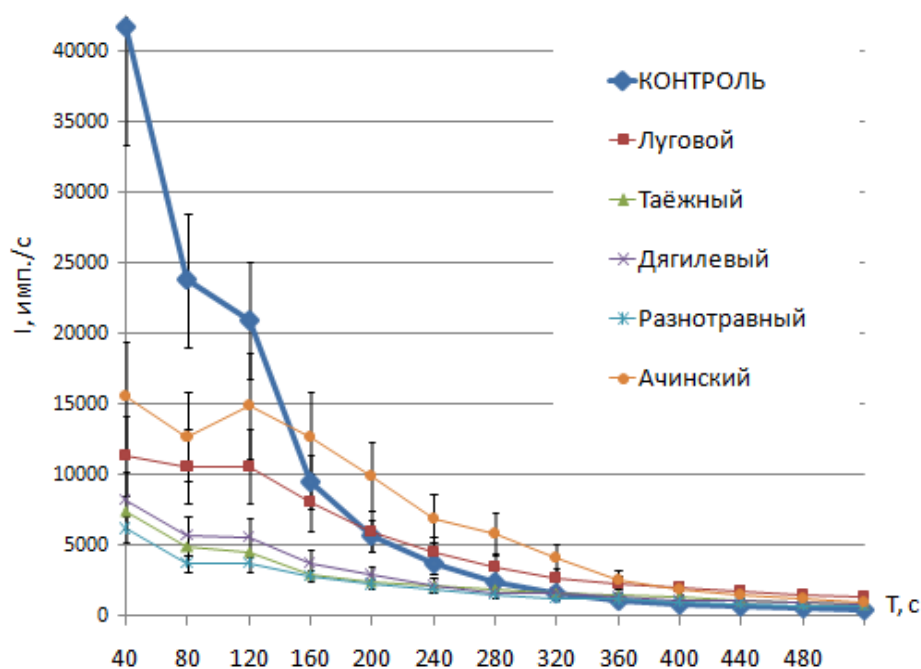


Рис. 5 – Снижение продукции свободных радикалов под влиянием фермер-образцов мёда

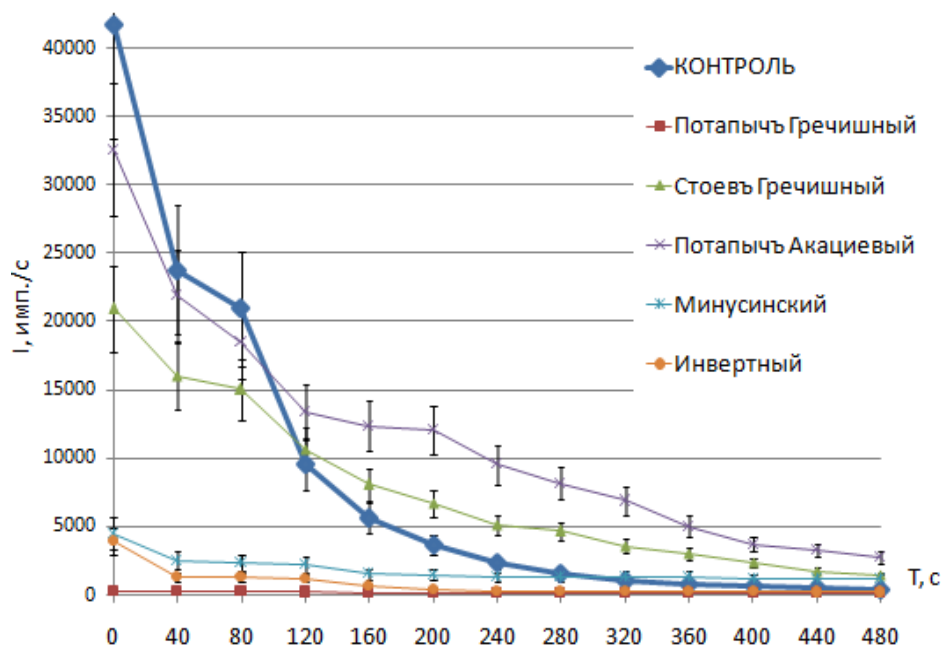


Рис. 6 – Снижение продукции свободных радикалов под влиянием ритейл-образцов мёда и инвертного сиропа

Из рис. 5 и 6 видно, что в контроле, где реакционная среда не содержит антиоксидантов, торможение продукции свободных радикалов происходит с максимальной скоростью. При этом элиминация частиц идёт по самому простому механизму – рекомбинация и деактивация [11]. В присутствии тестируемых образцов характер кинетики усложняется в связи с внесением в реакционную среду комплекса органических соединений, способных регулировать скорость редокс-процесса с помощью различных механизмов. По высоте пика, светосумме и общему профилю кинетики можно судить о суммарном содержании антиоксидантов либо прооксидантов в образце, а также о доминирующем способе регулирования цепных процессов.

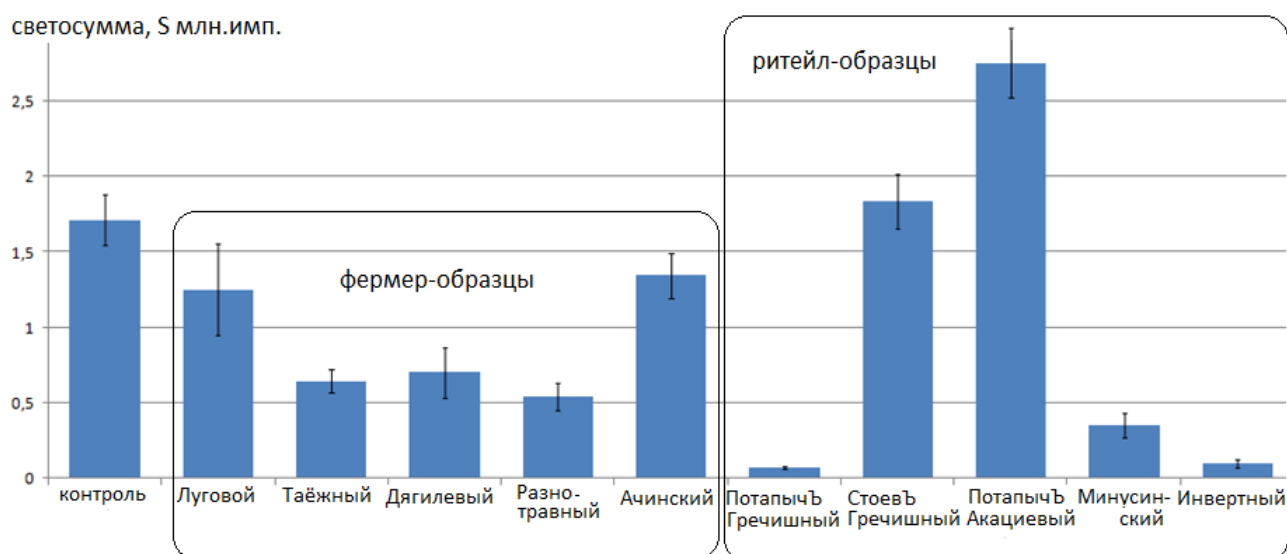


Рис. 7 – Снижение светосуммы хемилюминесценции под влиянием образцов мёда и инвертного сиропа

На рис. 7 отображены результаты измерения светосуммы под влиянием фермер-образцов, в присутствии которых продукция свободных радикалов однонаправленно снижалась, хотя и в различной степени. Так, наименьшим содержанием антиоксидантов характеризовались «Ачинский» и «Луговой» (снижение светосуммы относительно контроля на 26 и 21%, соответственно). У остальных образцов натурального мёда выявлено высокое содержание антиоксидантов, снижение светосуммы относительно контроля составило 62, 59 и 68%, соответственно. Наиболее высоким уровнем антиоксидантов среди них характеризовался мёд «Разнотравный». Судя по характеру кинетогрaмм, в составе этих образцов содержатся антиоксиданты однонаправленного механизма действия, тогда как в составе «Ачинского» и «Лугового» присутствуют регуляторы-антагонисты. Так, мёд «Луговой» характеризовался высоким содержанием не только аскорбиновой кислоты, но и ионов железа, под влиянием которого аскорбиновая кислота быстро теряет свои восстановительные свойства. Мёд «Ачинский» отличался от других образцов более высоким содержанием белковых соединений, которые переходят в состав мёда из цветочных субстратов в основном в виде ферментов-цитохромов. Их регуляторная способность имеет узкий функциональный интервал, чем, по-видимому, и объясняется невысокая антиоксидантная активность образца.



Результаты ХЛ-анализа ритейл-образцов значительно отличались от предыдущей группы и характеризовались контрастным внутригрупповым полиморфизмом. Так, у двух образцов («Потапов Акациевый», «СтоевЪ Гречишный») выявлены отчётливые прооксидантные свойства, т.к. под их влиянием продукция свободных радикалов возрастала на 60% и 7%, соответственно. У двух других образцов продукция свободных радикалов, напротив, снижалась до аномально низких значений, светосумма снизилась на 95% («ПотаповЪ Гречишный») и 80% («Минусинский»). На фоне уровня антиоксидантной активности у образцов натурального мёда с гарантированным качеством подобные пиковые значения у ритейл-образцов заставляют обоснованно сомневаться в их технологической чистоте.

На рис. 6 и 7 приведены лепестковые диаграммы по каждой группе образцов, где результаты всех измерений, включая ХЛ-анализ, соединены общей линией (пунктир) и сопоставлены с усреднёнными справочными данными по составу натурального мёда (стандарт, сплошная линия).

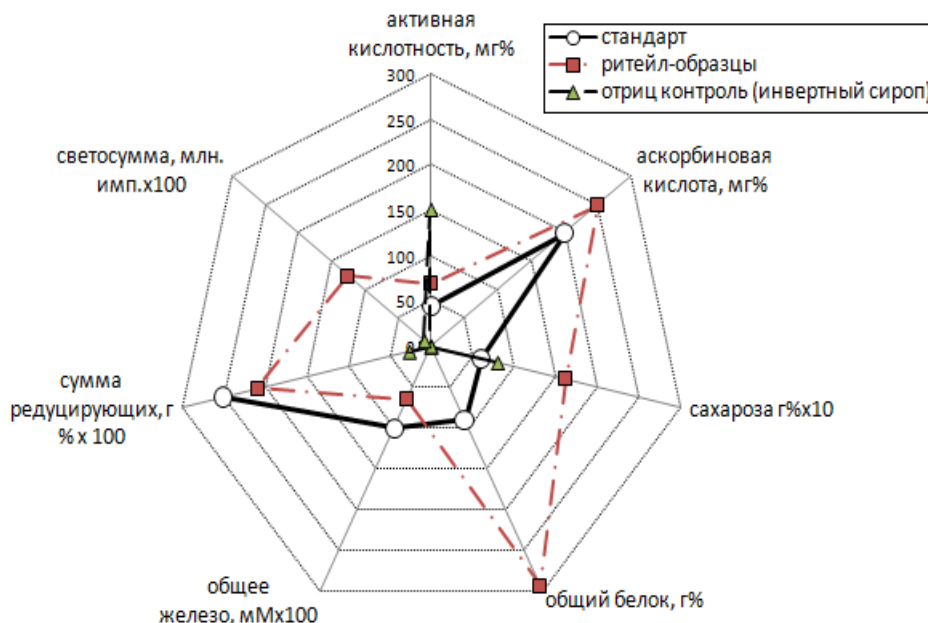


Рис. 6 – Содержание редокс-активных компонентов в образцах мёда (ритейл-образцы)

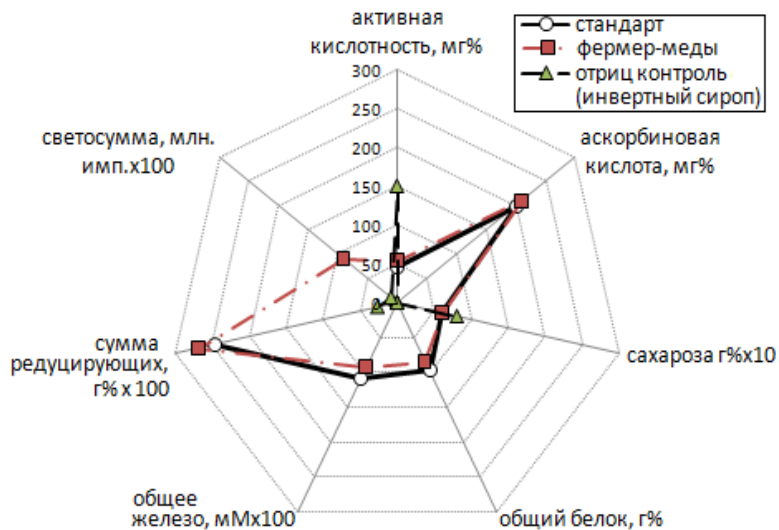


Рис. 7 – Содержание редокс-активных компонентов в образцах мёда (фермер-образцы)

Из рис. 6 видно, что ритейл-образцы не выдерживают сравнения со стандартом, максимальное расхождение наблюдается по величинам общего белка и сахарозы. Напротив, в группе фермер-образцов со стандартом совпали результаты всех проведённых традиционных измерений (рис. 7), с которыми хорошо согласовались данные ХЛ-анализа. Можно заключить, что ХЛ-анализ является весьма перспективным методом для первичного скрининга образцов мёда с негарантированным качеством, в первую очередь по признаку технологической фальсификации. При этом длительность анализа составляет считанные минуты; используемые реагенты легкодоступны и нетоксичны; результаты предъявляются в легко читаемом виде, не требующем длительного анализа.

### Заключение

Таким образом, ХЛ-анализ пригоден для распознавания образцов мёда с негарантированным качеством. Единственным маркёрным признаком при этом является направленность и диапазон влияния на продукцию свободных радикалов. Длительность проведения анализа исчисляется минутами; число одновременно измеряемых проб – десятками экземпляров; воспроизводимость результатов обеспечивается в максимальной степени; для получения



критерия оценки качества не требуется суммировать множественные разнородные показатели, единым критерием является антиоксидантная (или прооксидантная) активность. Данный показатель по своей природе является интегральным и результирует большое число разнонаправленных редокс-процессов.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность фермерам, предоставившим для исследования образцы натурального мёда с собственных пасек.

#### Acknowledgement

The authors thank the farmers who provided samples of natural honey from their own apiaries for research.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Корпачев В.В. Целебная фауна /В.В. Корпачев/. М.: Наука, 1989. – 204 с.
2. Макарова Н.В. Антиоксидантные вещества различных сортов мёда / Н.В. Макарова, В.С. Лиманова, В.П. Бординова // Известия вузов. Пищевая технология. – 2011. – №1. – С. 18–20.
3. Владимиров Ю.А. Свободные радикалы и клеточная хемилюминесценция / Ю.А. Владимиров, Е.В. Проскурина // Успехи биологической химии. – 2009. – Т. 49. – С. 341–388.
4. Лесовская М.И. Методические проблемы тестирования биологической активности нутриентов / М.И. Лесовская / В кн.: Влияние нутриентов на свободнорадикальный баланс крови *in vitro*. – М., 2015. – 94 с.
5. ГОСТ 19792-2017. Мёд натуральный. Технические условия (с поправкой): [Электронный ресурс] <http://docs.cntd.ru/document/1200157439>.
6. Аристова Н.А. Механизмы хемилюминесценции в реакции Фентона / Н.А. Аристова, И.П. Иванова, С.В. Трофимова, И.М. Пискарёв, О.Е. Буркина, О.О. Сошникова // Исследовано в России: электронный научный журнал. – 909 <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/067.pdf>
7. Матов В.А. Способ производства инвертного сиропа. RU2188869 C1 /В.А. Матов, З.Г. Скобельская, В.А. Васькина, А.И. Драгилев, В.А. Алымов, А.В. Куров / Оpubл. 2002.09.10
8. Васильев В.П. Аналитическая химия в 2-х томах, том 2. Физико-химические методы анализа /В.П. Васильев /– Москва: Дрофа, 2004. – 384 с.
9. Хасанов В.В. Методы исследования антиоксидантов /В.В. Хасанов, Г.Л. Рыжова, Е.В. Мальцева // Химия растительного сырья. 2004. – №3. – С. 63–75.
10. Фальсификация мёда: виды, способы и методы определения: [Электронный ресурс] / FB.ru: <https://fb.ru/article/380586/falsifikatsiya-meda-vidyi-sposobyi-i-metodyi-opredeleniya>
11. Денисов Е.Т. Физико-химические аспекты изомеризации свободных радикалов /Е.Т. Денисов, Т.Г. Денисова // Усп. хим., 2004. – Т. 73. – Вып. 11. – С 1181–1209.

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

1. Korpachev V.V. Celebnaya fauna [Healing fauna] /V.V. Korpachev / – М.: Nauka, 1989. – 204 p. [in Russian]
2. Makarova N.B. Antioxidantniye veshchestva razlichnich ssortov meda [Antioxidant substances of various varieties of honey] / N.B. Makarova, V.S. Limanova, V.P. Bordinova // Ivestiya vuzov. Pichevaya technologiya [University News. Food technology]. – 2011. – №1. – P. 18–20. [in Russian]
3. Vladimirov Y.A. Svobodnie radikali i kletochnaya chemiluminescencia [Free radicals and cell chemiluminescence] / Y.A. Vladimirov, E.V. Proskurina // Usrechi Biologicheskoy Khimii [Advances in Biological Chemistry]. – 2009. – Т. 49. – P. 341–388. [in Russian]
4. Lesovskaya M.I. Metodicheskie problemi testirovaniya biologicheskoi aktivnosti nutrientov [Methodological problems of testing the biological activity of nutrients] / M.L. Lesovskaya/ In.: Vliyanie nutrientov na svobodnoradikalniy balans krovi *in vitro* [The effect of nutrients on the free radical balance of blood in vitro]. – М., 2015. – 94 p. [in Russian]
5. GOST 19792-2017. Med naturalnij. Technicheskie uslovia (s popravkoi) [Natural honey. Specifications (as amended)]: [Electronic resource] <http://docs.cntd.ru/document/1200157439>. [in Russian]
6. Aristova N.A. Mechanizmi chemiluminescencii v reakcii Fentona [Mechanisms of chemiluminescence in the Fenton reaction] / N.A. Aristova, I.P. Ivanova, S.V. Trofimova, I.M. Piskarjiev, O.E. Burchina, O.O. Sochnikova // Issledovano v Rossii: elektronij nauchnij zhurnal [Investigated in Russia: an electronic scientific journal]. – 909 <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/067.pdf> [in Russian]
7. Matov V.A. Sposob proizvodstva invertogo siropa [Method for the production of invert syrup]. RU2188869 C1 / /V.A. Matov, Z.G. Skobelskaya, V.A. Vaskina, A.I. Dragilev, V.A. Alymov, A.V. Kurov / Publ. 2002.09.10 [in Russian]
8. Vasiliev V.P. Analiticheskaya khimia v 2 tomah, tom 2. Phisiko-khimicheskie metodi Analisa [Analytical chemistry in 2 volumes, volume 2. Physical and chemical methods of analysis] /V.P. Vasiliev/– М.: Drofa, 2004. – 384 p. [in Russian]
9. Hasanov V.V. Metodi issledovaniya antioxiadantov [Antioxidant Research Methods] /V.V. Hasanov, G.L. Rizhova, E.V. Maltzeva // Khimia rastitelnogo sirja rastitelnogo sirya [Chemistry of plant raw materials]. – 2004. – №3. – P. 63–75. [in Russian]
10. Falsifikatsiya meda: vidi, sposobi i metody opredelenia: [Electronij resurs] [The falsification of honey: types, methods and methods of determination: [Electronic resource] ] / FB.ru: <https://fb.ru/article/380586/falsifikatsiya-meda-vidyi-sposobyi-i-metodyi-opredeleniya> [in Russian]
11. Denisov E.T. Phiziko-khimicheskie aspekt isomerizatsii svobodnich radikalov [Physicochemical aspects of free radical isomerization] /E.T. Denisov, T.G. Denisova// Uspehi khimii [Success of chemistry]. – 2004. – V. 73. – Issue 11. – P. 1181–1209. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.013>

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОБИАЛЬНЫХ ФЕРМЕНТОВ В ОТРАСЛЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ

Обзорная статья

Лукин А.А.<sup>1,\*</sup>, Данилов М.Б.<sup>2</sup>, Пирожинский С.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4753-3210;

<sup>1,3</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;

<sup>2</sup> Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

\* Корреспондирующий автор (lukin3415[at]gmail.com)

### Аннотация

Ферменты сегодня нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Рассвет биотехнологии сыграл решающую роль в этом процессе. Микроорганизмы являются основными источниками получения ферментов для биотехнологической промышленности. Микробиологические ферментные препараты все чаще заменяют обычные химические катализаторы в ряде промышленных процессов. В данной статье рассмотрены отрасли производственной сферы, где активно используются ферментные препараты, в том числе в инновационных сферах производства – биосинтез и получение биотоплива. Даны характеристики некоторых микробных ферментов и рассмотрены взаимодействия ферментов с обрабатываемым сырьем.

**Ключевые слова:** ферменты, микробные ферменты, промышленность, биотопливо, биосинтез, производственная отрасль.

## APPLICATION FEATURES OF MICROBIAL ENZYMES IN INDUSTRIAL SECTORS

Review article

Lukin A. A.<sup>1,\*</sup>, Danilov M. B.<sup>2</sup>, Pirozhinskiy S. G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4753-3210;

<sup>1,3</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia;

<sup>2</sup> East Siberian State University of Technology and Management Ulan-Ude, Russia

\* Corresponding author (lukin3415[at]gmail.com)

### Abstract

Enzymes are now put to good use in many industrial sectors. Flourishing biotechnologies played the crucial part in that process. Microorganisms are the primary source of enzymes for the biotechnological industry. Microbiologic enzyme products increasingly take the place of the traditional chemical catalysts in a number of industrial processes. This article looks into the industrial sectors using enzyme products, including innovation sectors: biosynthesis and biofuel generation. It describes some microbial enzymes and considers the cooperation of the enzymes and the feedstock used.

**Keywords:** enzymes, microbial enzymes, industry, biofuel, biosynthesis, industrial sector.

### Введение

Классифицирует 3 вида ферментов для промышленных целей: технические ферменты, пищевые ферменты и кормовые ферменты. Технические ферменты, включая протеазу, амилазу и целлюлазу, составляют самую высокую долю этого рынка. Эти ферменты широко используются в производстве моющих средств, крахмала, текстиля, кожи, бумаги, целлюлозы. Второй по величине сегмент на рынке – это пищевые ферменты. В эту группу входят ферменты, используемые в молочной, пивоваренной, винодельческой и соковой промышленности [1], [2], [3]. Последняя область — это область кормовых ферментов, включающая такие ферменты, как фитазу, ксиланазу и  $\beta$ -глюканазу.

### Основная часть

Ферменты микробного происхождения доминируют в классе трансфераз, в то время как изомеразы имеют исключительно грибковое происхождение. Большинство протеолитических ферментов широко используются в легкой и пищевой промышленности (рис. 1).

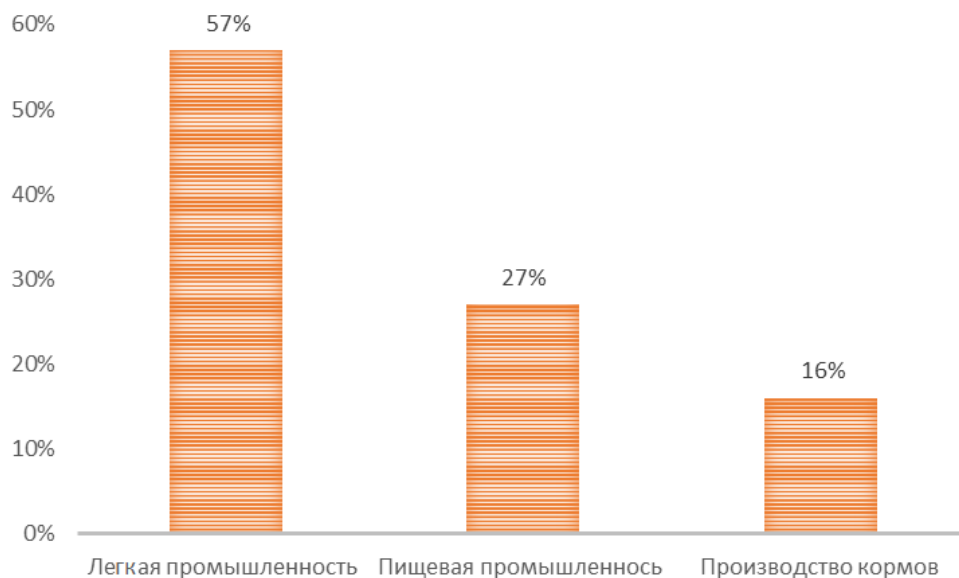


Рис. 1 – Распределение ферментов в промышленных масштабах в зависимости от цели применения

Следует отметить, что многие ферменты предназначены для различных промышленных применений. С точки зрения продаж, ферменты для технических отраслей (моющие средства, текстильное производство, производство этанола, кожевенная промышленность, целлюлозно-бумажная промышленность) составляют основную часть продаж (рис. 2).

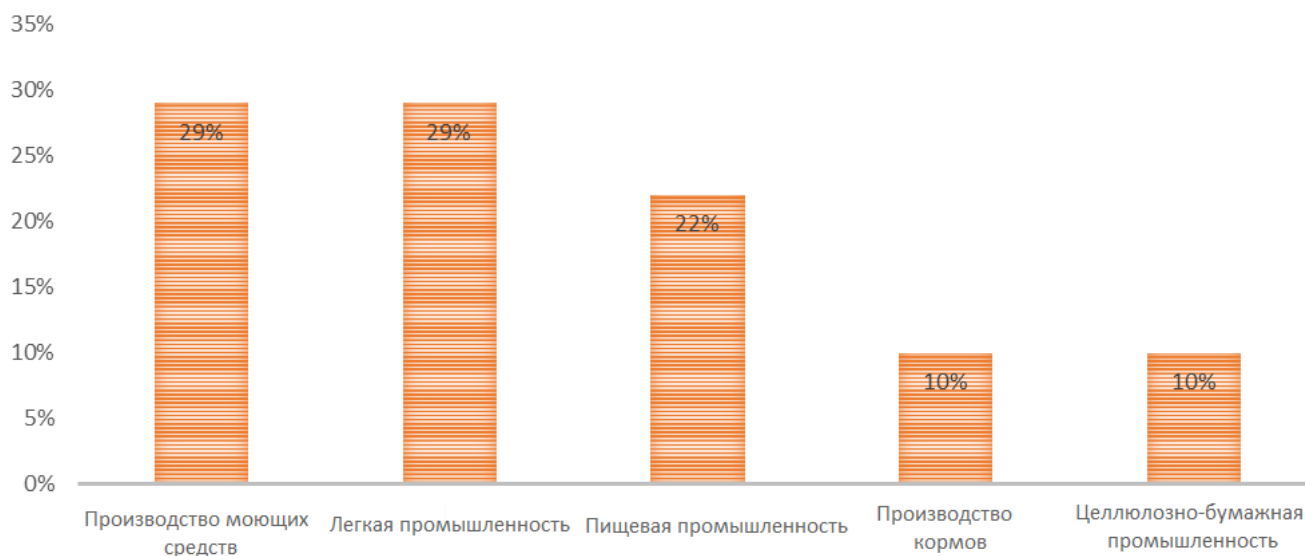


Рис. 2 – Распределение продаж ферментных препаратов в зависимости от отрасли

На сегодняшний день на рынке реализуется свыше 260 ферментных препаратов для различных целей применения.

Получение ферментных препаратов экономически сопоставимы с получением химических реагентов для всех сфер человеческой деятельности. Следовательно, снижение стоимости производства ферментов является положительным стимулом для коммерциализации процессов, основанных на производстве данных препаратов [4]. Протеолитические ферменты являются одной из наиболее важных групп промышленных ферментов и составляют почти 60 % от общего объема продаж ферментов. Согласно отчету о мировом рынке пищевых ферментов, ожидается, что к 2020 году мировой рынок пищевых ферментов достигнет 2,3 млрд. долл., и ожидается, что лидером на этом рынке будет Северная Америка, за которой последуют Европа и Азиатские страны.

В таблице 1 представлен список микробных ферментных препаратов и сферы их применения [5].

Таблица 1 – Микробиальные препараты и сферы их применения

| Фермент, класс (ЕС)                               | Источник получения   | Сфера применения   |
|---|--|--|
| Глюкозооксидаза (ЕС 1.1.3.4)                      | <i>Aspergillus spp.</i>  | Моющие средства, хлебопекарное производство  |
| Лакказа (ЕС 1.10.3.2)                             | <i>Myceliophthora spp.</i> , <i>Trametes spp.</i> , <i>Thielavia spp.</i>  | Моющие средства, текстильная промышленность  |
| Каталаза (ЕС 1.11.1.6)                            | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Scytalidium spp.</i> , <i>Thermoascus spp.</i>  | Текстильная промышленность   |
| Липаза (ЕС 3.1.1.3)                               | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Candida spp.</i> , <i>Fusarium spp.</i> , <i>Humicola spp.</i> , <i>Rhizomucor spp.</i> , <i>Thermomyces spp.</i> | Моющие средства, кожевенная промышленность, целлюлозно-бумажная промышленность, биокатализ, хлебопекарная промышленность, молочная и масложировая промышленности |
| Пектиназа (ЕС 3.1.1.11; ЕС 3.2.1.15; ЕС 4.2.2.10) | <i>Aspergillus spp.</i>  | Производство соков и вин   |
| Фосфолипаза (ЕС 3.1.1.32; ЕС 3.1.4.1)             | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Fusarium spp.</i> , <i>Thermomyces spp.</i>   | Модификация жиров  |
| Гемицеллюлаза (ЕС 3.1.1.73)                       | <i>Aspergillus spp.</i>  | Производство соков и вин   |
| Фитаза (ЕС 3.1.3.8; ЕС 3.1.3.26)                  | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Peniophora spp.</i>   | Производство кормов  |
| $\alpha$ -амилаза (ЕС 3.2.1.1)                    | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Thermoactinomyces spp.</i>  | Целлюлозно-бумажная промышленность, хлебопекарная промышленность, пивоваренная промышленность, производство соков и вин  |
| Амилоглюкозидаза, глюкоамилаза (ЕС 3.2.1.3)       | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Talaromyces spp.</i> , <i>Trichoderma spp.</i>  | Моющие средства, производство биотоплива, производство подсластителей, производство соков и вин  |
| Целлюлаза (ЕС 3.2.1.4; ЕС 3.2.1.91)               | <i>Humicola spp.</i> , <i>Myceliophthora spp.</i> , <i>Thielavia spp.</i>  | Моющие средства, текстильная промышленность, производство биотоплива, целлюлозно-бумажная промышленность   |
| $\beta$ -глюканаза (ЕС 3.2.1.6)                   | <i>Thermoascus spp.</i> , <i>Trichoderma spp.</i>  | Производство кормов, производство биотоплива, пивоваренная промышленность  |
| Ксиланаза (ЕС 3.2.1.8)                            | <i>Actinomadura spp.</i> , <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Thermomyces spp.</i> , <i>Trichoderma spp.</i>   | Целлюлозно-бумажная промышленность, хлебопекарная промышленность, пивоваренная промышленность, производство кормов   |
| Лактаза (ЕС 3.2.1.23)                             | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Kluyveromyces spp.</i>  | Молочная промышленность  |
| Пуллуланаза (ЕС 3.2.1.41)                         | <i>Hormoconis spp.</i>   | Производство биотоплива, производство спирта   |
| Протеаза (ЕС 3.4.2х.хх)                           | <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Cryphonectria spp.</i> , <i>Fusarium spp.</i> , <i>Rhizomucor spp.</i> , <i>Trichoderma spp.</i>                  | Мясная и молочная промышленность, кожевенная промышленность  |

### Текстильная промышленность

Ферменты нашли широкое применение в текстильной промышленности. Хлопок является доминирующим текстильным волокном, и его волокна представляют собой отдельные клетки. Внутренняя часть волокна представляет собой почти чистую целлюлозу, тогда как наружная первичная клеточная стенка содержит воски и гемицеллюлозы. Собранные волокна механически очищают от растительных остатков, затем изготавливают пряжу и делают ткани. Нити тканей часто покрывают крахмалом, чтобы предотвратить его разрыв во время плетения [5]. Использование  $\alpha$ -амилаз (ЕС 3.2.1.1) для удаления крахмала, является первым и одним из старейших применений ферментов в текстильной обработке. Используемые ферменты в основном имеют бактериальное происхождение, чаще всего в текстильной промышленности для этих целей применяют *Bacillus spp.*

Чистка – это процесс удаления нецеллюлозных соединений из волокна, чтобы сделать его более гидрофильным перед окрашиванием. Пектатлиаза (ЕС 4.2.2.2) из *Bacillus* оказалась наиболее эффективной для разложения пектина в хлопке и, таким образом, наиболее эффективна для удаления восков, масел и других примесей. Вычищенную хлопчатобумажную ткань нужно отбелить перед окрашиванием. Отбеливание можно проводить с использованием

перекиси водорода, но данный метод требует дополнительных технологических операций. Наиболее перспективным методом отбеливания тканей является использование грибных каталаз (ЕС 1.11.1.6), полученных из *Aspergillus*, *Scytalidium* и *Thermoascus spp* [6].

Целлюлазы (ЕС 3.2.1.4) также часто используются в текстильной промышленности. Они предотвращают истирание тканей и сохраняют яркость цвета. Грибная целлюлаза из *Trichoderma reesei* оказалась очень эффективной для этих целей.

### Целлюлозно-бумажная промышленность

Бумагу производят из древесины. Три полимера составляют основу компонентов древесины: целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Первым шагом производства бумаги является формирование целлюлозы, содержащей свободные волокна. Целлюлозу необходимо подвергнуть процессу отбеливания, прежде чем ее можно будет использовать для производства бумаги. Само отбеливание обычно основано на использовании химических отбеливающих агентов, но предварительная обработка целлюлозы ксиланазами оказывает усиленное отбеливающее действие. Ксиланазы открывают структуру гемицеллюлозы и, таким образом, высвобождают связанные лигнин и лигнин-углеводные комплексы. Таким образом, становится возможным удалять больше лигнина, и древесина становится более восприимчивой к отбеливающим компонентам. В промышленном масштабе используется несколько ксиланаз (ЕС 3.2.1.8) грибкового происхождения, например *Trichoderma spp.*, *Aspergillus spp.* и *Thermomyces spp.*

Бумага также может быть покрыта крахмалом для улучшения глянца, гладкости и печатных свойств. В этом процессе используется модифицированный раствор крахмала низкой вязкости. Пониженная вязкость может быть получена с использованием  $\alpha$ -амилаз (ЕС 3.2.1.1). Амилазы могут также применяться в процессе переработки бумаги [7]. Они эффективно разлагают крахмальное покрытие и тем самым высвобождают частицы краски с поверхности волокна. Целлюлазы (ЕС 3.2.1.4) также повышают эффективность удаления краски путем дефибрилляции микрофибрилл, прикрепленных к чернилам.

### Кожевенная промышленность

Ферменты всегда были неотъемлемой частью при изготовлении кожи и изделий из кожи.

Сырая шкура подготавливается к дублению с помощью ряда подготовительных этапов. Ферменты играют важную роль в некоторых из этих процессов.

Грибные протеазы используются на стадии мягчения в кожевенном производстве для повышения поглощения воды кожевенным материалом. Липаза используется для диспергирования жира, обеспечивая тем самым синергетический эффект, их вводят на стадии обезжиривания [8], [9].

### Производство кормов

Добавление в корм ферментов повышает их усвояемость скотом. Зерновые культуры составляют основной компонент в корме для животных, но кишечная флора нежвачных животных, например свиней и птицы не производят эндогенных ферментов, необходимых для разложения содержащихся в них волокон. Кроме того, присутствие некрахмальных полисахаридов препятствует пищеварению, и их удаление, таким образом, повышает усвояемость корма. Ксиланазы (ЕС 3.2.1.8; рис. 3) являются широко используемыми кормовыми ферментами и разлагают ксилановую структуру клеточных стенок растений до короткоцепочечных сахаров [10].

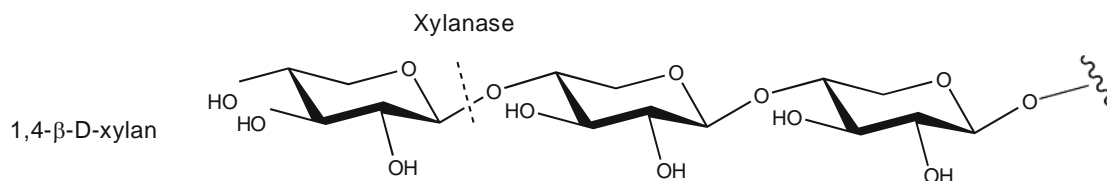


Рис. 3 – Эндогидролиз ксиланов под действием ксилазы [11]

Ксиланазы вырабатывают из *Trichoderma spp.* и *Aspergillus spp.*  $\beta$ -глюканазы (ЕС 3.2.1.6, рис. 4) разрушают структуру  $\beta$ -глюкана, содержащегося в некоторых зерновых культурах, с образованием свободной глюкозы и олигосахаридов.  $\beta$ -глюканазы грибкового происхождения (*Trichoderma spp.* и *Aspergillus spp.*) также часто используются в технологии производства кормов [11], [12].

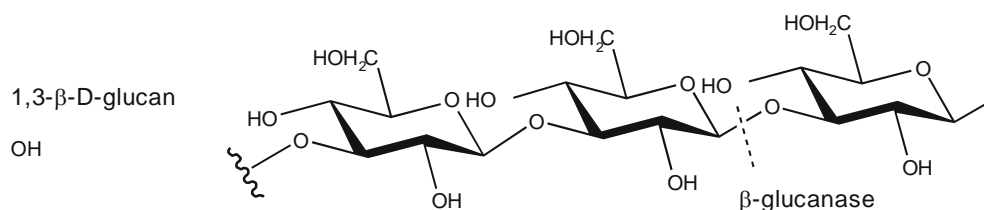


Рис. 4 – Эндогидролиз 1,3- $\beta$ -D-глюканах под действием  $\beta$ -глюканазы [11]

Для повышения усвояемости фосфора в кормах используют фитазы. Фосфор используется для формирования и поддержания скелета и участвует во многих обменных процессах. Два типа фитаз (рис. 5), 3-фитаза (ЕС 3.1.3.8) и 6-фитаза (ЕС 3.1.3.26), получают из мицелиальных грибов - *Aspergillus spp.*, *Peniophora spp.*

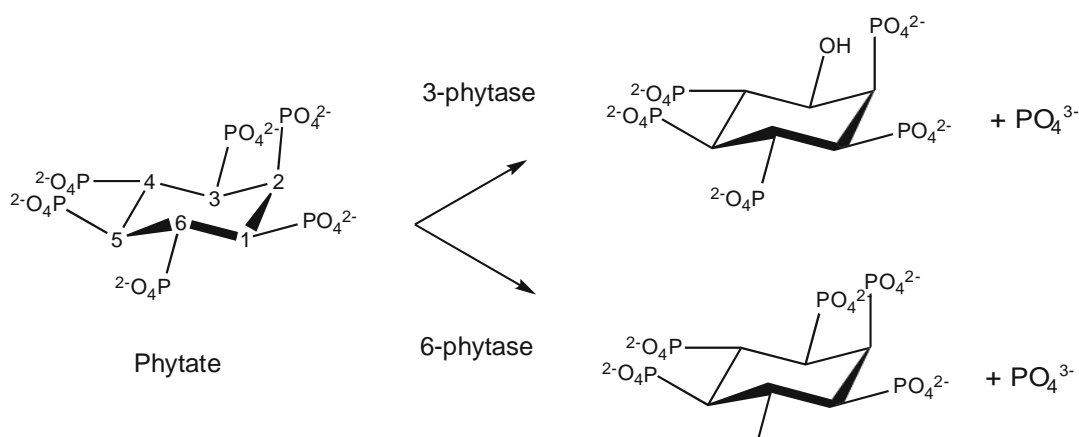


Рис. 5 – 3-фитаза и 6-фитаза [11]

### Производство биотоплива

На сегодняшний день разрабатываются многочисленные технологии, которые позволят получать энергию из возобновляемых источников. Примером является получение этанола из биомасс. Процесс преобразования биомассы в биотопливо включает в себя применение различных бактериальных и грибных ферментов [13].

Сырьем для производства биотоплива может являться крахмал, получаемый из зерновых культур.

Крахмал традиционно подвергается «горячей обработке», которая позволяет обычным ферментам расщеплять крахмал на декстрины. Недавно был разработан альтернативный процесс «холодной варки» или процесс гидролиза сырого крахмала, названный *Bioin Project X (BPX)*, который исключает энергозатратный процесс высокотемпературной варки крахмала. В этом процессе гидролиза используется синергетический эффект между глюкоамилазами (EC 3.2.1.3) и  $\alpha$ -амилазами.

Обработанный крахмал затем подвергают осахариванию, в результате чего декстрины разлагаются до сбраживаемых сахаров, таких как глюкоза и мальтоза. Реакция катализируется глюкоамилазой и пуллулазой (EC 3.2.1.41) бактериального или грибного происхождения с выходом продукта – 95–97 %. Во время ферментации сахара превращаются в спирт дрожжами [14].

Одной из серьезных задач на сегодняшний день является разработка биотоплива второго поколения, получаемого из целлюлозной биомассы. Существует большой потенциал в использовании этой растительной биомассы для производства жидкого биотоплива. Растительная биомасса состоит в основном из клеточных стенок растений, как правило, 75 % из них представлены полисахаридами. Эти полимерные углеводы содержатся в сложной матрице, включающей не только кристаллическую целлюлозу, но также гемицеллюлозу и лигнин. Гемицеллюлозы и лигнин (вместе лигноцеллюлозы) препятствуют доступу целлюлолитических ферментов, что снижает эффективность производства этанола. Поэтому для производства биотоплива второго поколения потребуется большой спектр новых ферментов, включая целлюлазу и гемицеллюлазу. Значительная часть исследований направлена на разработку ферментативных и микробных препаратов для разложения лигноцеллюлозы, для повышения уровня сбраживаемых сахаров и увеличения конечного выхода этанола. Таким образом, этанол может быть получен из непищевой части биовозобновляемых источников, и он послужит альтернативой современным источникам топлива [15], [16].

### Биокатализ и органический синтез

Применение ферментов в органическом синтезе привело к созданию новых технологий в химической промышленности.

Наиболее распространенными ферментами для органического синтеза являются различные гидролазы, особенно липазы. Также используют и другие гидролазы в органическом синтезе – нитрилазы, эстеразы, амидазы и протеазы [17], [18].

### Заключение

Для получения ферментов часто используют различные микроорганизмы и мицелиальные грибы, среди которых можно выделить грамположительные бактерии рода *Bacillus*, нитчатые грибы рода *Aspergillus*, и другие виды микроорганизмов, такие как *Streptomyces*, *Trichoderma* и *Penicillium*. Микробиальные ферменты имеют ряд преимуществ, по сравнению с ферментами, полученными из растений или животных, например, широкий спектр каталитических активностей, недорогое производство, биоразлагаемость и высокая воспроизводимость. Нет сомнений в том, что в ближайшем будущем использование ферментов значительно расширится в таких областях, как биотехнология, переработка сельскохозяйственной продукции, производство биотоплива, производство кормовых добавок для животных.

**Финансирование**

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011

**Funding**

The work was supported by Act 211 of the Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0011.

**Конфликт интересов**

«Не указан»

**Conflict of Interest**

«None declared»

**Список литературы / References**

1. Martinez-Anaya M.A. Enzymes and bread flavor / Martinez-Anaya M.A. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 1996. – v. 44. – P. 2469–2480.
2. Bamforth C.W. Current perspectives on the role of enzymes in brewing / Bamforth C.W. // Journal of Cereal Science. – 2009. – v. 50. – P. 353–357.
3. Mamo J. The role of microbial aspartic protease enzyme in food and beverage industries / Mamo J., Assefa F. // Journal of Food Quality. – 2018. – v. 2018. – 15 p.
4. Souza P.M. A biotechnology perspective of fungal proteases / Souza P.M., Bittencourt M.L., Caprara C.C., Freitas M., et al. // Brazilian Journal of Microbiology. – 2015. – v. 46(2). – P. 337–346.
5. Bhat M.K. Cellulose degrading enzymes and their potential industrial applications / Bhat M.K., Bhat S. // Biotechnology Advances. – 1997. – v. 15. – P. 583–620.
6. Mienda B.S. An overview of microbial proteases for industrial applications / Mienda B.S., Yahya A., Galadima I.A., Shamsir M.S. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2014. – v. 5(1). – P. 388–396.
7. Adrio J.I. Microbial enzymes: tools for biotechnological processes / Adrio J.I., Demain A.L. // Biomolecules. – 2014. – v. 4. – P. 117–139.
8. Mikhailova R.V. Proteolytic enzymes of mycelial fungi / Mikhailova R.V. // Microbiology and Biotechnology. – 2011. – v. 3. – P. 47–62.
9. Gupta R. Molecular and functional diversity of yeast and fungal lipases: their role in biotechnology and cellular physiology / Gupta R., Kumari A., Syal P., Singh Y. // Progress in Lipid Research. – 2015. – v. 57. – P. 40–54.
10. Van den Brink J. Fungal enzyme sets for plant polysaccharide degradation / Van den Brink J., De Vries R.P. // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2011. – v. 91. – P. 1477–1492.
11. Lei X.G. Phytase, a new life for an «old» enzyme / Lei X.G., Weaver J.D., Mullaney E., Ullah A.H., Azain M.J. // Annual Review of Animal Biosciences. – 2013. – v. 1. – P. 283–309.
12. Costa F.G.P. Economic and environmental impact of using exogenous enzymes on poultry feeding / Costa F.G.P., Goulart C.C., Figueiredo D.F., Oliveira C.F.S., Silva J.H.V. // International Journal of Poultry Science. – 2008. – V. 7(4). – P. 311–314.
13. Xu X. Modification of oils and fats by lipase-catalyzed interesterification: aspects of process engineering / Xu X. // In: Bornscheuer U.T. (ed) Enzymes in lipid modification. – Wiley-VCH. – 2005. – pp. 190–215.
14. Ellaiah P. A review on microbial alkaline proteases / Ellaiah P. // Journal of Scientific and Industrial Research. – 2002. – v. 61. – P. 690–704.
15. Sharma K.K. Fungal genome sequencing: basic biology to biotechnology / Sharma K.K. // Critical Reviews in Biotechnology. – 2016. – v. 36(4). – P. 743–759.
16. Meyer V. Genetic engineering of filamentous fungi – progress, obstacles and future trends / Meyer V. // Biotechnology Advances. – 2008. – v. 26. – P. 177–185.
17. Bothast R.J. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol / Bothast R.J., Schlicher M.A. // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2005. – v. 67. – P. 19–25.
18. Demain A.L. Biosolutions to the energy problem / Demain A.L. // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. – 2009. – v. 36. – P. 319–332.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.014>**ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ПОМОЛА ПШЕНИЧНОЙ МУКИ НА ЕЁ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Научная статья

**Шершнева П.С.<sup>1</sup>, Тимошенкова И.А.<sup>2</sup>, Москвичева Е.В.<sup>3,\*</sup>**<sup>2</sup>ORCID: 0000-0003-4917-0556;<sup>3</sup>ORCID: 0000-0003-4687-3483;<sup>1, 2, 3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\*Корреспондирующий автор (moskvicheva\_ev[at]spbstu.ru)

**Аннотация**

Целью данной работы является изучение технологических характеристик чешской пшеничной муки различного помола (mouka hladká pšeničná světlá (производитель «Babiččina volba»), polohrubá pšeničná mouka, hrubá pšeničná mouka (производитель «RAMILL»)), а также подбор аналогичного продукта, производимого на территории России, по технологическим функциям.

Исследования проведены в лаборатории Высшей школы биотехнологий и пищевых производств по стандартным методикам. Для комплексной оценки качества сырья и готовой продукции определяли органолептические и физико-химические показатели.

В результате проведенных исследований был сделан вывод, что степень помола влияет на качество, количество клейковины, кислотность, жиросвязывающую способность.

**Ключевые слова:** пшеничная мука, степень помола, технологические характеристики, Чехия.

**INFLUENCE OF THE GRINDING OF WHEAT FLOUR ON ITS TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS**

Research article

**Shershneva P.S.<sup>1</sup>, Timoshenkova I.A.<sup>2</sup>, Moskvicheva E.V.<sup>3,\*</sup>**<sup>2</sup>ORCID: 0000-0003-4917-0556;<sup>3</sup>ORCID: 0000-0003-4687-3483;<sup>1, 2, 3</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia

\*Corresponding author (moskvicheva\_ev[at]spbstu.ru)

**Annotation**

Purposes of this work are research of technological characteristics of Czech wheat flour of various milling (mouka hladká pšeničná světlá (manufacturer «Babiččina volba»), polohrubá pšeničná mouka, hrubá pšeničná mouka (manufacturer «RAMILL»)), as well as the selection of a similar product produced on the territory of Russia according to technological functions.

The research was carried out in the laboratory of Graduate School of Biotechnology and Food Production according to standard methods. Organoleptic and physical-chemical indices were determined for complex assessment of raw materials and finished products.

The result of studies concluded that the degree of milling influences upon the quality and quantity of gluten, acidity, fat-binding capacity.

**Keywords:** wheat flour, grinding, characteristics, Czech Republic.

**Введение**

В странах Европы, Америке и Канаде существует классификация муки, которая зависит от свойств, необходимых для производства того или иного кондитерского изделия. В разных странах – разные показатели, по которым классифицируют продукт переработки пшеницы [8]. В отличие от запада в России отсутствует подобная классификация, а для производства мучных кондитерских изделий используют хлебопекарную муку высшего сорта.

В США и Англии для приготовления печенья используется «pastry flour» - кондитерская мука, которую производят из мягких сортов пшеницы [11].

Во Франции для этой цели используют муку с маркировкой «Т55». Этот тип муки практически универсален, а его зольность составляет 0,55% [13].

В Чехии мука классифицируется по степени помола и типовому номеру. Там существуют три основных вида муки: Т400 – «hladká» («гладкая», т.е. мелкий помол), Т450 – «polohrubá» («полугрубая» – средний помол) и Т530 – «hrubá» («грубая» – крупный помол). Эти типы используются для приготовления тортов, хлебобулочных изделий и традиционных десертов соответственно [12].

На качество мучных кондитерских изделий влияет степень помола муки. При производстве изделий из муки мелкого помола процессы сахаро- и газообразования протекают более интенсивно [9]. Крупные частицы муки имеют небольшую удельную поверхность, из-за чего площадь соприкосновения муки с водой также небольшая, что является причиной уменьшения влажности теста [7].

В отличие от западных стран, в Российской Федерации нет классификации муки по типам для производства тех или иных кондитерских изделий. Это существенно затрудняет работу технологов, так как сложно получать изделия стабильно высокого качества. Помимо этого, в нашей стране практически невозможно найти муку разного помола на полках магазинов. В связи с этим актуальность данной работы заключается в исследовании пшеничной муки импортного производства и подборе аналогичного сырья российского производителя по технологическим характеристикам.



В качестве объектов исследования были выбраны: чешская пшеничная мука различного помола (mouka hladká pšeničná světlá (производитель «Babiččina volba»), polohrubá pšeničná mouka, hrubá pšeničná mouka (производитель «RAMILL»)).

#### Методы и принципы исследования

- отбор проб и подготовка их к анализу – ГОСТ 5904 [5];
- массовая доля влаги пшеничной муки – ГОСТ 9404 [6];
- кислотность – ГОСТ 27493 [2];
- определение количества и качества клейковины пшеничной муки – ГОСТ 27839 [4];
- автолитическая активность – ГОСТ 27495 [3].

Также были определены следующие показатели: водо- и жиросвязывающие способности пшеничной муки разных степеней помола.

Чтобы определить эти показатели, навески (массой 0,25 г) пшеничной муки помещали в пробирку, затем добавляли 7,5 г воды или жира и центрифугировали со скоростью 3000 об/мин в течение 15 минут.

После центрифугирования жидкость из пробирки выливали и оставляли её в наклонном положении на фильтровальной бумаге на 10 минут, чтобы избавиться от лишней влаги, а затем – взвешивали.

#### Основные результаты

Количество влаги в муке имеет большое значение. При повышенной влажности есть риск развития микроорганизмов, которые не только способны вызвать порчу сырья, но и повлиять на качество будущего изделия. В процессе проведения исследования был определен данный показатель у пшеничной муки. Результаты представлены на рисунке 1.

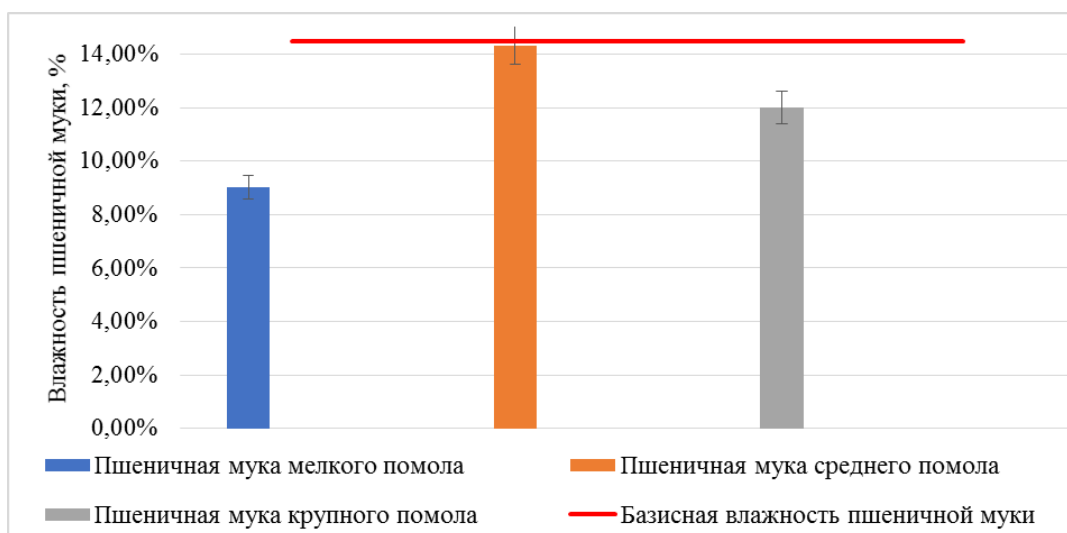


Рис. 1 – Влажность пшеничной муки

Как видно на рисунке 1, все показатели не превышают базисной влажности муки, которая равна 14,5%. Массовая доля влажности муки мелкой степени помола – 9,02%. Влажность муки крупного помола составляет 12%. Пшеничная мука среднего помола имеет наибольший показатель, равный 14,33%.

Кислотность – показатель, по которому можно определить свежесть муки. Как правило, повышенная кислотность обуславливается неправильными условиями хранения. Результаты этого исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Кислотность пшеничной муки и томатного криопорошка

| Исследуемый образец                                | Кислотность, °Т |
|--|-----------------|
| Пшеничная мука мелкого помола                      | 5,30±0,2        |
| Пшеничная мука среднего помола                     | 3,50±0,2        |
| Пшеничная мука крупного помола                     | 2,44±0,2        |
| Контрольный образец (пшеничная мука высшего сорта) | 4,00±0,2        |

Изучив данные, представленные в таблице 1, можно предположить, что степень помола влияет на кислотность муки. Пшеничная мука мелкого помола имеет наивысший показатель, который в 1,5 раза превышает показатель муки среднего помола и в 2 раза – муки крупного помола. Таким образом, можно сделать вывод, что чем крупнее частицы муки, тем меньше показатель кислотности.

Клейковина – комплекс белковых веществ, образующих эластичную массу при набухании в воде. Качество клейковины характеризуется её цветом, растяжимостью, эластичностью. В таблице 2 представлены результаты исследования муки на качество и количество клейковины.

Таблица 2 – Количество и качество клейковины в пшеничной муке разного помола

| Исследуемый образец            | Количество клейковины, % | Качество клейковины  |
|--------------------------------|--------------------------|--|
| Пшеничная мука мелкого помола  | 44,0±0,1                 | Светлый цвет сырой клейковины. Растяжимость средняя – 17 см. Хорошая эластичность. |
| Пшеничная мука среднего помола | 32,0±0,1                 | Светлый цвет сырой клейковины. Растяжимость средняя – 13 см. Хорошая эластичность. |
| Пшеничная мука крупного помола | 25,0±0,1                 | Светлый цвет сырой клейковины. Растяжимость короткая – 8 см. Хорошая эластичность. |

В результате этого исследования было выявлено, что степень помола оказывает влияние на количество клейковины. Чем крупнее помол и размеры частиц муки, тем в более доступной форме находится клейковина и большее её количество вымывается.

При проведении экспериментов также был определен показатель, характеризующий способность водно-мучной смеси при нагреве образовывать водорастворимые вещества (см. рисунок 2).

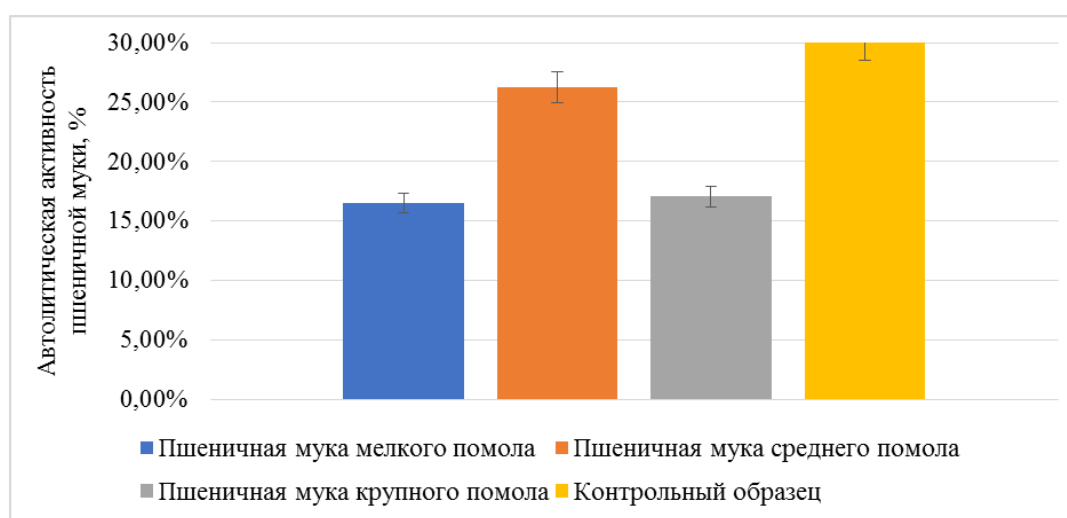


Рис. 2 – Автолитическая активность пшеничной муки и томатного криопорошка

Показатели автолитической активности чешской муки соответствуют показателю пшеничной муки высшего сорта российского производства. В связи с этим можно сделать вывод, что активность  $\alpha$ -амилазы не повышена и при замесе теста крахмал будет полностью гидролизован, а автолитический процесс его разложения будет проходить с умеренной скоростью.

Были установлены показатели водо- и жиросвязывающей способности (см. рисунок 3).

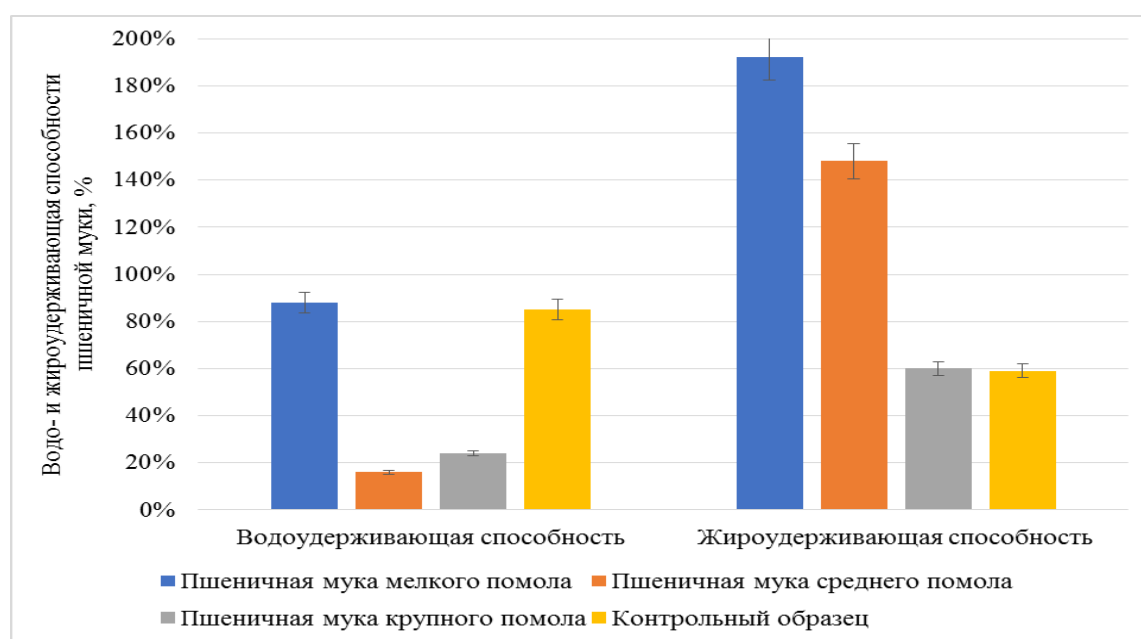


Рис. 3 – Водо- и жирсвязывающая способность пшеничной муки и томатного криопорошка

Согласно приведенным данным, водоудерживающая способность пшеничной муки мелкого помола равна 88%. Этот показатель в несколько раз превышает показатели муки среднего и крупного помола, равные 16% и 24% соответственно. Такое высокое значение может повлиять на водопоглотительную способность будущего изделия.

Изучив результаты исследования жиродерживающей способности объектов исследования, можно предположить, что этот показатель зависит от степени помола муки. Чем меньше её частицы, тем выше жиродерживающая способность.

На основе проведенных исследований была составлена таблица сопоставления (см. таблицу 3) чешской и российской пшеничной муки.

Таблица 3 – Сопоставление чешской и российской пшеничной муки

| Чехия  | Россия      | Свойства                     |
|--|-------------|------------------------------|
| MOUKA HLADKÁ PŠENIČNÁ SVĚTLÁ 00 EXTRA<br>(пшеничная мука мелкого помола) | Высший сорт | Количество клейковины – 44 % |
| POLOHRUBÁ PŠENIČNÁ MÚKA VÝBEROVÁ<br>(пшеничная мука среднего помола)     | Экстра      | Количество клейковины – 32 % |
| HRUBÁ PŠENIČNÁ MÚKA<br>(пшеничная мука грубого помола)                   | Второй сорт | Количество клейковины – 25 % |

Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемые образцы пшеничной муки соответствуют требованиям нормативных документов [1], [9].

### Заключение

Степень помола влияет на такие показатели, как кислотность, количество и качество клейковины и жиросвязывающая способность. Чем меньше помол, тем больше кислотность и жиросвязывающая способность пшеничной муки. Чем более крупные частицы муки, тем в более доступной форме находится клейковина и большее её количество вымывается.

В результате исследования автолитической активности чешской муки было установлено, что активность  $\alpha$ -амилазы не повышена и при замесе теста крахмал будет полностью гидролизован.

На основе данных, полученных при исследовании качества и количества клейковины, а также нормативных документов, была составлена таблица сопоставления чешской и российской муки.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. ГОСТ 26574-2017. Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия. – Введ. 2019-01-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.
2. ГОСТ 27493-87 Мука и отруби. Метод определения кислотности по болтушке (с Изменением N 1). – Введ. 1989-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 4 с.
3. ГОСТ 27495-87 Мука. Метод определения автолитической активности (с Изменением N 1). – Введ. 1989-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 4 с.
4. ГОСТ 27839-2013 Мука пшеничная. Метод определения количества и качества клейковины (с Поправкой). – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 17 с.
5. ГОСТ 5904-82 Изделия кондитерские. Правила приемки, методы отбора и подготовки проб (с Изменением N 1). – Введ. 1984-01-01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 9 с.
6. ГОСТ 9404-88 Мука и отруби. Метод определения влажности (с Изменением N 1). – Введ. 1990-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 5 с.
7. Долматова И.А. Влияние характеристик основного сырья для производства мучных кондитерских изделий на качество готовой продукции / И.А. Долматова, М.Д. Лаптева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования – 2016. – Т. 1. – С. 241-244.
8. Иоргачева Е.Г. Использование муки из мягкозерной пшеницы при производстве различных групп мучных кондитерских изделий / Е.Г. Иоргачева, О.В. Макарова, Е.В. Хвостенко и др. // Пищевая наука и технология – 2013. – №1. – Т.22. – С. 24-28.
9. Михайлов Е.В., Попова Н.В. Исследование качества муки, используемой для производства мучных кондитерских изделий: выпускная квалификационная работа: ЮУрГУ – 080401.2017.137.ВКР / Е.В. Михайлов, Н.В. Попова. – Челябинск, 2017. – 78 с.
10. Fyzikální a chemické požadavky na mouku [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-18/zeni-20200201#p13\\_p13-1-1](https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-18/zeni-20200201#p13_p13-1-1). (дата обращения 31.05.2020).
11. Green Scott. What's the difference between all-purpose flour, bread flour and cake flour? [Электронный ресурс] – URL: <https://devilsfoodkitchen.com/talk-amongst-yourselfes/>. (Дата обращения 30.04.2020).
12. Druhy a typu pšeničných mouk [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.babiccinaovolba.cz/encyklopedie-mouky/druhy-a-typu-psenicnych-mouk/#part2>. (дата обращения 31.05.2020).
13. Farine T55, farine T45: faire la différence entre les farines et quel type de farine utiliser pour chaque pâtisserie? [Электронный ресурс]. – URL: <http://conseils-cap-patisserie.fr/farine-t55-t45-et-autres/>. (дата обращения 16.02.2020).

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

1. GOST 26574-2017. Muka pshenichnaja hlebopekarnaja. Tehnicheskie uslovija [Baking wheat flour. Technical specifications]. – Vved. 2019-01-01. – M.: Standartinform, 2017. – 11 p. [in Russian]
2. GOST 27493-87 Muka i otrubi. Metod opredelenija kislotnosti po boltushke (s Izmeneniem N 1) [Flour and bran. Method for determination of acidity by a talker (with Change N 1)]. – Vved. 1989-01-01. – M.: Standartinform, 2007. – 4 p. [in Russian]
3. GOST 27495-87 Muka. Metod opredelenija avtoliticheskoj aktivnosti (s Izmeneniem N 1) [Flour. Method for determining autolytic activity (with Change N 1)]. – Vved. 1989-01-01. – M.: Standartinform, 2007. – 4 p. [in Russian]
4. GOST 27839-2013 Muka pshenichnaja. Metod opredelenija kolichestva i kachestva klejkoviny (s Popravkoj) [Wheat flour. Methods for determining the quantity and quality of gluten (as amended)]. – Vved. 2014-07-01. – M.: Standartinform, 2014. – 17 p. [in Russian]
5. GOST 5904-82 Izdelija konditerskie. Pravila priemki, metody otbora i podgotovki prob (s Izmeneniem N 1) [Confectionery. Acceptance rules, sampling and preparation methods (with Change N 1)]. – Vved. 1984-01-01. – M.: Standartinform, 2010. – 9 p. [in Russian]
6. GOST 9404-88 Muka i otrubi. Metod opredelenija vlazhnosti (s Izmeneniem N 1). [Flour and bran. Humidity determination method (with Change N 1)]. – Vved. 1990-01-01. – M.: Standartinform, 2007. – 5 p. [in Russian]
7. Dolmatova I.A. Vlijanie harakteristik osnovnogo syr'ja dlja proizvodstva muchnyh konditerskih izdelij na kachestvo gotovoj produkcii [Influence of characteristics of main raw materials for production of flour confectionary products on quality of finished products] / I.A. Dolmatova, M.D. Lapteva // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija [Current problems of modern science, technology and education] – 2016. – V. 1. – P. 241-244. [in Russian]
8. Iorgacheva E.G. Ispol'zovanie muki iz mjagkozernoj pshenicy pri proizvodstve razlichnyh grupp muchnyh konditerskih izdelij [The use of flour from soft grain wheat in the production of various groups of flour confectionery products] / E.G. Iorgacheva, O.V. Makarova, E.V. Hvostenko and others // Pishhevaja nauka i tehnologija [Food science and technology] – 2013. – №1. – V.22. – P. 24-28. [in Russian]
9. Mihajlov E.V., Popova N.V. Issledovanie kachestva muki, ispol'zuemoj dlja proizvodstva muchnyh konditerskih izdelij [Study of the quality of flour used for the production of flour confectionery products]: graduation qualification work: JuUrGU – 080401.2017.137.VKR / E.V. Mihajlov, N.V. Popova. – Cheljabinsk, 2017. – 78 p. [in Russian]
10. Fyzikální a chemické požadavky na mouky [Physical and chemical requirements for flour] [Electronic resource]. – URL: [https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-18/zneni-20200201#p13\\_p13-1-1](https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-18/zneni-20200201#p13_p13-1-1). (accessed: 31.05.2020). [in Czech]
11. Green Scott. What's the difference between all-purpose flour, bread flour and cake flour? [Electronic resource]. – URL: <https://devilsfoodkitchen.com/talk-amongst-yourselves/>. (accessed: 30.04.2020). [in English]
12. Druhy a typy pšeničných mouk [Types of wheat flour] [Electronic resource]. – URL: <https://www.babycinavolba.cz/encyklopedie-mouky/druhy-a-typy-psenicnych-mouk/#part2>. (accessed: 31.05.2020). [in Czech]
13. Farine T55, farine T45: faire la différence entre les farines et quel type de farine utiliser pour chaque pâtisserie? [T55 flour, T45 flour: make the difference between flours and what kind of flour to use for each pastry?] [Electronic resource]. – URL: <http://conseils-cap-patisserie.fr/farine-t55-t45-et-autres/>. (accessed: 16.02.2020). [in French]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.015>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Научная статья

**Анашкина П.Ж.<sup>1</sup>, Москвичева Е.В.<sup>2,\*</sup>, Тимошенкова И.А.<sup>3</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-4687-3483;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-4917-0556;<sup>1, 2, 3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (moskvicheva\_ev[at]spbstu.ru)

**Аннотация**

Изучена целесообразность использования конопляной муки, черемуховой муки и муки из бурого риса в производстве хлебобулочных изделий и исследовано их влияние на потребительские свойства готового продукта. Проведены исследования органолептических и физико-химических показателей готовых бородинского хлеба. Из анализа проведенных исследований установлена закономерность изменения органолептических показателей готового хлебобулочного изделия в зависимости от содержания конопляной и черемуховой муки. Введение в рецептуру конопляной муки в количестве от 40 % до 50 %, черемуховой муки – 10 % до 20 %, муки из бурого риса – от 45 % до 55 % обеспечивает высокие потребительские свойства готовой продукции.

**Ключевые слова:** целиакия, мука из бурого риса, черемуховая мука, конопляная мука, бородинский хлеб.

**USING NON-TRADITIONAL TYPES OF VEGETABLE RAW MATERIALS IN BAKERY PRODUCTS**

Research article

**Anashkina P.Zh.<sup>1</sup>, Moskvicheva E.V.<sup>2,\*</sup>, Timoshenkova I.A.<sup>3</sup>**<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-4687-3483;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-4917-0556;<sup>1, 2, 3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

\*Corresponding author (moskvicheva\_ev[at]spbstu.ru)

**Abstract**

The authors study the feasibility of the use of such products as hemp flour, cherry tree flour, and brown rice flour in bakery, as well as their effect on the consumer properties of the finished product. The research of organoleptic and physicochemical parameters of finished pumpernickel bread was carried out. Based on the analysis of the study, the pattern of organoleptic characteristics of the finished bakery product was established, depending on the content of hemp and bird cherry flour. The introduction of hemp flour in an amount of from 40% to 50%, cherry tree flour – from 10% to 20%, and brown rice flour – from 45% to 55 provides high consumer properties of the finished product.

**Keywords:** coeliacia, brown rice flour, cherry tree flour, hemp flour, pumpernickel bread.

**Введение**

В настоящее время часть населения России нуждается в специализированных продуктах питания. Одной из таких групп являются продукты, которые не содержат в своём составе белок злаковых культур, причиной этого является целиакия или глютенная энтеропатия [1], [6], [9]. Однако, продукты и изделия, не содержащие глютен производятся в стране в малых количествах и небольшим ассортиментом [2], [8], [10].

Российский рынок представлен небольшим ассортиментом безглютеновой продукции по сравнению с зарубежными странами и стоимость такой продукции намного превышает цены на классическую продукцию. В связи с этим основную долю на отечественном рынке занимает продукция импортного производства, зарубежные компании предлагают широкий ассортимент продукции [7]. Выпуск отечественных безглютеновых продуктов до сих пор не налажен, в основном это продукты мукомольной промышленности [9].

Чаще всего для безглютеновых хлебобулочных изделий используют картофельный, кукурузный крахмал, кукурузную и рисовую муку. Замена муки пшеничной на рисовую и кукурузную муку способствует увеличению сроков хранения хлебобулочных изделий [3].

Однако, есть другие виды муки, такие как конопляная мука, черемуховая мука и мука из бурого риса, которые богаты витаминами и минералами, благотворно влияют на организм человека и прекрасно подходят для аглютеновых диет.

Целью работы являлось разработка рецептуры и технологии безглютеновых хлебобулочных изделий с использованием безглютеновой мучной смеси. В рамках поставленной цели сформулированы следующие задачи: определить оптимальное соотношение конопляной, черемуховой муки и муки из бурого риса для приготовления бородинского хлеба; исследовать безглютеновые выпеченные хлебобулочные изделия с оптимальным соотношением мучной смеси по органолептическим и физико-химическим показателям.

В качестве объекта исследования был выбран бородинский хлеб по сборнику рецептов на хлеб и хлебобулочные изделия с полной заменой ржаной и пшеничной муки на конопляную, черемуховую муку и муку из бурого риса [5].

**Методы и принципы исследования**

Готовые хлебобулочные изделия были исследованы по органолептическим (внешний вид, текстура, цвет, запах, вкус) и физико-химическим показателям по следующим стандартным методикам: пористость хлебобулочных изделий – ГОСТ 5669 [4]; плотность выпеченных безглютеновых изделий – ГОСТ 5669 [4]; упёк выпеченных безглютеновых изделий.

Органолептический анализ безглютеновых хлебобулочных изделий производили по пятибалльной шкале. Для сравнительной органолептической оценки была разработана система показателей, которая включает в себя внешний вид, цвет, текстуру, запах, вкус.

Были выбраны девять образцов со следующим соотношением из конопляной муки, черемуховой муки и муки из бурого риса для определения оптимального соотношения представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношения безглютеновых видов муки

| Объект исследования | Хлеб на основе безглютеновой муки |                     |                        |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|
|                     | Конопляная мука, %                | Черемуховая мука, % | Мука из бурого риса, % |
| Образец №1          | 65,00                             | 10,00               | 25,00                  |
| Образец №2          | 50,00                             | 15,00               | 35,00                  |
| Образец №3          | 50,00                             | 5,00                | 45,00                  |
| Образец №4          | 80,00                             | 15,00               | 5,00                   |
| Образец №5          | 43,00                             | 10,00               | 47,00                  |
| Образец №6          | 65,00                             | 17,07               | 17,93                  |
| Образец №7          | 86,21                             | 10,00               | 3,79                   |
| Образец №8          | 65,00                             | 2,93                | 32,07                  |
| Образец №9          | 80,00                             | 5,00                | 15,00                  |

Выпечка изделий производилась при температуре 200 – 220 °С и относительной влажностью 30 – 40 % в течение 25 минут.

Установлено, что образцы с большим количеством конопляной муки имели небольшой подъем и непористый мякиш, с небольшими дефектами поверхности, также ощущалось небольшое похрустывание, из-за крупного помола конопляной муки. В ходе органолептической оценки готовых изделий было установлено, что у образцов № 2, 3, 5 намного выше показатели чем у других образцов. Внешний вид и текстура у остальных образцов имеет дефекты поверхности (трещины) и плотный мякиш.

Для дальнейшего исследования были выбраны образцы № 2, 3, 5, 8, обладающие наилучшими органолептическими показателями.

### Результаты и обсуждение

Одним из важных показателей хлебобулочных изделий является такой показатель как степень подъема дрожжевого теста и упек. Основная причина упека заключается в испарении влаги при образовании корочки. Повышение упека приводит к утолщению корочки и снижению выхода изделия. Показатели степени подъема дрожжевого теста и упека хлебобулочных изделий приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Степень подъема теста и упёк безглютенового бородинского хлеба

| Вид бородинского хлеба в зависимости от соотношения | Степень подъема безглютенового дрожжевого теста, % | Упек хлебобулочных изделий, % |
|---|--|-------------------------------|
| Образец №2  | 64,4 ± 3,2   | 12,9 ± 0,6                    |
| Образец №3  | 66,7 ± 3,3   | 12,7 ± 0,6                    |
| Образец №5  | 68,7 ± 3,4   | 12,5 ± 0,6                    |
| Образец №8  | 57,5 ± 2,7   | 14,7 ± 0,7                    |

Установлено, что степень подъема безглютенового дрожжевого теста выше у пятого образца, остальные образцы, кроме номера восемь имеют близкие значения степени подъема. Образец под номером восемь имеет в своем составе большее количество конопляной муки из этого можно сделать вывод, что крупный помол данного вида муки отрицательно влияет на степень подъема теста.

Также из данных в таблице 2. видно, что упёк готовых изделий составил для всех образцов 2,3,5 в пределах от 12,5 % до 12,9 %, а большим упеком обладает образец под номером восемь, что означает небольшие потери при выпечке, и, как следствие, небольшие потери выхода изделий.

Одним из важных показателей качества готовых хлебобулочных изделий является плотность. Показатели плотности четырех выбранных образцов безглютенового бородинского хлеба с разным соотношением мучной смеси представлены на рисунке 1.

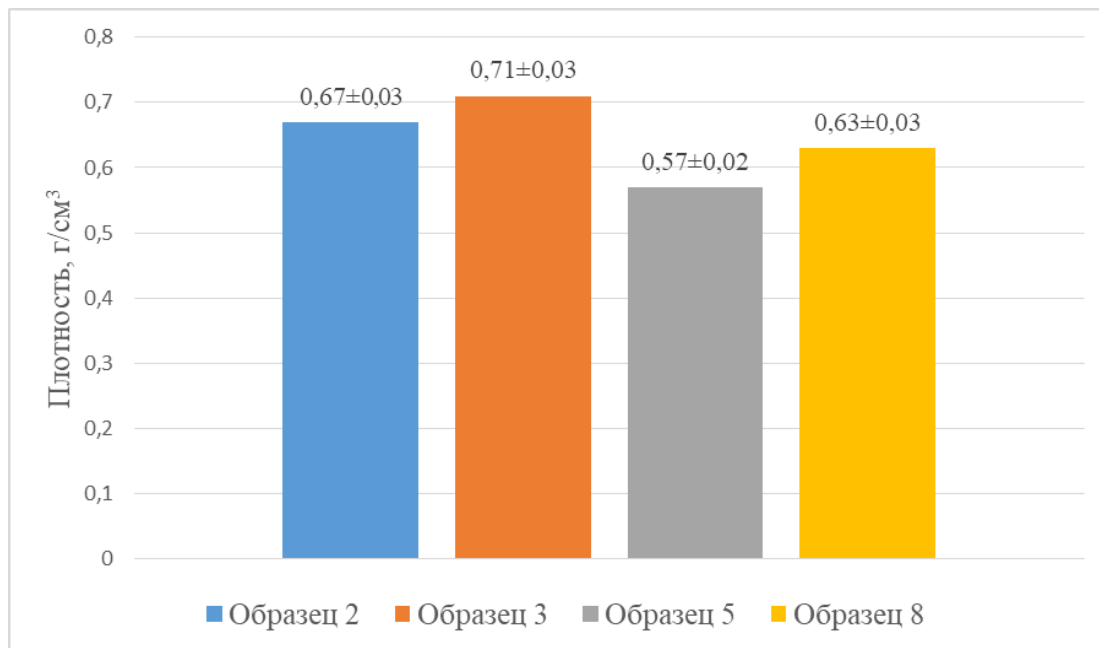


Рис. 1 – Зависимость плотности от соотношения мучных смесей

Выявлено, что показатель плотности у всех образцов приблизительно равный и составляет от 0,57 до 0,7 г/см³. Образец под номером три имеет самый высокий показатель плотности, а образец под номером пять обладает меньшей плотностью, которая является наиболее оптимальной для бородинского хлеба. Это может быть вызвано насыщенностью конопляной муки белками и жирами, за счет чего она становится более «тяжелой». Чем больше содержания конопляной муки, тем менее воздушным получается готовое изделие.

Показатели пористости четырех образцов безглютенового бородинского хлеба с разным соотношением мучной смеси представлены на рисунке 2.

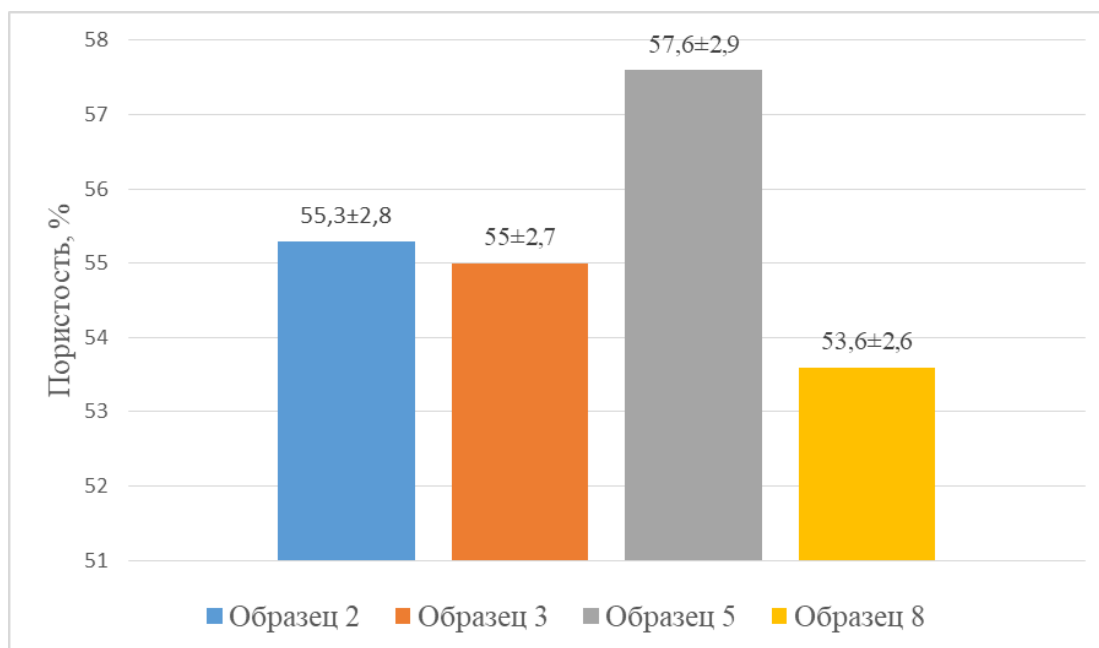


Рис. 2 – Зависимость пористости от соотношения мучных смесей

Данный показатель характеризует качество мякиша и его пористость, что в дальнейшем сказаться на технологических характеристиках готового хлебобулочного изделия. Наибольшим показателем пористости обладает образец под номером пять (57,6 %), образцы номер два и три обладают наименьшей пористостью.

Для обоснования параметров технологии производства хлебобулочных изделий из конопляной и черемуховой муки был выполнен полнофакторный эксперимент. В качестве частных факторов оптимизации выбраны соотношения из конопляной муки к черемуховой, а в качестве выходного параметра обобщенный органолептический показатель качества (ООПК).

На основе экспериментальных данных получено уравнение регрессии (1), характеризующее зависимость обобщенного органолептического показателя (Y) хлебобулочного изделия от содержания конопляной муки ( $X_1$ , %) и черемуховой муки ( $X_2$ , %) в смеси.

$$Y = 95,8 + 0,04x_1 + 0,043 - 0,003x_1^2 - 0,02x_1x_2 + 0,05x_2^2 \quad (1)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,97, а коэффициент детерминации полученного уравнения регрессии – 0,94, что подтверждает функциональную зависимость ООПК безглютенового хлебобучного изделия от содержания конопляной муки к черемуховой. Адекватность полученного уравнения регрессии подтверждена расчетным значением критерия Фишера, расчетное значение которого равен 14,1 и превышает табличное значение при заданных степенях свободы  $F_{0,05}=8,26$ .

Графическая интерпретация уравнения в виде кривых значений (рис. 3) и поверхности отклика (рис.4) ООПК хлебобучного изделия от содержания конопляной и черемуховой муки в смеси приведены на рисунках 3 и 4.

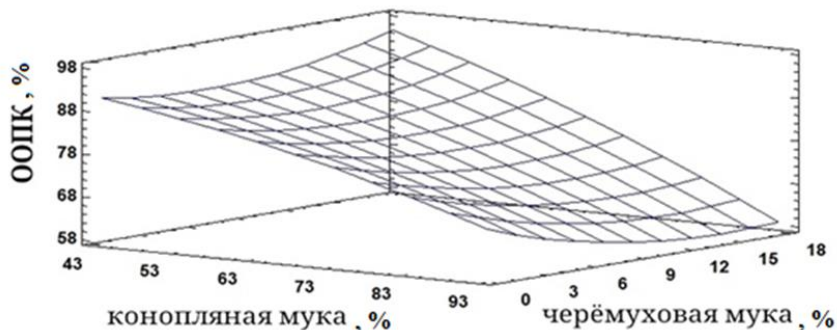


Рис. 3 – График кривых значений обобщенного органолептического показателя конопляной и черемуховой муки от содержания их в безглютеновой смеси

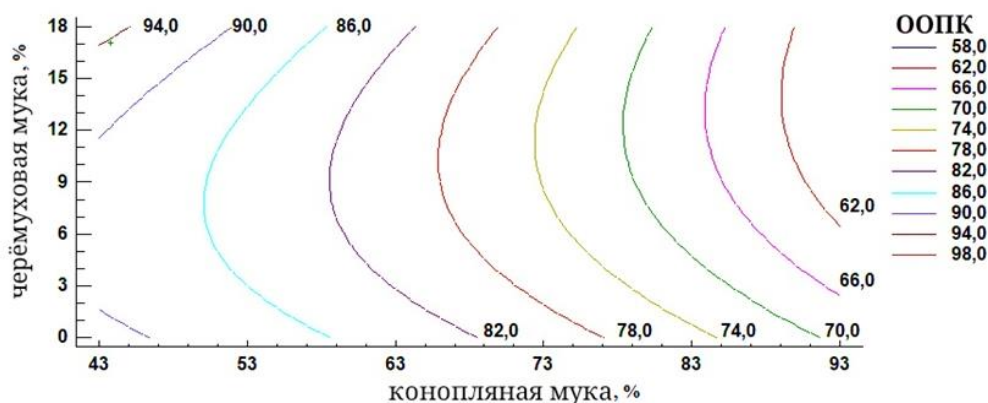


Рис. 4 – График поверхности отклика обобщенного органолептического показателя конопляной и черемуховой муки от содержания их в безглютеновой смеси

Анализ графиков показал, что с возрастанием содержания конопляной муки (от 65 %) и черемуховой муки (от 15 %) в безглютеновой смеси, обобщенный органолептический показатель хлебобучных изделий уменьшается. Таким образом, оптимальное содержание конопляной и черемуховой муки, с наилучшими органолептическими показателями, составило в количестве 47 % и 10 % соответственно, количество рис муки в данной смеси составило 43 %.

Исследование пищевой ценности полученного безглютенового бородинского хлеба подтвердило целесообразность применения безглютеновых видов муки в технологии хлебобучного изделия.

Для исследований химического состава и пищевой ценности безглютенового бородинского хлеба был выбран образец под номером пять с оптимальным соотношением мучной смеси (конопляная мука (43 %), черемуховая мука (10 %), мука из бурого риса (47 %)), представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Пищевая ценность бородинского хлеба в 100 г продукта

| Наименование изделия | Белки, г | Жиры, г | Углеводы, г | Калорийность, ккал |
|----------------------|----------|---------|-------------|--------------------|
| Образец №5           | 18,0     | 18,0    | 58,0        | 460                |

Установлено, что с увеличением количества конопляной муки в хлебобучное изделие, увеличивается количество белков и жиров. На количество углеводов влияет количественное содержание муки из бурого риса, она самая калорийная из всех видов муки, содержащихся в безглютеновом бородинском хлебе.

Содержание минеральных элементов и витаминов в безглютеновом бородинском хлебе представлено в таблице 4.



Таблица 4 – Содержание минеральных элементов и витаминов в бородинском хлебе

| Наименование                | Норма, мг | Содержание в 100 г продукта, мг | В % от суточной нормы |
|-----------------------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| <b>Минеральные вещества</b> |           |                                 |                       |
| Магний                      | 400,00    | 48,81                           | 12,2                  |
| Железо                      | 18,00     | 3,75                            | 20,8                  |
| Цинк                        | 12,00     | 4,95                            | <b>41,3</b>           |
| Селен                       | 0,10      | 0,01                            | 10,0                  |
| Медь                        | 10,00     | 0,80                            | 8,0                   |
| Фосфор                      | 800,00    | 776,30                          | <b>97,0</b>           |
| Марганец                    | 2,00      | 3,91                            | <b>195,5</b>          |
| Кальций                     | 1000,00   | 36,90                           | 3,7                   |
| Калий                       | 2500,00   | 917,95                          | <b>36,7</b>           |
| Натрий                      | 1300,00   | 3,83                            | 0,3                   |
| <b>Витамины</b>             |           |                                 |                       |
| Витамин В1                  | 1,50      | 0,98                            | 65,3                  |
| Витамин В2                  | 1,80      | 0,25                            | 13,9                  |
| Витамин В4                  | 500,00    | 7,88                            | 1,6                   |
| Витамин В5                  | 5,00      | 0,83                            | 16,6                  |
| Витамин В6                  | 2,00      | 0,56                            | 28,0                  |
| Витамин В9                  | 0,40      | 0,12                            | 29,8                  |
| Витамин С                   | 90,00     | 1,16                            | 1,3                   |
| Витамин Е                   | 15,00     | 7,04                            | 46,9                  |
| Витамин К                   | 0,10      | 0,0                             | 8,3                   |
| Витамин РР                  | 20,00     | 1,48                            | 7,4                   |

Анализ данных, представленных в таблице 4, установлено, что при употреблении 100 г безглютенового бородинского хлеба восполняется 41,4 % суточной нормы цинка, 97 % суточной потребности в фосфоре, 195,5 % в марганце и 36,7 % в калии. Все эти микроэлементы являются одними из самых важных для организма человека. Преобладающим количеством среди витаминов является витамин В1, тиамин, который восполняет суточную норму потребления на 65,3 %, витамин В6 восполняется на 28 %, ненамного больше (29,8 %) восполняется витамин В9, а также витамин Е на 46,9 %.

### Заключение

На основании проведённых органолептических и физико-химических показателей готовых хлебобулочных изделий было определено оптимальное соотношение мучной безглютеновой смеси, которое составило: конопляной муки от 40 % до 50 %, черемуховой муки – 10 % до 20 %, муки из бурого риса – 45 % до 55 %.

Пищевая ценность полученного безглютенового бородинского хлеба с оптимальным соотношением составила: белки 18 г, жиры 18 г, углеводы 58 г, энергетическая ценность 460 ккал. Бородинский безглютеновый хлеб обогащён цинком, фосфором, марганцем, калием, тиамин, витамином В6 и В9, а также витамином Е.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Абутолыбова Д.Э. Рынок безглютеновых продуктов в мире и в России / СФЕРА: Кондитерская и хлебопекарная промышленность // 2019 [Электронный ресурс]. – URL: <https://sfera.fm/editions/konditerskaya/> (Дата обращения: 18.04.2020).
2. Бельмер С.А. Непереносимость глютена и показания к безглютеновой диете / С. Бельмер, А. Хавкин // Врач, 2011. – № 5. – С. 17–21.
3. Вишняк М.Н. Разработка и оценка потребительских свойств безглютеновых мучных кондитерских изделий: автореферат дис. ... канд. техн. наук.: 05.18.15 / Вишняк Мария Николаевна. – Барнаул., 2011. – 181 с.
4. ГОСТ 5669-96 Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. – 5 с.
5. Ершов П.С. Сборник рецептов на хлеб и хлебобулочные изделия // СПб.: 1998. – 191 с.
6. 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.
7. Носкова И. В. Проблемы российского рынка безглютенового туризма // Научно-методический электронный журнал «Концепт», 2015. – Т. 22. – 5 с.

8. Полезные статьи о диетических продуктах [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mirvkys.ru/pr13-konopljanaja-muka/> (Дата обращения: 18.04.2020).

9. Развитие рынка безглютеновых хлебопекарных продуктов [Электронный ресурс]. – URL: [https://sfera.fm/articles/hlebopecheniya/razvitie-rynka-bezglyutenovykh-khlebopekarnykh-produktov\\_1752](https://sfera.fm/articles/hlebopecheniya/razvitie-rynka-bezglyutenovykh-khlebopekarnykh-produktov_1752) (дата обращения: 20.04.2020).

10. Черникова, Д.А. Обоснование технологии безглютеновых бисквитных полуфабрикатов с использованием вторичных продуктов переработки тыквы/ Черникова, Д.А., Тимошенкова И.А., Москвичева Е.В. // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. – 2018. – С. 270-273.

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

1. Abutolybova D.E. Gluten-free market in the world and in Russia / Sphere: Confectionery and bakery industry // 2019 [Electronic resource]. - URL: <https://sfera.fm/editions/konditerskaya/> (accessed: 18.04.2020).

2. Belmer S.A. Gluten intolerance and indications of gluten-free diet / S. Belmer, A. Havkin // Doctor – 2011. – 5. – pp. 17 – 21. [in Russian]

3. Vishnyak M.N. Development and evaluation of consumer properties of gluten-free flour confectionery products: autoabstract dis. [ kand. techn. sciences.: 05.18.15 / Vishnyak Maria Nikolayevna. – Barnaul., 2011. – 181 p. [in Russian]

4. GOST 5669-96 Bakery. Porosity method. - Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2006. - 5 p. [in Russian]

5. Ershov P.S. Collection of recipes for bread and bakery products // Spb.: 1998. - 191 p. [in Russian]

6. Crystaleva, O. N. Celiakia in adults - modern approaches to diagnosis and treatment / O.N. Krystylev, M.G. Melnik // Siberian honey. zhurn. – 2010. – V. 94, 3. – Pp. 121 – 123. [in Russian]

7. Noskova I. V. Problems of the Russian gluten-free tourism market // Scientific and methodical electronic journal «Concept», 2015. – V. 22. – 5 p. [in Russian]

8. Useful articles on dietary products [Electronic resource]. - URL: <https://www.mirvkys.ru/pr13-konopljanaja-muka/> (accessed: 18.04.2020).

9. Development of the gluten-free bakery market [Electronic resource]. - URL: [https://sfera.fm/articles/hlebopecheniya/razvitie-rynka-bezglyutenovykh-khlebopekarnykh-produktov\\_1752](https://sfera.fm/articles/hlebopecheniya/razvitie-rynka-bezglyutenovykh-khlebopekarnykh-produktov_1752) (accessed: 20.04.2020).

10. Chernikova, D.A. Establishment of the technology of gluten-free biscuit semifinished products using the secondary products of pumpkin/ Chernikova, D.A., Timoshenkova I.A., Moskvicheva E.V. // Spebhu Science Week. Materials of the scientific conference with international participation. Best reports. - 2018. - Pp. 270 – 273. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.016>**ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНОСТИ КАТАЛИЗАТОРОВ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА  
И МЕТОДЫ ЕЁ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Научная статья

**Ахунов А.И.<sup>1</sup>, Мунасыпова А.М.<sup>2,\*</sup>, Рахмангулова А.М.<sup>3</sup>, Белоусова О.Ю.<sup>4</sup>, Япаев Р.Ш.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

\* Корреспондирующий автор (alinchik22085[at]mail.ru)

**Аннотация**

Каталитический крекинг является процессом деструктивного каталитического превращения нефтяных тяжелых фракций в компоненты тех или иных моторных топлив, а также сырья для нефтехимической отрасли. Этот процесс дал возможность получения на основе тяжелого малоценного сырья высокооктанового бензина (октановое число до 92 пунктов по исследовательскому методу), а также ценных сжиженных газов, применяемых для изготовления высокооктановых компонентов бензина: алкилат и метил-трет-бутиловый эфир. За счет научно-технического прогресса стало возможным открытие новых возможностей процессов каталитического крекинга, а также его перспектив [1].

Цели данной работы — это изучение методов определения активности катализаторов крекинга и проведение процесса каталитического крекинга на лабораторной установке Линтел МАК-10 по стандарту ASTM D 3907-03.

**Ключевые слова:** каталитический крекинг; микросферический катализатор; активность катализатора.

**THE RESEARCH OF THE ACTIVITY OF FLUID CATALYTIC CRACKING CATALYSTS  
AND THE METHODS FOR ITS TESTING**

Research article

**Akhunov A. I.<sup>1</sup>, Munasypova A. M.<sup>2,\*</sup>, Rahmangulova A. M.<sup>3</sup>, Belousova O. Yu.<sup>4</sup>, Yapayev R. S.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

\* Corresponding author (alinchik22085[at]mail.ru))

**Abstract**

Fluid catalytic cracking is a process of destructive catalytic conversion of high-molecular weight hydrocarbon fractions of petroleum crude oils into different components of various motor fuels, as well as raw materials for the petrochemical industry. This process made it possible to obtain high-octane gasoline that is produced from heavy low-value raw materials (octane number up to 92 points according to the research method), as well as valuable liquefied gases used for the manufacture of high-octane gasoline components: alkylates and methyl tert-butyl ether. Due to the scientific and technological progress, it became possible to discover new opportunities of the use of fluid catalytic cracking processes [1].

The purpose of this work is to study methods for testing the activity of cracking catalysts and conduct the process of fluid catalytic cracking at the laboratory facility Lintel MAC-10 according to the standard ASTM D 3907-03.

**Keywords:** fluid catalytic cracking; microspherical catalyst; catalyst activity.

**Введение**

Активность катализатора крекинга при эксплуатации на промышленных установках снижается главным образом вследствие уменьшения его удельной поверхности и преимущественного износа активной части.

Основой промышленного каталитического крекинга, достигшего современной стадии развития, является применение алюмосиликатных катализаторов.

Каталитический крекинг является лидером среди процессов углубления переработки нефти в современной нефтепереработке и производит одну четвертую часть мирового бензина. Помимо бензина, он также является крупным производителем компонента дизельного топлива и пропан-пропиленовой, бутан-бутиленовой фракции – сырья для нефтехимических процессов. Роль этого процесса в развитии экономики страны значительное, так как оказывает большое влияние на глубину переработки, от которого зависит количество потребления нефти и нефтепродуктов, в том числе на душу населения и по видам топлива, а также на темпы прироста реального внутреннего валового продукта (ВВП) [2], [3].

Каталитический крекинг представляет собой термокаталитический процесс переработки высококипящих тяжелых нефтяных фракций в низко-кипящие продукты с более высокой ценностью. Главным достоинством процесса является высокая эксплуатационная гибкость из-за возможности перерабатывать разнообразные нефтяные фракции.

Наиболее эффективными и широко применяемыми в нефтеперерабатывающей промышленности являются микросферические цеолитсодержащие катализаторы (20-150 мкм) с различными модифицирующими добавками. На 10 установках из 20 в России применяют шариковые катализаторы (2-5 мм). Однако такой тип катализаторов является устаревшим, поэтому заводы постепенно переходят на режимы использования современных катализаторов и строят установки по новейшим технологиям. Авторы статьи [4] утверждают, что потребность в микросферических катализаторах крекинга в 2015 году составляла 9-9,5 тыс. т/год, сейчас, в 2020 году, в среднем 13,6 тыс. т/год, а к 2030 году возрастет до 15 тыс. т/год. Посчитано [5], что каждый день в мире производится около 2,3 тыс. тонн катализатора крекинга, а за год – 840 тыс. тонн. Если для конверсии барреля (~0,1364 тонн) сырья (вакуумный газойль) требуется в среднем 0,16 кг катализатора, то для более тяжелого сырья такого, как, например, кубовый остаток, требуется больше – 0,18 кг.

Микросферические катализаторы состоят из трёх компонентов: матрица (носитель, активный компонент (цеолит) и вспомогательные добавки [6].

Носитель является средой, на которой диспергирован цеолит. На современных катализаторах матрица представляет собой искусственный алюмосиликат, содержащий 30-45 % глинозёма (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), в качестве стабилизатора – каолин

( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и все это связывает связующий материал – высокогидратированные гидрогели или силикатные и алюмосиликатные золи. Основное назначение матрицы – подвод сырья и отвод продуктов реакции крекинга. Он также должен придать механическую прочность частицам катализатора, сохранить каталитические свойства цеолита и предохранить катализатор от воздействия различных каталитических ядов. Матрица может быть активной и неактивной. На активной осуществляется первичный крекинг крупных молекул сырья, а неактивная выполняет лишь функцию подвода углеводородов к активным компонентам – цеолитам [7].

Основным активным компонентом катализатора является цеолит. Он обеспечивает вторичное превращение молекул сырья. В данный момент наиболее широко применимые в практике каталитического крекинга цеолиты – FAU (Y) и MFI (ZSM-5). Более подробное про цеолиты будет рассмотрено в подразделе 1.5.

Третьим компонентом катализатора каталитического крекинга является вспомогательное вещество, которое улучшает те или иные характеристики катализатора (Например, для снижения серы в продуктах, улучшения механических свойств, увеличения октанового числа, либо для снижения вредных выбросов в дымовых газах).

Каталитический крекинг должен быть спроектирован таким образом, чтобы работал максимально эффективно и избирательно, принимая во внимание следующие свойства катализаторов:

- 1) Активность, селективность и доступность: прежде всего, каталитические свойства для превращения крупных молекул исходного сырья в нужные молекулы;
- 2) Сопротивление истиранию: частицы катализатора должны быть способны выдерживать удары друг о друга и стенки агрегата во время циркуляции;
- 3) Гидротермическая стабильность: катализатор должен выдерживать высокую температуру и парциальное давление пара в регенераторе;
- 4) Стойкость к металлам: катализатор должен быть способен выдерживать действие ядов в (более тяжелом) исходном сырье;
- 5) Селективность к коксу: катализатор должен производить минимальное количество кокса при высокой активности крекинга, особенно при переработке более тяжелого сырья, таких как осадки;
- 6) Доступность: из-за очень короткого времени контакта между исходным сырьем и катализатором крайне важно, чтобы активные участки были доступны для молекул. Введение микро-, мезо- и макропор делает активные участки более доступными.
- 7) Псевдоожижаемость: частицы катализатора должны иметь соответствующий размер для псевдоожижения (кипящий слой). Псевдоожижение катализатора крекинга способствует подъему катализатора с газойлем, что приводит к оптимальному времени контакта между катализатором и сырьем [8], [9].

В настоящее время существует множество способов оценки и проверки активности катализаторов в лабораторных и полупромышленных масштабах. Один из лабораторных способов исследования — это метод определения активности по ОСТ 38-01161-78 «Катализаторы крекинга молотые и микросферические. Методы испытаний» [10]. По этому стандарту определение активности катализатора осуществляется по выходу бензина с показателем конца кипения 200 °С, который был получен при крекинге.

Наиболее удобной методикой оценки свойств катализаторов крекинга в лабораторных условиях считается метод определения микроактивности на установке MAT [11] по американскому стандарту ASTM D3907-13 [12]. В соответствии со стандартом активность оценивается по выходу бензина (температура кипения 200 °С), полученного при крекинге вакуумного газойля.

Активность катализатора может быть оценена на установке ACE R+ в соответствии со стандартом ASTM D7206/D7206M. Исследование активности осуществляется в псевдоожиженном слое катализатора. В ней используется запатентованный компанией Kayser реактор с псевдоожиженным слоем. Испытанию могут быть подвергнуты как свежие катализаторы, так и равновесные. Объем загружаемого катализатора от 5,25 до 11,25 г. Загрузка по сырью (вакуумный газойль и подобные продукты) может варьироваться в пределах  $1,0\text{--}3,0 \pm 0,002$  г/с. Управление установкой осуществляется через ЭВМ со специальным программным обеспечением [13].

Согласно методу компании Grace Davison возможно осуществить исследование активности циркулирующего слоя катализатора. Система состоит из трех основных блоков – реактора, отпарной колонны и регенератора. Непрерывный характер и циркуляция катализатора между реактором и регенератором позволяет изучить влияние технологических условий и добавок на серу топлива и выбросы, загрязняющие атмосферу, таких как  $\text{SO}_x$  и  $\text{NO}_x$ . Конструкция установки позволяет имитировать работу реальных промышленных реакторов [14].

### Метод исследования

В данной работе исследование активности катализатора каталитического крекинга проводилось на лабораторной установке Линтел МАК-10 (рисунок 1) по стандарту ASTM D3907-03 [12]. В качестве катализатора используется Октифайн 480П, а сырьем служил стандартный вакуумный газойль. Активность оценивается в соответствии со стандартом по выходу бензина (температура кипения 200 °С) [15]. Для изучения влияния каталитических свойств на выход продуктов были проведены процессы с использованием свежего, стабилизированного на Линтел УПСК-10 и протравленного никелем с различной концентрацией.

Реакторную систему продували азотом с расходом 30 мл/мин. Процесс проводили при температурах 482 °С, отношение катализатор:сырье – 3. Масса вводимого сырья – 1,33 г, катализатора –  $4,0 \pm 0,0002$  г.

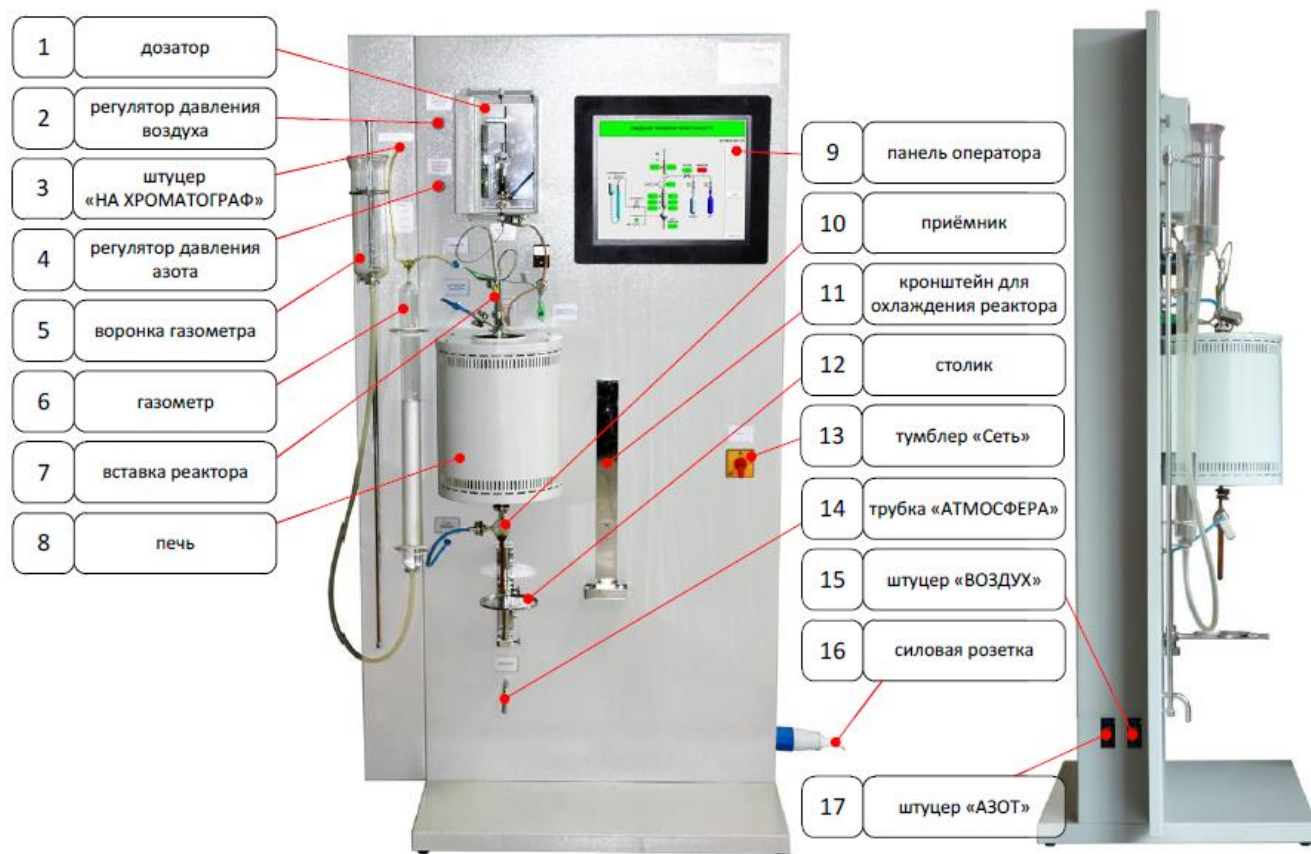


Рис. 1 – Установка Линтел МАК-10

### Результаты эксперимента

В таблице 1 представлены материальные балансы стандартного вакуумного газойля каталитического крекинга при применении свежего катализатора, стабилизированного на установке паростабилизации и различной степени протравленности никелем. По этим результатам опытов для наглядности построена гистограмма зависимости выхода продуктов от состояния катализатора (рисунок 2).

Таблица 1 – Материальный баланс процесса на установке МАК-10

| Продукты, % масс. | Свежий | Стабилизированный | Содержащий никель, % |          |          |          |
|-------------------|--------|-------------------|----------------------|----------|----------|----------|
|                   |        |                   | 500 ppm              | 1000 ppm | 1500 ppm | 2000 ppm |
| Газы              | 4,5    | 4,22              | 4,78                 | 5,1      | 5,15     | 5,2      |
| Катализат         | 91,1   | 91,68             | 90,6                 | 90,25    | 90,21    | 90,12    |
| Кокс + потери     | 4,4    | 4,1               | 4,62                 | 4,65     | 4,64     | 4,68     |

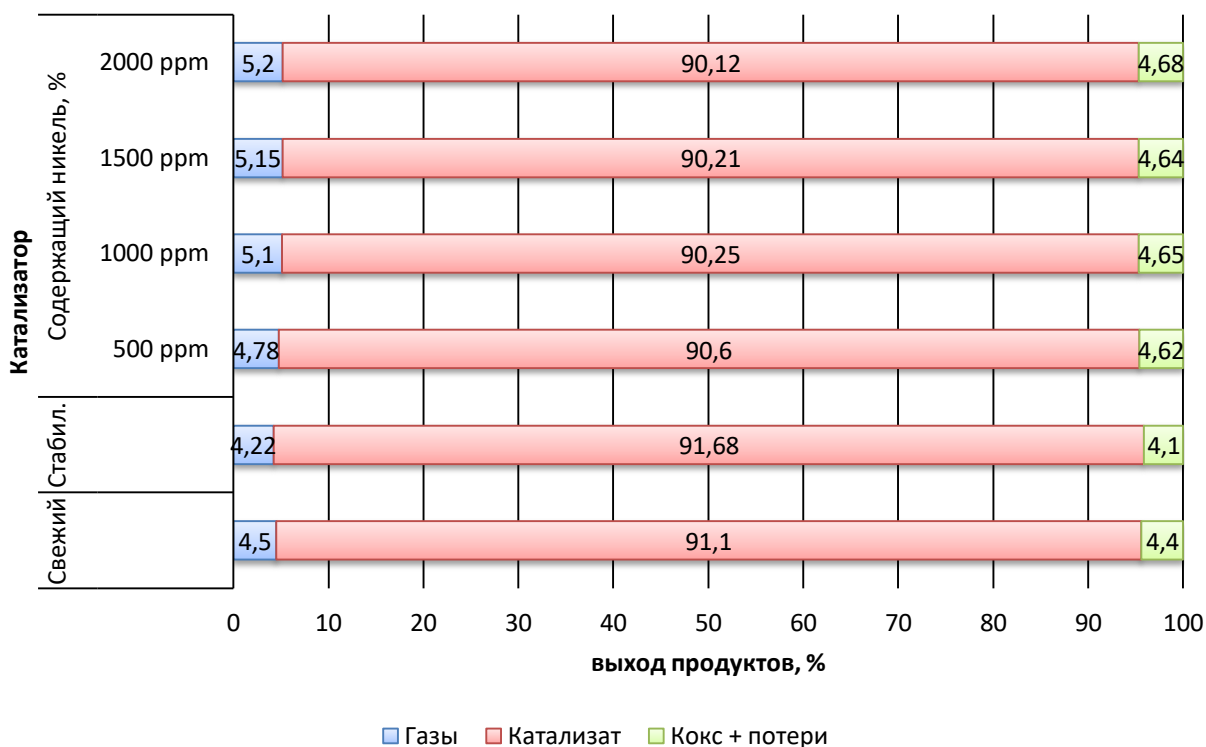


Рис. 2 – Гистограмма зависимости выхода продуктов крекингов от состояния катализатора

### Обсуждение результатов

Анализируя гистограмму (рисунок 2), приходим к следующим выводам:

- выход газа при проведении процесса с использованием свежего и стабилизированного катализатора различается незначительно (всего на  $\pm 0,3$  %). При увеличении степени протравленности никелем с 500 по 2000 ppm (миллионная доля) способствует протеканию реакций дегидрогенизации в процессе крекинга и приводит к увеличению легких газов на 0,42 % за счет уменьшения количества бензина.

- чрезмерно высокая активность свежего катализатора приводит к снижению выхода жидкой части (91,1 %), во-первых, за счет роста газовой части и, во-вторых, кокса. Результаты процесса с применением стабилизированного (равновесного) катализатора характеризуются лишь небольшим увеличением выхода катализата (на 0,58 % до 91,68 %), снижением кокса и газов. При увеличении степени протравленности катализатора никелем постепенно снижается выход катализата с 90,6 до 90,12 %, являющимся целевым продуктом каталитического крекинга.

- на свежем катализаторе отлагается больше кокса, чем на стабилизированном, потому что в первом случае активность чрезмерно высокая и это приводит к быстрому закоксовыванию активных центров катализатора. В зависимости от степени протравленности катализатора никелем наблюдаем рост степени отложения кокса на катализаторе при увеличении концентрации никеля в образцах. Бифункциональность каталитической системы способствует дополнительному вкладу реакций перераспределения водорода, приводящие к большему выходу кокса и меньшему выходу жидких продуктов и, следовательно, снижается активность катализатора.

Экономический эффект установки заключается в оптимальном выборе катализатора с возможностью рассмотрения различных вариантов соотношений катализатор:сырье с минимальными затратами за счет малого объема используемых проб.

### Заключение

Лабораторная установка Линтел МАК-10 отечественного производства (АО БСКБ «Нефтехимавтоматика») позволяет с высокой точностью оценить качество вакуумного газойля и катализатора с минимальными затратами.

Используемое сырье должно быть предварительно подготовленным во избежание отравления используемого катализатора, в частности никелем или ванадием. Предварительную подготовку для снижения количества вредных металлов необходимо провести на установках деметализации.

При проведении испытаний необходим тщательный контроль за выходом продуктов.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Ахметов, С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа / С.А. Ахметов. – Уфа; Гилем, 2013. – 672 с.
2. Чёботова, В. И. Глубина переработки нефти в России, Европе и США / В. И. Чёботова // Устойчивое развитие науки и образования. – 2020. – № 3. – С. 42-45.
3. Технологии глубокой переработки нефти: каталитический крекинг и гидрокрекинг [Электронный ресурс] – URL: <http://econf.rae.ru/article/8818>.

4. Катализаторы в нефтепереработке, электронный журнал Neftegaz.ru, сентябрь 2017, <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/545460-katalizatory-v-neftepererabotke/>.
5. Vogt, E. T. C. Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis / E. T. C. Vogt and B. M. Weckhuysen // The Royal Society of Chemistry. – 2015. – № 44. – С. 7342-7370.
6. Гильмутдинов, А. Т. Обзор современных катализаторов, используемых в процессах каталитического крекинга / А. Т. Гильмутдинов, Л. З. Хисамова // Технические науки. – 2019. - №4. – С. 10-15.
7. Шафран, Т. А. «Исследование группового состава сырья процесса каталитического крекинга». Бакалаврская работа. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – 53 с.
8. Teune, E. «The nature of acid sites in fluid catalytic cracking catalysts». Master research thesis. – Department of Inorganic chemistry and catalysis Debye institute Utrecht University, 2016. – 129 с.
9. Доронин, В. П. Перспективные разработки: катализаторы крекинга и добавки к ним / В. П. Доронин, П. В. Липин, О. В. Потепенко и др. // Катализ в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 82-87.
10. Стандарт ГОСТ 38-01161-78 «Катализаторы крекинга микросферические и молотые. Методы испытаний»
11. Sadeghbeigi R. Fluid Catalytic Cracking Handbook design/ Sadeghbeigi R. – Operation, And Troubleshooting Of FCC Facilities. – Houston: Gulf, – 2000.
12. ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM D3907 / D3907M13, Standard Test Method for Testing Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalysts by Microactivity Test, URL: [www.astm.org](http://www.astm.org).
13. Центр исследований и испытаний катализаторов процесса каталитического крекинга [Электронный ресурс] – URL: <http://pstu.ru/activity/innovation/tskp/ryabov/>.
14. Holmes Philip. Refinery and Petrochemical Processing Catalytic Cracking / Philip Holmes. – Department for Chemical and Process Engineering University of Surrey – 43 с.
15. Минхайрова М.Т., Халикова Д.Г., Шаяхметов А.М. Исследование активности микросферических катализаторов // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». 2018. № 2. С. 6-15. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2\\_2018/ogbus\\_2\\_2018\\_p6-15\\_MinhayrovaMT\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2018/ogbus_2_2018_p6-15_MinhayrovaMT_ru.pdf). (дата обращения: 05.05.2020).

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

1. Ahmetov, S. A. Tehnologija glubokoj pererabotki nefiti i gaza [The technology of deep oil and gas processing] / S. A. Ahmetov. – Ufa; Gilem, 2013. – 672 p. [in Russian]
2. Chjobotova, V. I. Glubina pererabotki nefiti v Rossii, Evrope i SShA [The depth of oil refining in Russia, Europe and the USA] / V. I. Chjobotova // Ustojchivoe razvitie nauki i obrazovaniya [Sustainable development of science and education]. – 2020. – № 3. – P. 42–45. [in Russian]
3. Tehnologii glubokoj pererabotki nefiti: kataliticheskij kreking i gidrokreking [Technologies of deep oil refining: fluid catalytic cracking and hydrocracking] [Electronic resource] – URL: <http://econf.rae.ru/article/8818>. [in Russian]
4. Katalizatory v neftepererabotke [Catalysts in oil refining] // elektronnyj zhurnal Neftegaz.ru [electronic magazine Neftegaz.ru]. – September 2017. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/545460-katalizatory-v-neftepererabotke/>. [in Russian]
5. Vogt, E. T. C. Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis / E. T. C. Vogt, B. M. Weckhuysen // The Royal Society of Chemistry. – 2015. – № 44. – P. 7342-7370.
6. Gil'mutdinov, A. T. Obzor sovremennykh katalizatorov, ispol'zuemykh v processakh kataliticheskogo krekinga [The Review of modern catalysts used in fluid catalytic cracking processes] / A. T. Gil'mutdinov, L. Z. Hisamova // Tehnicheskie nauki [Technical Sciences]. – 2019. – №4. – P. 10–15. [in Russian]
7. Shafran T. A. Issledovanie gruppovogo sostava syr'ya processa kataliticheskogo krekinga [The research of the total composition of raw materials of the fluid catalytic cracking process] : Undergraduate's thesis / Shafran T. A. –National Tomsk Polytechnic University, 2016. – 53 p. [in Russian]
8. Teune E. The nature of acid sites in fluid catalytic cracking catalysts. Master research thesis / E. Teune – Department of Inorganic chemistry and catalysis Debye institute Utrecht University, 2016. – 129 p.
9. Doronin, V. P. Perspektivnye razrabotki: katalizatory krekinga i dobavki k nim [Promising inventions: cracking catalysts and their additives] / V. P. Doronin, P. V. Lipin, O. V. Potapenko et al. // Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in industry]. – 2014. – № 5. – P. 82–87. [in Russian]
10. Standart OST 38-01161-78. Katalizatory krekinga mikrosfericheskie i molotye. Metody ispytaniy [Microspherical and expanded cracking Catalysts. Test methods]. [in Russian]
11. Sadeghbeigi R. Fluid Catalytic Cracking Handbook design/ Sadeghbeigi R. – Operation, And Troubleshooting Of FCC Facilities. – Houston: Gulf, – 2000.
12. ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM D3907 / D3907M13, Standard Test Method for Testing Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalysts by Microactivity Test. – URL: [www.astm.org](http://www.astm.org).
13. Centr issledovaniy i ispytaniy katalizatorov processa kataliticheskogo krekinga [Center for research and testing of catalysts of the fluid catalytic cracking process] [Electronic resource] – URL: <http://pstu.ru/activity/innovation/tskp/ryabov/>. [in Russian]
14. Holmes Philip. Refinery and Petrochemical Processing Catalytic Cracking / Philip Holmes. – Department for Chemical and Process Engineering University of Surrey – 43 p.
15. Minhajrova M.T., Halikova D.G., Shajahmetov A.M. Issledovanie aktivnosti mikrosfericheskikh katalizatorov [Research activity of the microsphere catalysts] // Elektronnyj zhurnal «Neftegazovoe delo» [Electronic journal "Oil and gas"]. – 2018. – № 2. – P. 6-15. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2\\_2018/ogbus\\_2\\_2018\\_p6-15\\_MinhayrovaMT\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2018/ogbus_2_2018_p6-15_MinhayrovaMT_ru.pdf). (accessed: 05.05.2020). [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.017>**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАШИН ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ, УЧАСТВУЮЩИХ В РЕГУЛИРОВАНИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, НА ПАРАМЕТРЫ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

Научная статья

Середкин Д.Ю.<sup>1,\*</sup>, Аверьянов Д.А.<sup>2</sup>, Булатов Р.В.<sup>3</sup>, Бурмейстер М.В.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2442-9189;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-0836-3135;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-8787-7299;<sup>1, 2, 3</sup> НИУ «МЭИ», Москва, Россия;<sup>4</sup> ГИМ ИТС ЦИУС АО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (daniil.seredkin1[at]gmail.com)

**Аннотация**

Целью данной работы было решение существующей проблемы недостаточной изученности поведения машин двойного питания (МДП) в переходных и аварийных режимах, а именно, оценка влияния машин двойного питания, участвующих в регулировании реактивной мощности, на параметры коротких замыканий.

При проведении исследования использовалась расчетная модель ветроэнергетической установки с машиной двойного питания, разработанная в среде *MATLAB-SIMULINK*.

В результате моделирования были получены графики напряжений на шинах, активной и реактивной мощности МДП, значения действующего тока от МДП, значения действующего напряжения на звене постоянного тока, тока и напряжения статора МДП при коротком замыкании на выводах машины при различной вырабатываемой/потребляемой реактивной мощности.

Проанализировано влияние регулирования реактивной мощности машины двойного питания на параметры короткого замыкания.

Полученные данные могут быть использованы при проектировании ветроэнергетических установок на базе машин двойного питания, что позволит более корректно производить выбор оборудования и коммутационной аппаратуры.

**Ключевые слова:** машина двойного питания, короткое замыкание, реактивная мощность, ветроэнергетическая установка, распределенная генерация.

**EVALUATING THE INFLUENCE OF DOUBLY-FED MACHINES USED FOR REACTIVE POWER CONTROL ON THE SHORT-CIRCUIT PARAMETERS**

Research article

Seredkin D. Yu.<sup>1,\*</sup>, Averianov D. A.<sup>2</sup>, Bulatov R. V.<sup>3</sup>, Burmeister M. V.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2442-9189;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-0836-3135;<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-8787-7299;<sup>1, 2, 3</sup> National research university MPEI, Moscow, Russia;<sup>4</sup> R&D Center at FGC UES, JSC, Moscow, Russia

\* Corresponding author (daniil.seredkin1[at]gmail.com)

**Abstract**

The purpose of this paper was to solve the existing problem of the lacking knowledge of the behaviour of doubly-fed electric machines in the transient state and abnormal mode, specifically evaluating the influence of doubly-fed electric machines used for reactive power control on the short-circuit parameters.

For the research, the design model of wind-driven power plant with the doubly-fed electric machine developed in the *MATLAB-SIMULINK* framework was used.

Through modelling we acquired the graph of bus bar voltage, active and reactive power of the doubly-fed electric machine, values of effective current, values of effective voltage across DC link, values of terminal current and voltage of doubly-fed electric machine on the short-circuit under various input/output reactive power.

We analysed the influence of doubly-fed electric machines used for reactive power control on the short-circuit parameters.

The acquired data can be used for the design of a wind-driven power plant based on the doubly-fed electric machines, that will enable a more accurate choice of equipment and switchgear.

**Keywords:** doubly-fed electric machine, short circuit, reactive power, wind-driven power plant, distributed generation.

**Введение**

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года [1], утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р, одной из целей по направлению «Электроэнергетика» является широкое развитие распределенной генерации, доля выработки которой может достигать 15 процентов от всей вырабатываемой электроэнергии. Также существенная роль отводится развитию возобновляемой энергетики. Планируется, что установленная мощность генерирующих объектов на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в том числе работающих параллельно с единой энергетической системой, достигнет 25 ГВт. Это позволит сбалансировать энергетический спрос и снизить экологическую нагрузку со стороны предприятий энергетики на окружающую среду.

Анализ зарубежного опыта показывает, что развитие распределенной генерации в настоящее время происходит в основном именно за счет введения в эксплуатацию генерирующих объектов на основе ВИЭ, что существенно влияет на работу электроэнергетических систем. Суммарная установленная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) в мире с 2007



г. по 2016 г. включительно выросла более чем в 5 раз с 93,5 до 487 ГВт [2], [3]. В России, согласно данным НП «Совет рынка», выработка электроэнергии на ВЭС с 2014 г. по 2018 г. включительно выросла с 6 тыс. кВт·ч до 76413 тыс. кВт·ч [4].

В Российской Федерации крупным игроком на рынке ветроэнергетики является новый дивизион Росатома АО «НоваВинд», который по планам построит и введет в эксплуатацию ветроэлектростанции на базе машин двойного питания (МДП) общей установленной мощностью 1 ГВт до 2023 года.

Согласно докладу о реализации Энергетической стратегии России на период до 2030 года по итогам 2018 года [5] существует необходимость достижения эффективного сочетания систем централизованного электроснабжения с развитием распределенной генерации. Также в ГОСТ [6] указано, что ВЭС должны участвовать в регулировании реактивной мощности в соответствии с требованиями технической документации завода-изготовителя ветроэнергетических установок.

В связи с этим возникает необходимость оценки влияния машин двойного питания, участвующих в регулировании реактивной мощности, на параметры коротких замыканий.

Данная проблема упоминалась в работах [7], [8], но не была решена так как основной целью вышеупомянутых работ являлось совершенствование противоаварийного и режимного управления энергорайонов с распределенной генерацией и разработка нового способа управления машинами двойного питания.

Для выполнения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Изучение современного состояния проблем распределенной генерации и анализ особенностей работы МДП в энергосистемах.
- Разработка и верификация расчетной модели МДП в среде «*MATLAB - SIMULINK*».
- Моделирование коротких замыканий при различной вырабатываемой/потребляемой реактивной мощности МДП.
- Оценка влияния машин двойного питания, участвующих в регулировании реактивной мощности, на параметры коротких замыканий.

#### **Методы исследования**

Решение поставленных в работе задач базируется на основных положениях силовой электроники, теории управления, теоретических основ электротехники, электромеханики. Для решения задач используется современная среда компьютерного моделирования – «*MATLAB - SIMULINK*».

#### **Предпосылки развития распределенной генерации.**

##### **Преимущества применения машиндвойного питания в ветроэнергетике**

Распределенная генерация (РГ) – это совокупность электростанций, расположенных близко к месту потребления энергии и подключенных либо непосредственно к потребителю, либо к распределительной электрической сети (в случае, если потребителей несколько) [9].

Электроэнергетические системы Российской Федерации и зарубежных стран исторически развивались по похожей логике: крупные электрические станции сооружались обычно вблизи мест добычи топлива либо недалеко от транспортных коридоров, по которым топливо перевозилось. Также удельная стоимость строительства электростанции (в расчете на 1 кВт мощности) была тем ниже, чем она мощнее, поэтому средняя единичная мощность электростанций (ЭС) постоянно увеличивалась (с 1920-х до 1980-х гг. выросла в 500 раз и более).

По соображениям экологии ЭС часто располагались на значительном удалении от крупных городов (в РФ исключением стали ТЭЦ), а передача электроэнергии от ЭС потребителям осуществлялась по магистральным и распределительным сетям общей протяженностью в тысячи километров.

Такая структура энергосистем в течение нескольких десятилетий оставалась в целом неизменной. Именно РГ стала катализатором изменений: в 1970-1980-х гг. в США и Европе были разработаны новые технологии производства электроэнергии (газотурбинные, газопоршневые, паргазовые установки), позволяющие создавать недорогие и эффективные электростанции небольшой мощности. Это привело к росту вводов объектов РГ (см. рисунок 1).

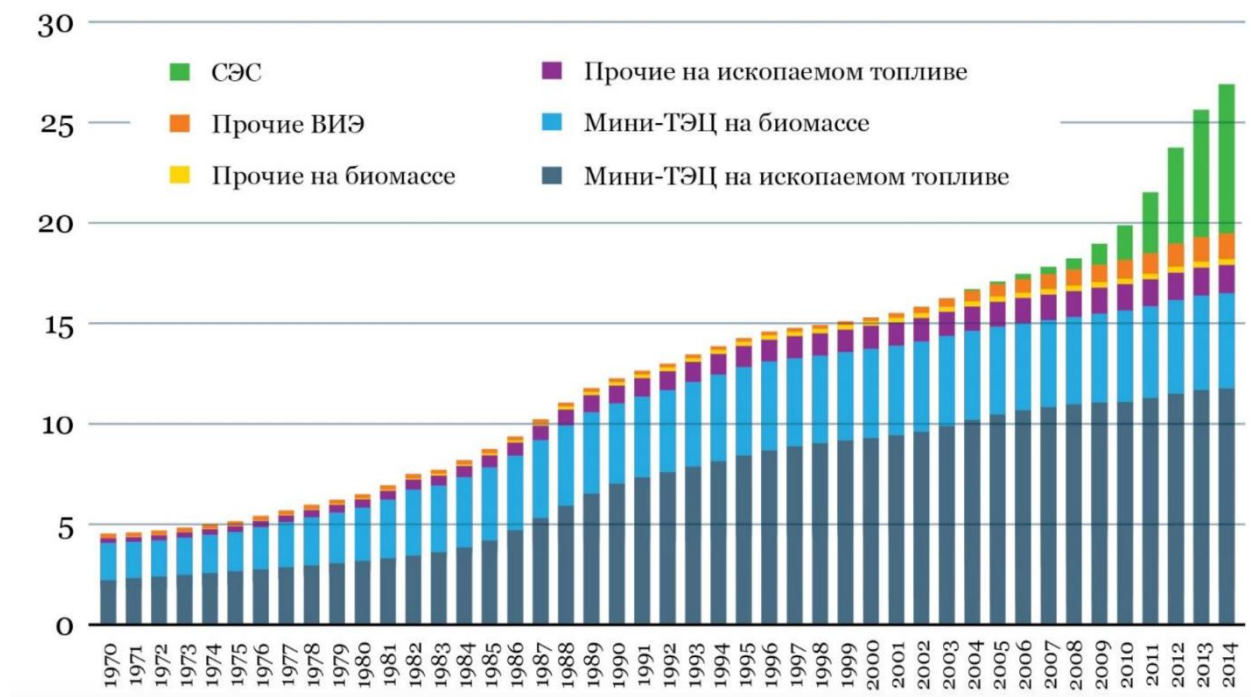


Рис. 1 – Динамика развития распределенной генерации на примере США (ГВт) [10]

В начале XXI века началось активное развитие ВИЭ при поддержке правительств стран Европы, США и других государств, что привело к снижению стоимости решений в области солнечной и ветряной энергетики в разы при существенном росте их технологической эффективности. Так, приведенная стоимость электроэнергии от ВЭС в 2009-2017 гг. сократилась на 67% (см. рисунок 2).

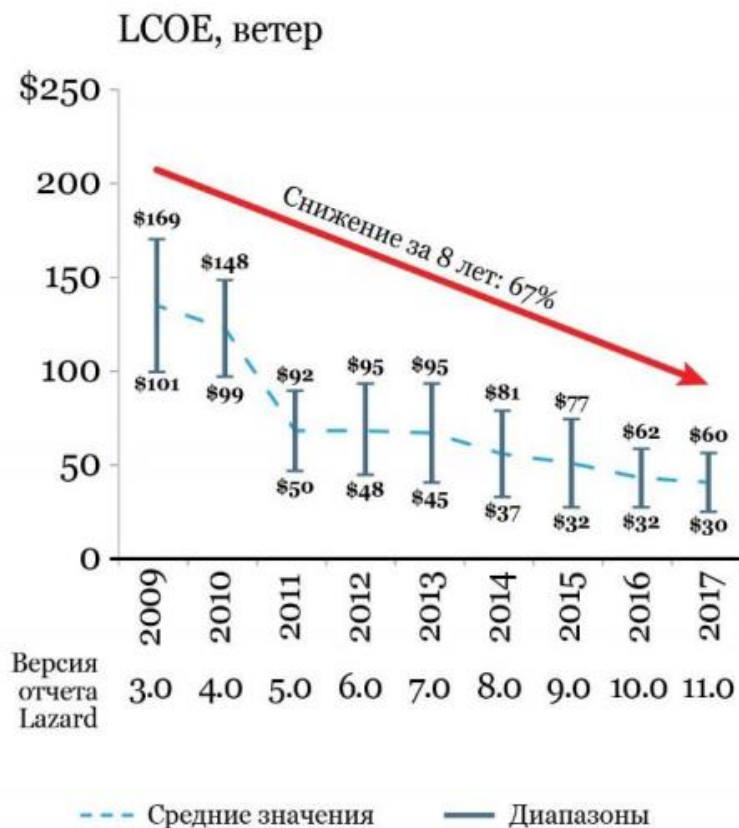


Рис. 2 – Динамика приведенной стоимости электроэнергии (LCOE) от ветряных электростанций в 2009-2017 гг., \$ / МВт-ч [11]

Стоит отметить, что именно ВИЭ в концепции РГ отводится немаловажная роль. Так, в некоторых странах (Норвегия, Канада) доля выработки электроэнергии на объектах ВИЭ уже превышает 50% от общей выработки [12].

Navigant Research прогнозирует, что к 2026 году в мире ожидается ввод объектов РГ генерирующей мощностью, превышающей в три раза новую генерирующую мощность централизованной генерации (см. рисунок 3).

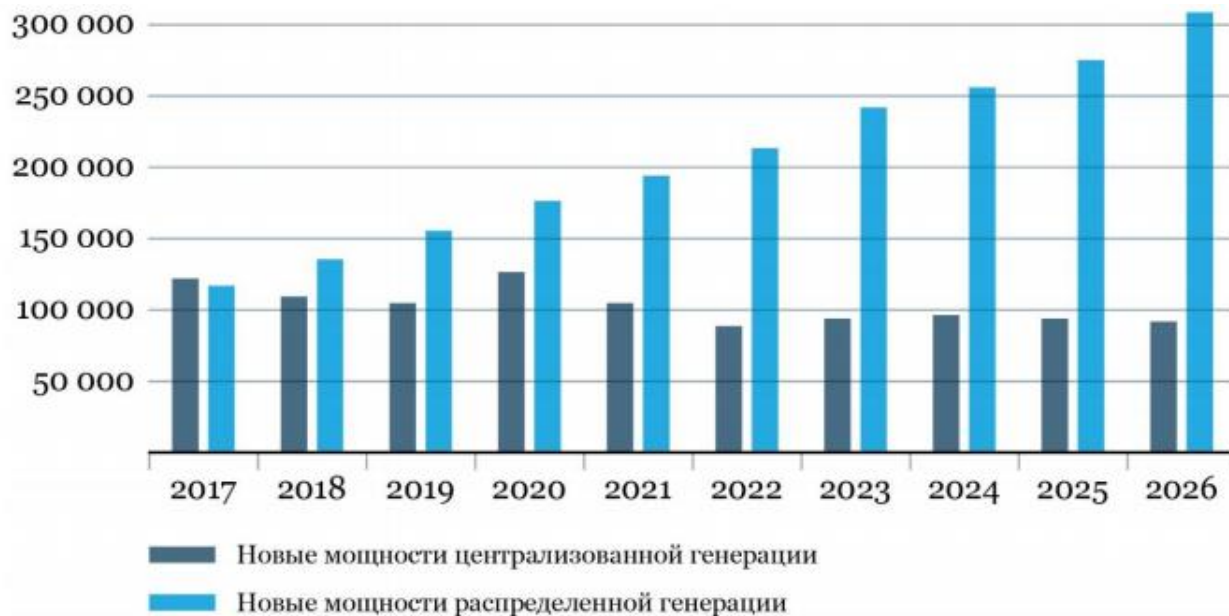


Рис. 3 – Прогноз ввода новых мощностей централизованной и распределенной генерации электроэнергии в мире, МВт [13]

Так как в РФ к концу XX века была крупнейшая централизованная энергосистема в мире, то процесс ее децентрализации проходит существенно менее интенсивно чем в других странах из-за возникающих трудностей.

Основные проблемы, с которыми столкнулись в РФ при развитии РГ:

- дороговизна и сложность подключения новых объектов к сетям;
- недостаточная надежность существующих схем электроснабжения (необходимы следующие мероприятия: создание новых математических моделей и методов обоснования структуры генерирующих мощностей, изучение эффективности работы систем релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА));
- значительное возрастание уровней токов КЗ в сетях низкого и среднего напряжения [14].

Согласно докладу Российского Энергетического Агентства на форуме *ENES* 2014 [15] ввод распределенной генерации в РФ ежегодно составляет около 30-40% от вводов централизованной генерации, а за последние 10 лет рост генерации мощностью до 100 МВт в 4 раза превышает рост крупной генерации свыше 100 МВт.

В РГ в настоящее время в основном применяются следующие генерирующие установки:

- Традиционные: дизельные энергетические установки (на текущий момент являются наиболее распространенными [16]), газопоршневые установки, газотурбинные установки.
- Нетрадиционные (на основе ВИЭ): гидроэнергетические установки установленной мощностью до 30 МВт [17], солнечные энергетические установки, ветроэнергетические установки.

Анализ рынка электроэнергии показывает, что именно ветроэлектрические установки (ВЭУ) является наиболее перспективным и конкурентоспособным направлением в распределенной генерации [18].

Для дальнейшего исследования ВЭУ следует провести обзор генераторов, применяемых в данных установках. Выбор генератора является основным вопросом комплектации ВЭУ. Для применения на ВЭУ возможны следующие типы генераторов:

1. асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором;
2. синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением;
3. асинхронизированный синхронный генератор;
4. асинхронный генератор с фазным ротором (машина двойного питания);
5. синхронные генераторы (СГ) с магнитоэлектрическим возбуждением, т.е. с возбуждением от постоянных магнитов.

В настоящее время, независимо от мощности и вида крыльчатки, практически всегда используются МДП [19]. Это связано со следующими преимуществами использования данной машины для ВЭС:

- возможность использования в автономных системах в сочетании с другими машинами;
- простота и надежность в обслуживании;
- сравнительно малые колебания генерируемой мощности, электромагнитного момента и тока при параллельной работе, при переменной скорости ветра и его порывах;
- высокие энергетические характеристики;
- способность функционирования в широком диапазоне частоты вращения ротора ( $\pm 30\%$ );
- возможность управлять потоками реактивной мощности по цепи возбуждения [20, 21].

Границы диапазонов изменения реактивной мощности ВЭС (суммарно выдаваемой и потребляемой) для ряда Европейских синхронных зон приведены в таблице (см. таблицу 1) [22].

Таблица 3 – Расчетные диапазоны изменения реактивной мощности для ряда Европейских синхронных зон

| Синхронная зона        | Максимальный диапазон $Q/P_{max}$ |
|------------------------|-----------------------------------|
| Континентальная Европа | 0,75                              |
| Скандинавская          | 0,95                              |
| Великобритания         | 0,66                              |
| Ирландия               | 0,66                              |
| Балтийские государства | 0,8                               |

Несмотря на то что МДП нашли широкое применение в ВЭУ, их влияние на параметры КЗ при регулировании реактивной мощности и параллельной работе МДП с сетью нуждается в более детальном изучении, результаты которого в дальнейшем могут быть использованы при проектировании объектов РГ на базе МДП.

#### Описание и верификация расчетной модели ветроэлектрической установки с машиной двойного питания, работающей параллельно с сетью

При проведении исследования использовалась расчетная модель машины двойного питания, работающей параллельно с энергосистемой, выполненная с помощью программного комплекса *MATLAB-SIMULINK* (см. рисунок 4).

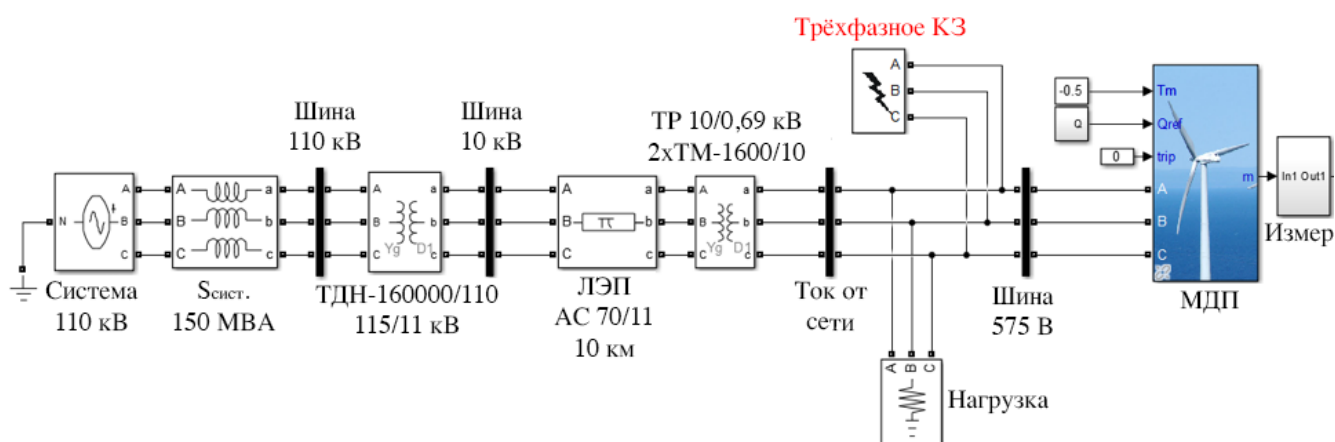


Рис. 4 – Расчетная схема машины двойного питания, работающей параллельно с энергосистемой

Данная модель включает в себя следующие элементы: система, трансформатор ТДН-160000/110, воздушная линия с проводами АС 70/11, два трансформатора ТМ-1600/10, активная нагрузка 500 кВт, КЗ, МДП.

Параметры данных элементов сведены в таблицы (см. таблицы 2-8).

Таблица 4 – Параметры системы

| $U_{ном}$ , кВ | $f_{ном}$ , Гц | $S_c$ , МВА | $R_1$ , Ом | $R_0$ , Ом | $X_1$ , Ом | $X_0$ , Ом |
|----------------|----------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 110            | 50             | 150         | 0,1        | 0,3        | 1,0        | 3,0        |

Таблица 5 – Параметры трансформатора 110/10 кВ

| Тип           | $S_{ном}$ , МВА | $U_{вн}$ , кВ | $U_{ин}$ , кВ | $P_x$ , кВт | $P_k$ , кВт | $U_k$ , % | $I_x$ , % |
|---------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| ТДН-16000/110 | 16              | 115           | 11            | 18          | 85          | 10,5      | 0,7       |

Таблица 6 – Параметры воздушной линии

| $r_1$ , Ом/км | $r_0$ , Ом/км | $l_1$ , мГн/км | $l_0$ , мГн/км | $c_1$ , нФ/км | $c_0$ , нФ/км | $L$ , км |
|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------|
| 0,4218        | 0,52          | 1,22           | 4,27           | 11,74         | 7,55          | 10       |

Таблица 7 – Параметры трансформатора 10/0,575 кВ

| Тип        | $S_{ном}$ , МВА | $U_{вн}$ , кВ | $U_{ин}$ , кВ | $P_x$ , кВт | $P_k$ , кВт | $U_k$ , % | $I_x$ , % |
|------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| ТМ-1600/10 | 1,6             | 10            | 0,69          | 3,3         | 16,5        | 5,5       | 1,3       |

Таблица 8 – Параметры нагрузки

| $U_{ном}$ , кВ | $F_{ном}$ , Гц | $P$ , кВт | $Q_L$ , кВАр |
|----------------|----------------|-----------|--------------|
| 0,575          | 50             | 300       | 200          |

Таблица 9 – Параметры машины двойного питания

| $S_{ном}$ , МВА     | $U_{ном}$ , В  | $f_{ном}$ , Гц | $R_s$ , о.е  | $L_{is}$ , о.е | $R'_r$ , о.е | $L'_r$ , о.е | $L_m$ , о.е | $H$ , с | $p$ |
|---------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|-------------|---------|-----|
| 1,5/0,9             | 575            | 50             | 0,00706      | 0,171          | 0,005        | 0,156        | 2,9         | 5,04    | 3   |
| $S_{преоб}/S_{ном}$ | $L_\phi$ , о.е | $R_\phi$ , о.е | $V_{dc}$ , В | $C_{dc}$ , мФ  | $T_m$ , о.е  |              |             |         |     |
| 0,3                 | 0,15           | 0,0015         | 1200         | 10             | -0,5         |              |             |         |     |

Таблица 10 – Параметры системы управления МДП

| $K_{p\_Q}$ | $K_{i\_Q}$ | $K_{p\_power}$ | $K_{i\_power}$ | $K_{p\_Igrid}$ | $K_{i\_Igrid}$ | $K_{p\_Irotor}$ | $K_{i\_Irotor}$ | $K_{p\_DC}$ | $K_{i\_DC}$ |
|------------|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|
| 0,05       | 5          | 1              | 100            | 1              | 100            | 0,3             | 8               | 0.002       | 0.05        |

Верификация расчетной модели была произведена по двум режимам: нормальному режиму работы и режиму короткого замыкания.

Для верификации модели по нормальному режиму был составлен баланс мощности МДП (см. рисунок 5) при  $Q_s = 0$  и номинальном механическом моменте. Без учета потерь в обмотках МДП, фильтрах и преобразователе:

- Вырабатываемая активная мощность МДП составляет 1,67 МВт.
- Мощность, выдаваемая в сеть – 1,11 МВт.
- Мощность, подаваемая в цепь ротора, составляет 0,56 МВт (1/3 от номинального значения мощности МДП).
- 

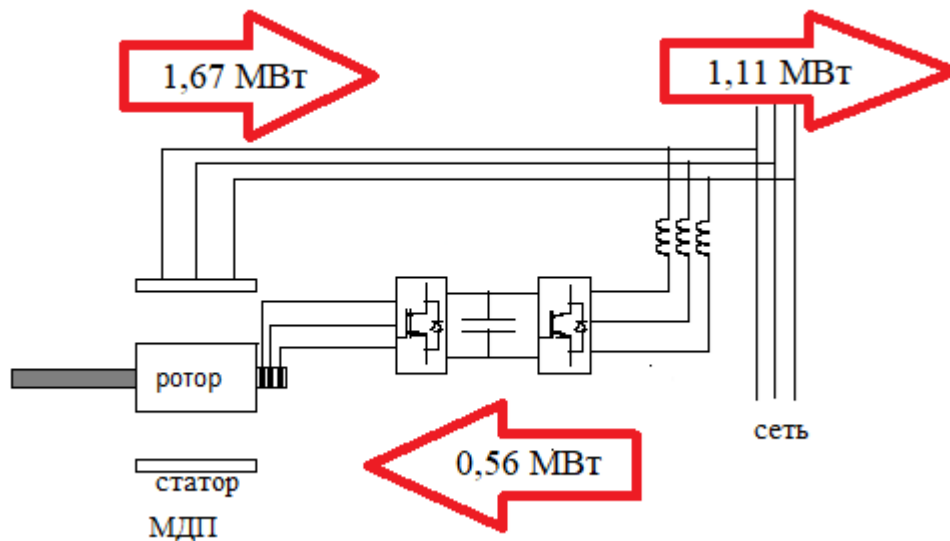


Рис. 5 – Баланс мощности МДП в нормальном режиме работы

Был произведен расчет данных мощностей с помощью модели при номинальном режиме работы МДП (см. рисунок 6).

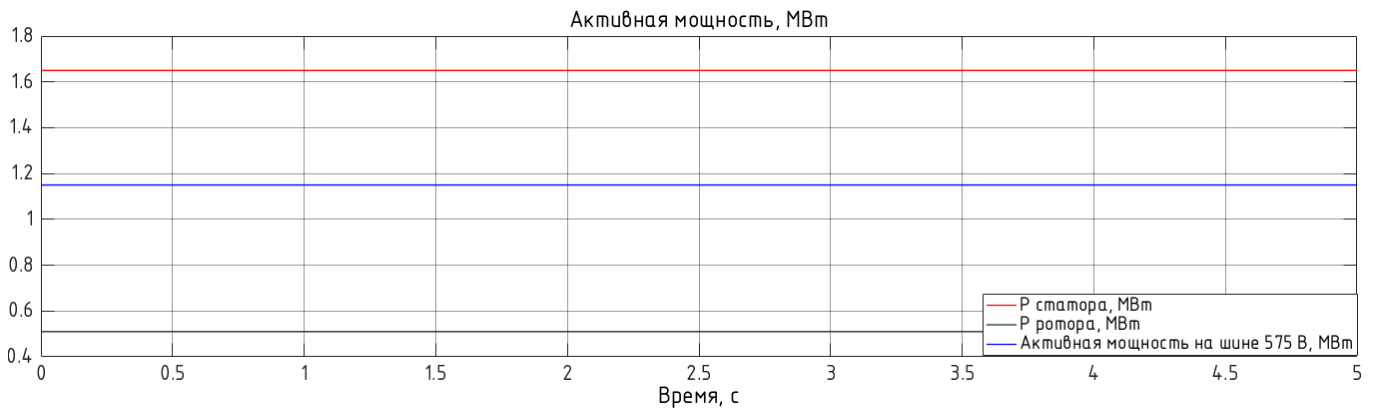


Рис. 6 – Активная мощность в цепях статора, ротора и выдаваемая в сеть

Разница между теоретическими и полученными величинами:

- по мощности в цепи статора – 0,02 МВт (1,1%);
- по мощности в цепи ротора – 0,05 МВт (8,9%);
- по мощности, выдаваемой в сеть – 0,03 МВт (2,7%).

В ходе верификации модели по режиму короткого замыкания собрана расчетная модель с параметрами МДП, взятыми из статьи [23] (см. таблицу 9), и сравнены результаты моделирования трехфазного короткого замыкания на выводах МДП (см. таблицу 10 и рисунки 7-8).

Длительность короткого замыкания 0,2 секунды. Значение сопротивления КЗ – 0,2 Ом.

Таблица 11 – Параметры МДП из статьи [23]

| Параметр  | Значение | Параметр                                | Значение (о.е.) |
|---|----------|---|-----------------|
| Номинальная мощность                            | 2 МВт    | Индуктивность рассеяния обмотки статора | 0,15            |
| Напряжение ротора                               | 1975 В   | Активное сопротивление статора          | 0,01            |
| Напряжение статора                              | 690 В    | Активное сопротивление ротора           | 0,01            |
| Частота   | 50 Гц    | Индуктивность намагничивания            | 3               |
| Взаимная индуктивность обмоток статора и ротора | 4,5 о.е. | Индуктивность рассеяния обмотки ротора  | 0,11            |

Таблица 12 – Результаты моделирования КЗ из статьи [23]

| Место КЗ       | Время затухания, с | Пиковое значение тока, о.е. | Ток в установившемся режиме, о.е. | Остаточное напряжение, о.е. |
|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| На выводах МДП | 1,21               | 5,75                        | 0,53                              | 0,11                        |

Для верификации будем использовать значения близкого КЗ, т.е. на выводах МДП.

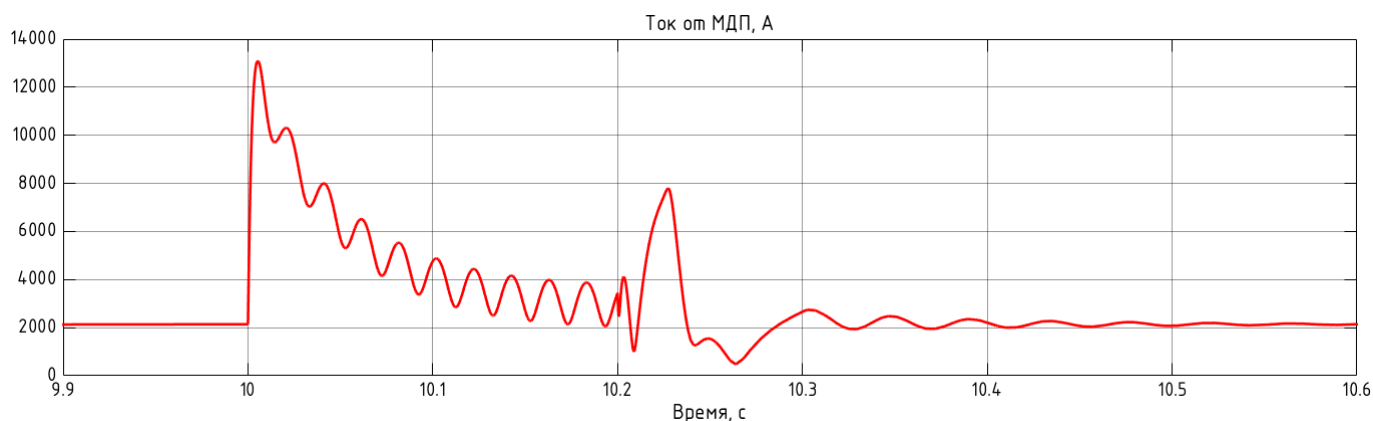


Рис. 7 – Ток от машины двойного питания

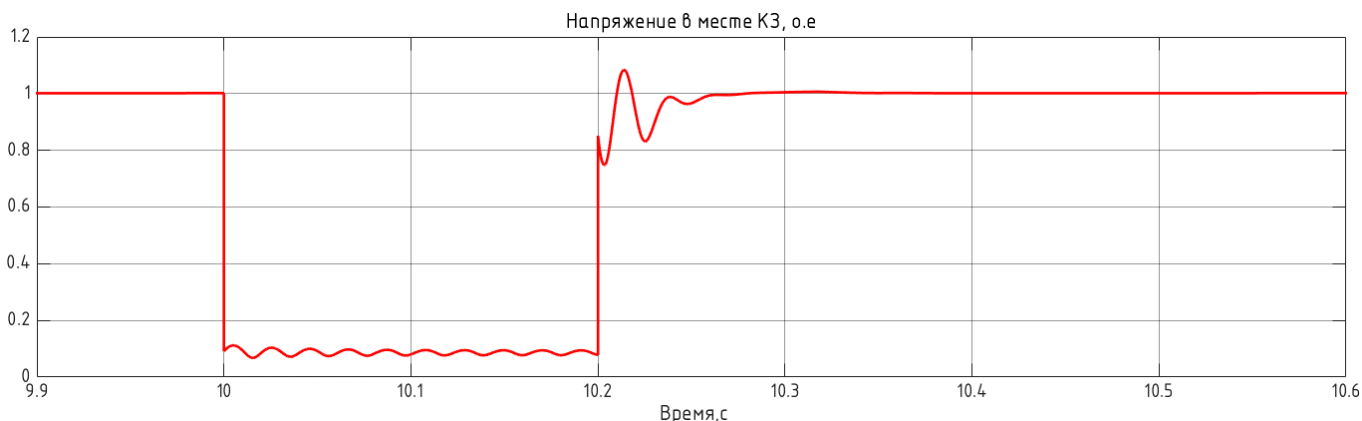


Рис. 8 – Напряжение в месте короткого замыкания

В качестве базисных значений величин принимаются значения в предшествующем режиме. Тогда кратность тока КЗ в результате моделирования составляет 6,02 о.е., а остаточное напряжение на шине КЗ – 0,13 о.е.

Разница между полученными значениями и значениями из статьи составляет:

- по току – 0,26 о.е. (4,5%);
- по остаточному напряжению – 0,01 о.е. (9,1%).

Таким образом, относительная погрешность верификации модели по двум режимам не превысила 10%.

#### Описание расчетных условий

Расчетная схема представлена ниже (см. рисунок 9). Время начала КЗ – 10 с, вид КЗ – трехфазное, длительность КЗ – 0,2 с, сопротивление КЗ – 0,02 Ом.

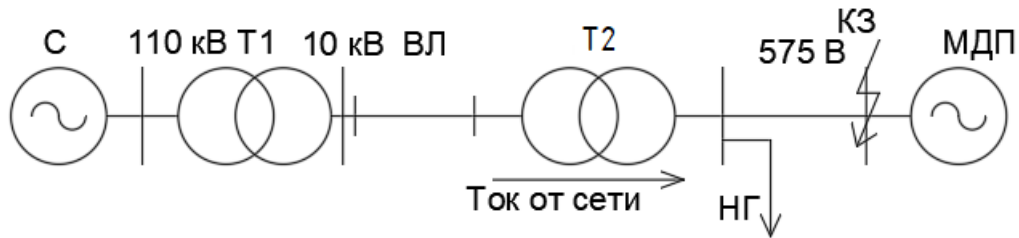


Рис. 9 – Расчетная схема

Было принято, что механический момент, приложенный к ротору МДП, постоянный и равен  $-0,5T_{\text{мном}}$ .

Расчетный диапазон изменения реактивной мощности был принят равным 0,75 как для синхронной зоны «Континентальная Европа» (согласно таблице 1).

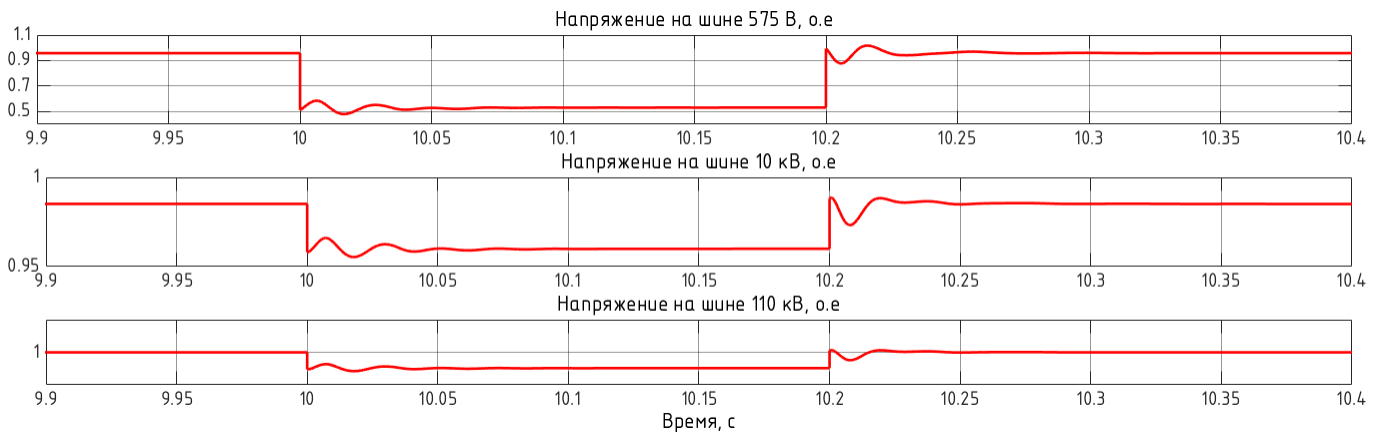
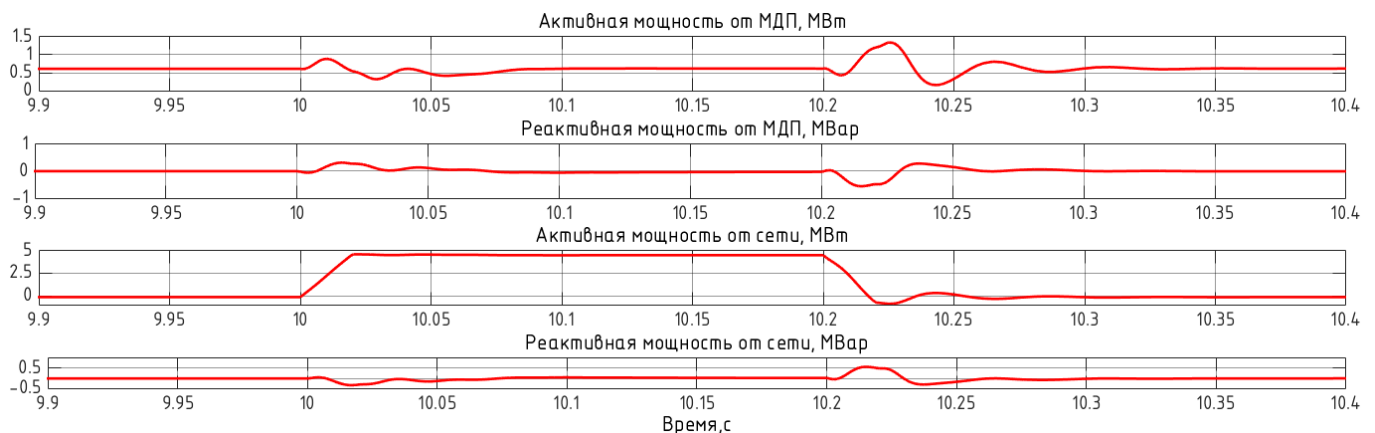
NGET Grid Code [24] (Англия, Шотландия, Уэльс) требует, чтобы ВЭУ вырабатывала максимальную реактивную мощность при КЗ в энергосистеме.

Были рассмотрены следующие расчетные случаи:

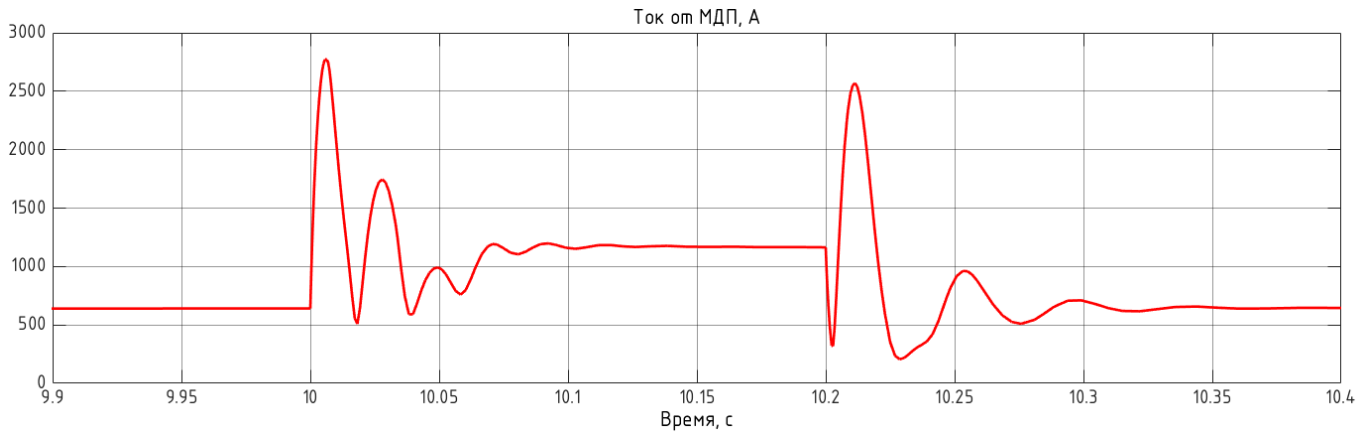
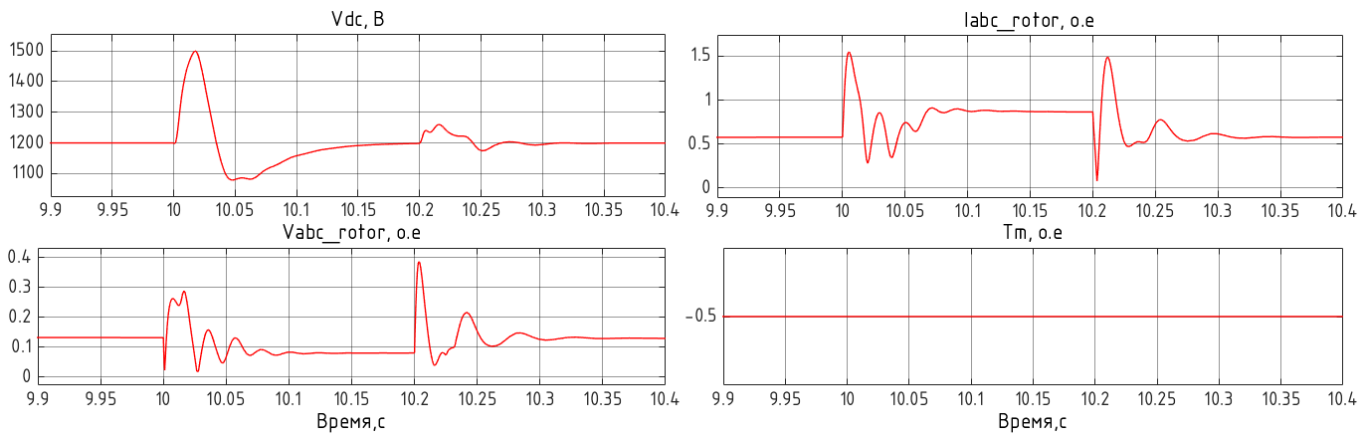
1. МДП не участвует в регулировании реактивной мощности и генерируемая реактивная мощность до и при КЗ равна нулю.
2. МДП до и при КЗ генерирует реактивную мощность, равную 0,75 о.е.
3. МДП до и при КЗ потребляет реактивную мощность, равную 0,75 о.е.
4. МДП до КЗ потребляет реактивную мощность, равную 0,75 о.е, а во время КЗ уставку вырабатываемой реактивной мощности возрастает со до 0,75 о.е.

#### Моделирование КЗ на выводах машины двойного питания, не участвующей в регулировании реактивной мощности

Уставка реактивной мощности равна нулю как до КЗ, так и после. Результаты моделирования представлены ниже (см. рисунки 10-13).

Рис. 10 – Графики действующих значений напряжений на шинах 575 В, 10 кВ и 110 кВ при КЗ на выводах МДП при  $Q = 0$ Рис. 11 – Графики активной и реактивной мощности от МДП и от сети при  $Q = 0$

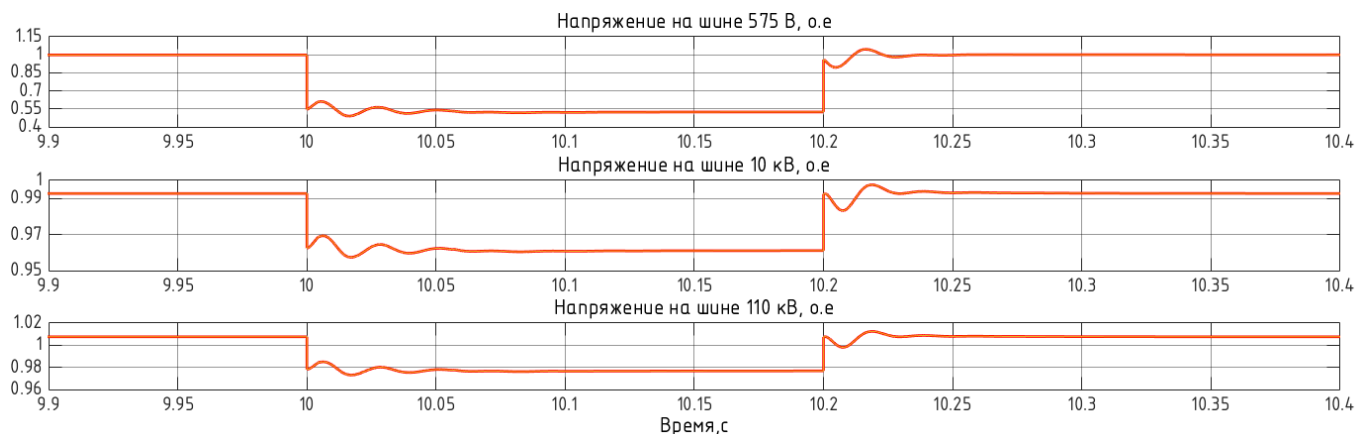


Рис. 12 – График действующего значения тока от МДП при  $Q = 0$ Рис. 13 – Графики действующих значений напряжения на звене постоянного тока, тока и напряжения статора МДП и момента, приложенного к валу МДП при  $Q = 0$ 

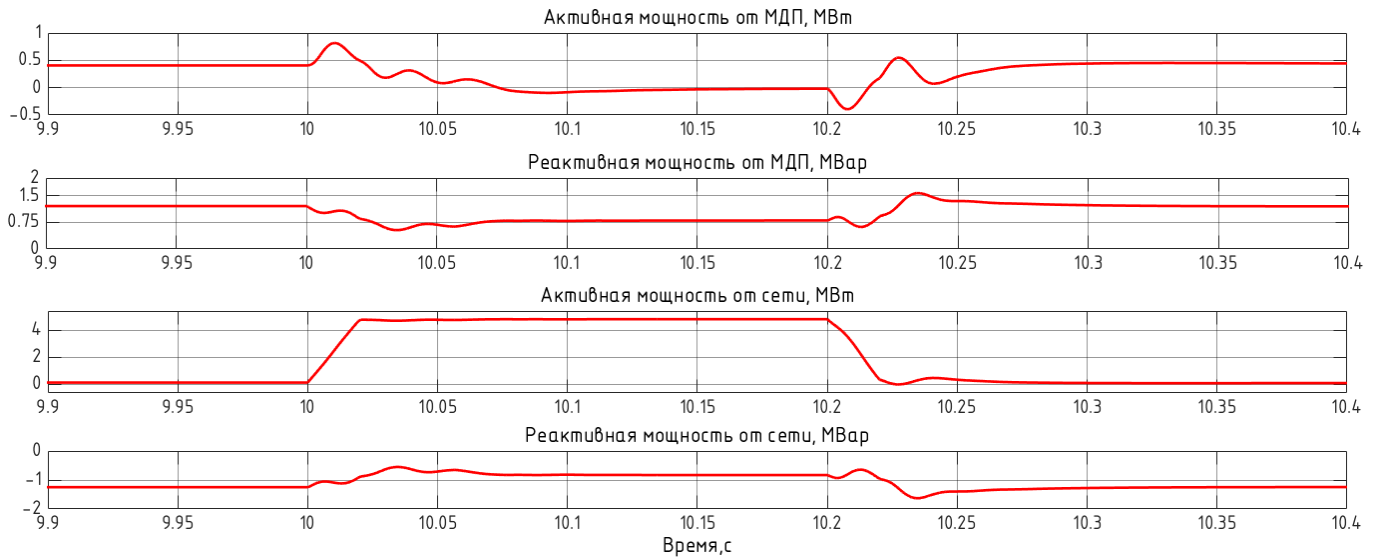
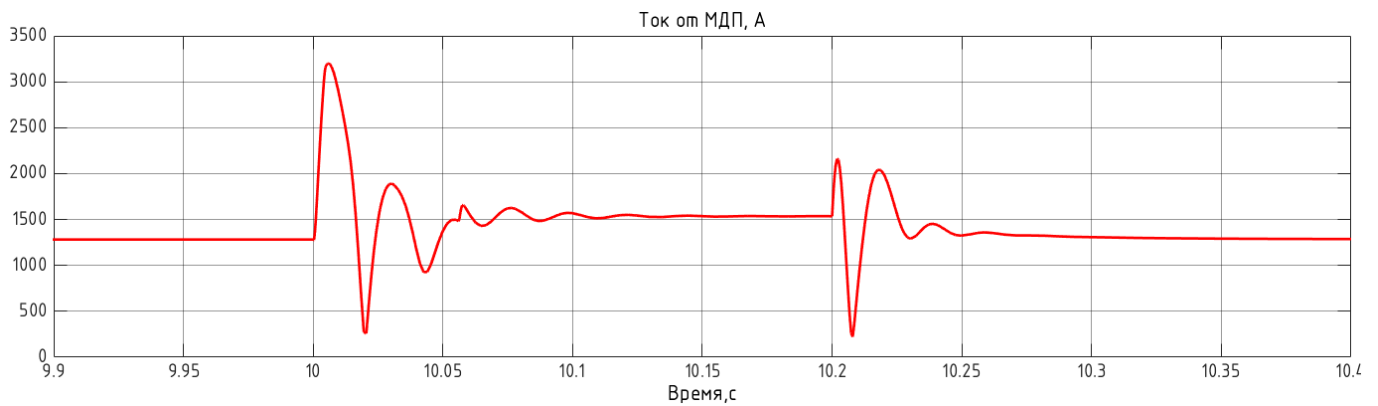
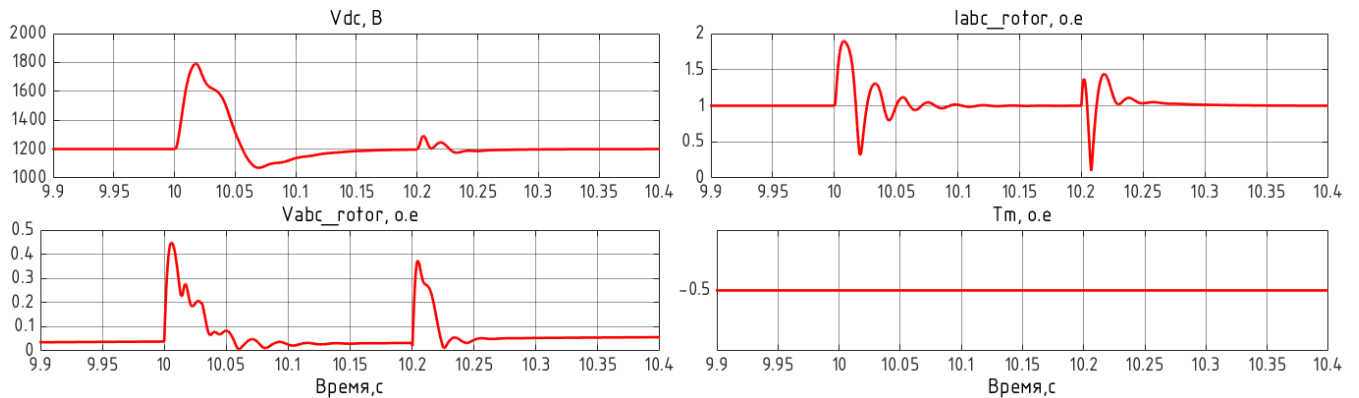
Как видно из результатов моделирования, при КЗ МДП продолжает вырабатывать активную мощность, остаточное напряжение на выводах МДП – 0,5 о.е., пиковое значение напряжения на звене постоянного тока (конденсаторе) – 1610 В, тока ротора – 1,6 о.е. Максимальное значение тока от МДП – 3000 А, установившееся значение ТКЗ от МДП – 1280 А, что по отношению к предшествующему режиму составляет 4,69 о.е. и 2,0 о.е. соответственно.

#### Моделирование КЗ на выводах машины двойного питания, генерирующей реактивную мощность

Уставка реактивной мощности равна 0,75 о.е. как до КЗ, так и после. Результаты моделирования представлены ниже (см. рисунки 14-17).

Рис. 14 – Графики действующих значений напряжений на шинах при КЗ на выводах МДП при  $Q = 0,75$  о.е.



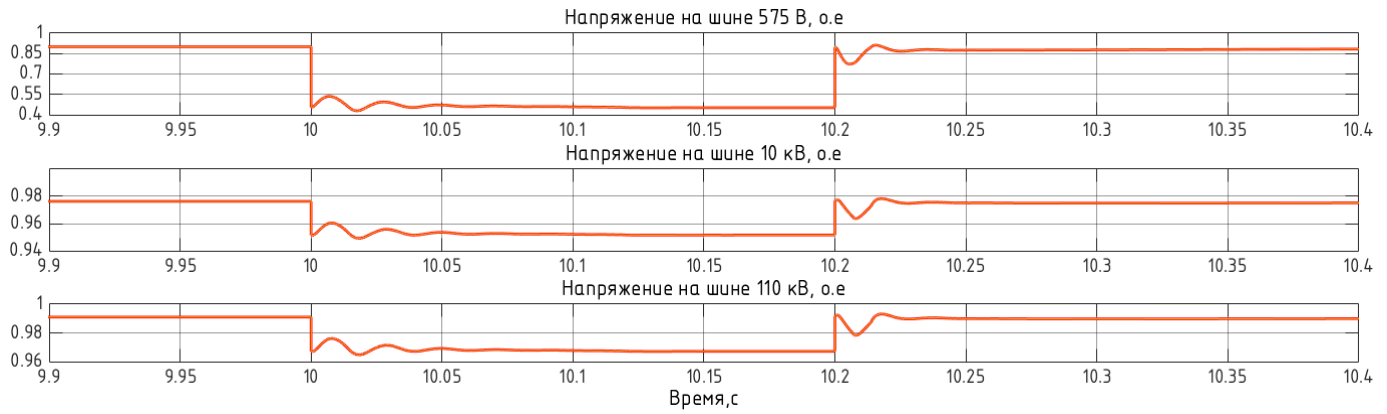
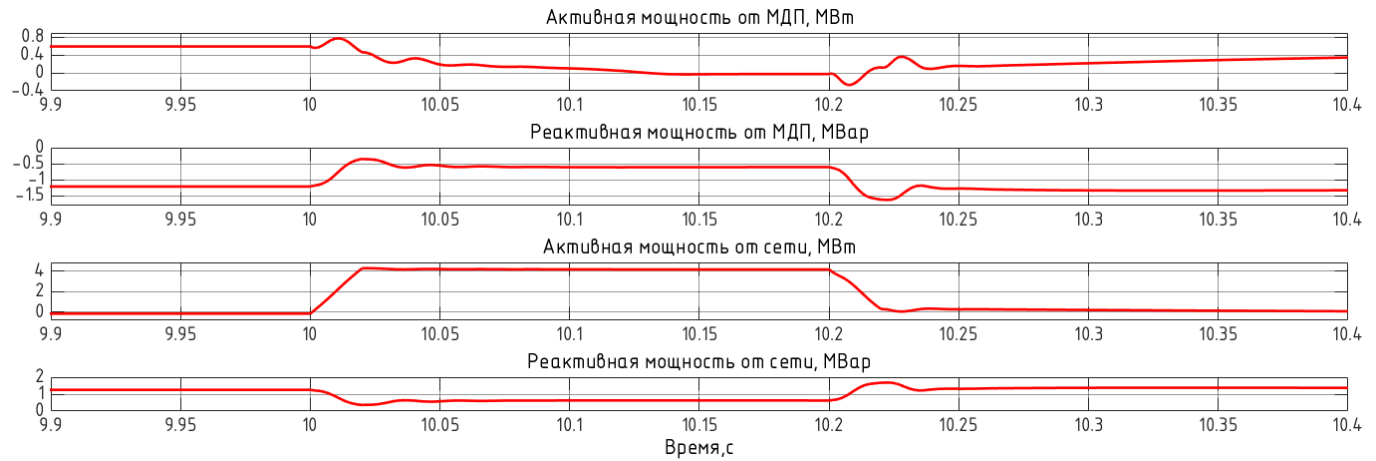
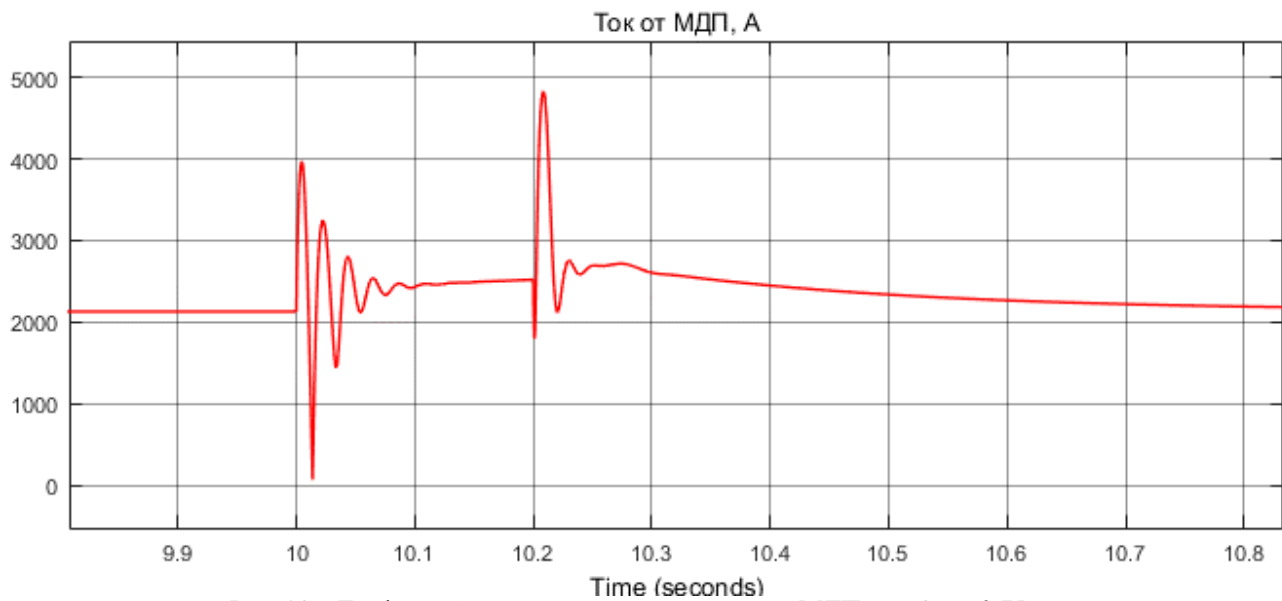
Рис. 15 - Графики активной и реактивной мощности от МДП и от сети при  $Q = 0,75$  о.е.Рис. 16 – График действующего значения тока от МДП при  $Q = 0,75$  о.е.Рис. 17 – Графики действующих значений напряжения на звене постоянного тока, тока и напряжения статора МДП и момента, приложенного к валу МДП при  $Q = 0,75$  о.е.

Как видно из результатов моделирования, генерируемая активная мощность в установившемся режиме при  $Q = 0,75$  о.е. = 1,25 МВар равна 0,42 МВт, что соответствует 0,28 номинального значения, а во время КЗ генерируемая мощность снижается до нуля.

При КЗ остаточное напряжение на выводах МДП – 0,53 о.е., максимальное значение тока от МДП – 3250 А, установившееся значение ТКЗ от МДП – 1540 А, что по отношению к предшествующему режиму составляет 2,84 о.е. и 1,26 о.е. соответственно. Пиковое напряжение на конденсаторе – 1830 В, максимальный ток в роторе – 1,9 о.е.

#### Моделирование КЗ на выводах машины двойного питания, потребляющей реактивную мощность

Уставка реактивной мощности равна -0,75 о.е. как до КЗ, так и после. Результаты моделирования представлены ниже (см. рисунки 18-21).

Рис. 18 – Графики действующих значений напряжений на шинах при КЗ на выводах МДП при  $Q = -0,75$  о.е.Рис. 19 – Графики активной и реактивной мощности от МДП и от сети при  $Q = -0,75$  о.е.Рис. 20 – График действующего значения тока от МДП при  $Q = -0,75$  о.е.

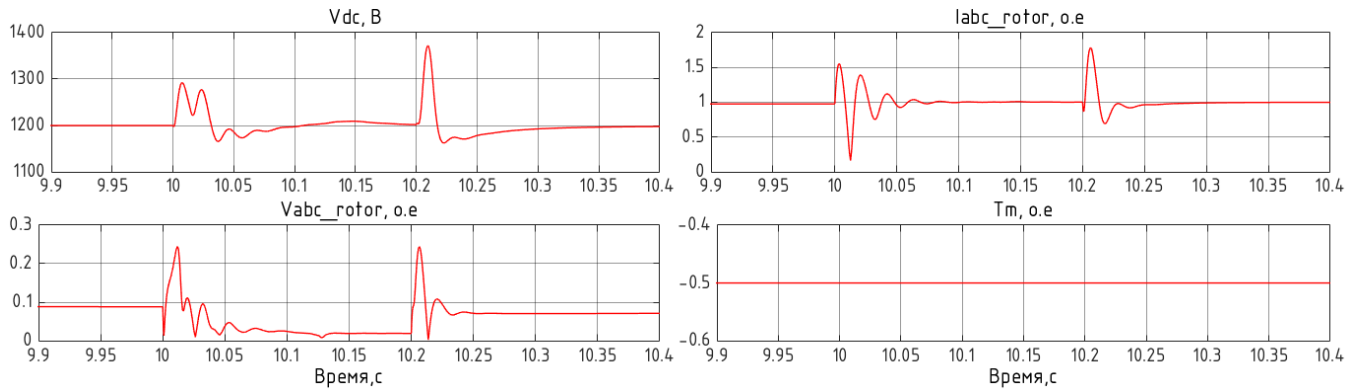


Рис. 21 – Графики действующих значений напряжения на звене постоянного тока, тока и напряжения статора МДП и момента, приложенного к валу МДП при  $Q = -0,75$  о.е.

Как видно из результатов моделирования, генерируемая активная мощность при  $Q = -0,75$  о.е. = -1,25 МВар равна 0,6 МВт, что соответствует 0,4 номинального значения.

При КЗ остаточное напряжение на выводах МДП – 0,46 о.е., максимальное значение тока от МДП – 2800 А, установившееся значение ТКЗ от МДП – 1750 А, что по отношению к предшествующему режиму составляет 1,86 о.е. и 1,17 о.е. соответственно. Пиковое напряжение на конденсаторе при КЗ – 1340 В, максимальный ток в роторе – 1,5 о.е.

#### Моделирование КЗ на выводах машины двойного питания при изменяющемся значении реактивной мощности

Уставка реактивной мощности до КЗ и после устранения КЗ равна - 0,75 о.е., во время КЗ уставка 0,75 о.е. То есть до и после КЗ МДП потребляет реактивную мощность, а во время КЗ вырабатывает максимально возможную реактивную мощность с целью повышения напряжения в точке примыкания ВЭУ к энергосистеме.

Результаты моделирования представлены ниже (см. рисунки 22-25).

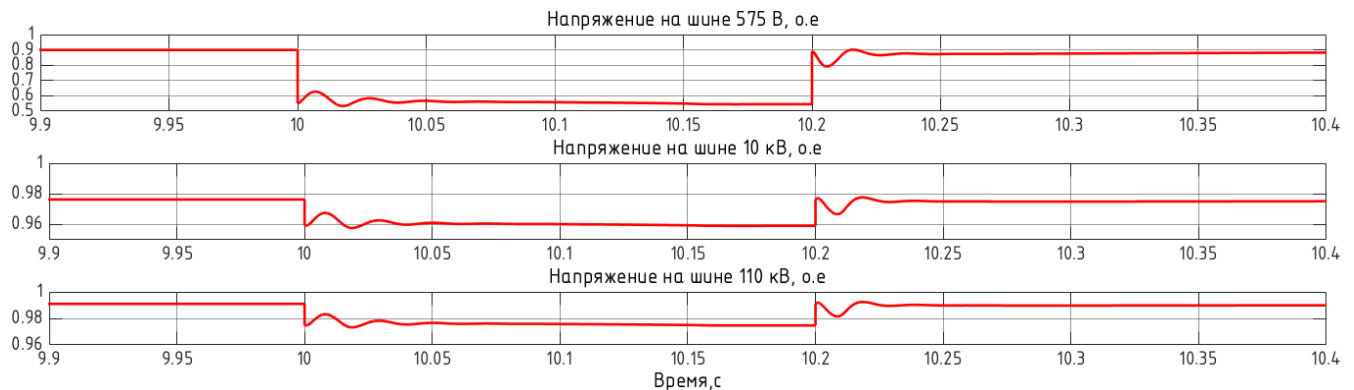


Рис. 22 – Графики напряжений на шинах при КЗ на выводах МДП при  $Q = var$

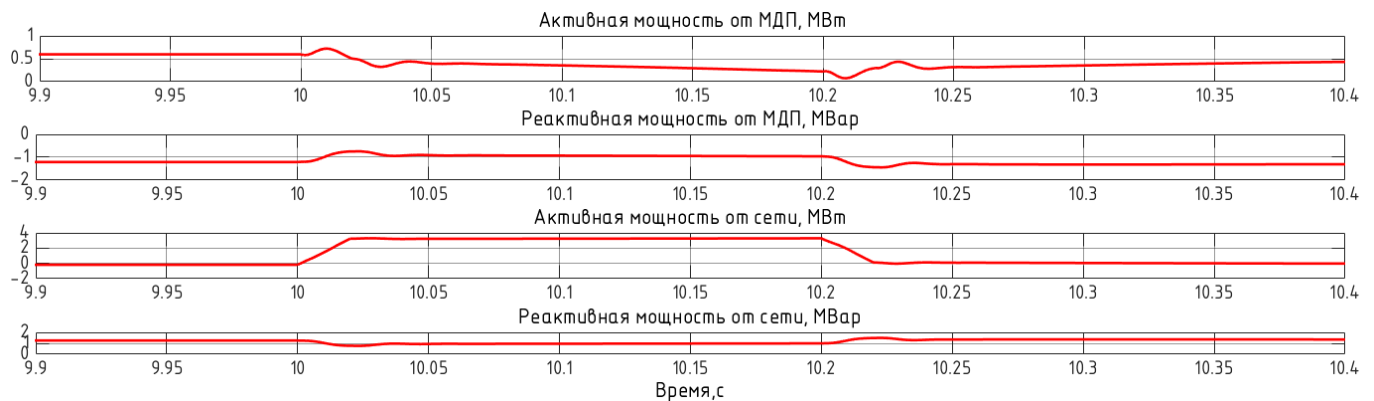
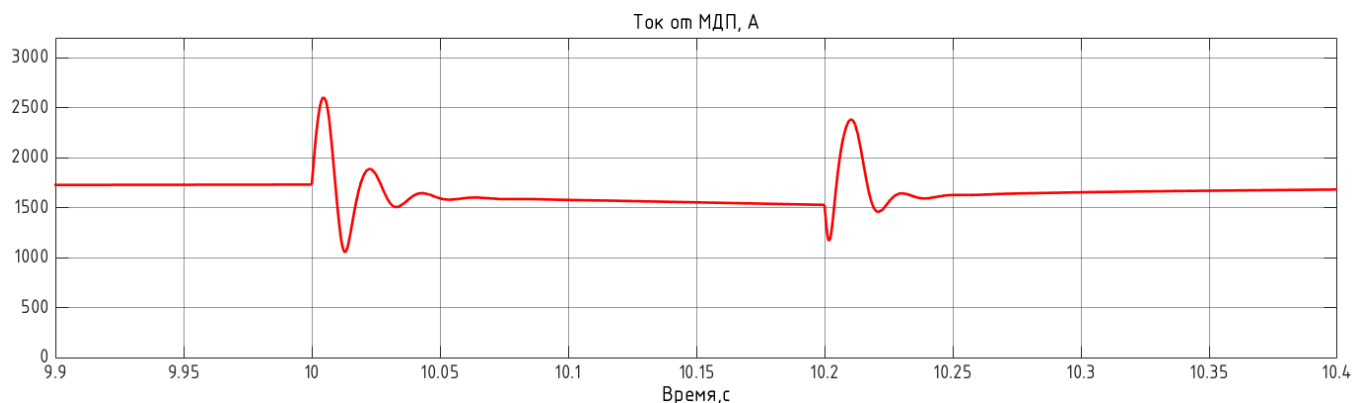
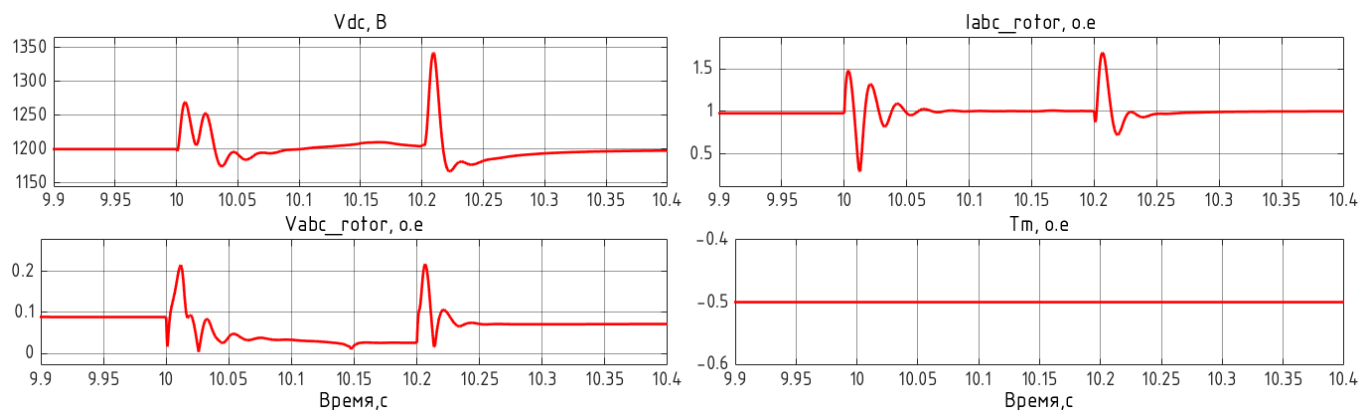


Рис. 23 – Графики активной и реактивной мощности от МДП и от сети при  $Q = var$

Рис. 24 – График действующего значения тока от МДП при  $Q = var$ Рис. 25 – Графики действующих значений напряжения на звене постоянного тока, тока и напряжения статора МДП и момента, приложенного к валу МДП при  $Q = var$ 

При КЗ остаточное напряжение на выводах МДП – 0,55 о.е., максимальное значение тока от МДП – 2650 А, установившееся значение ТКЗ от МДП ~ 1200 А, что по отношению к предшествующему режиму составляет 1,76 о.е. и ~ 0,8 о.е. соответственно. Пиковое напряжение на конденсаторе при КЗ – 1340 В, максимальный ток в роторе – 1,5 о.е.

### Обсуждение

Результаты моделирования сведены в таблицу (см. таблицу 12).

Таблица 13 – Результаты моделирования коротких замыканий при различной реактивной мощности МДП

| Реактивная мощность от МДП                                  | $Q = 0$   | $Q = +0,75$ | $Q = -0,75$ | $Q = var [-0,75; +0,75]$ |
|---|-----------|-------------|-------------|--------------------------|
| Вырабатываемая активная мощность до и после КЗ, о.е.        | 0,4       | 0,28        | 0,4         | 0,4                      |
| Остаточное напряжение в месте КЗ, о.е.                      | 0,5       | 0,53        | 0,46        | 0,55                     |
| Действующее значение тока от МДП в предшествующем режиме, А | 640       | 1280        | 1500        | 1500                     |
| Пиковое значение тока от МДП, о.е./А                        | 4,69/3000 | 2,54/3250   | 1,86/2800   | 1,76/2650                |
| Установ. значение тока КЗ от МДП, о.е./А                    | 2,0/1280  | 1,20/1540   | 1,17/1750   | ~0,8/1200                |
| Пиковое значение напряжения на ШПТ при КЗ, В                | 1610      | 1830        | 1340        | 1340                     |
| Пиковое значение тока ротора, о.е.                          | 1,6       | 1,9         | 1,5         | 1,5                      |

Как видно из результатов моделирования, при генерации реактивной мощности снижается генерируемая активная мощность МДП, так как ее часть подается в цепь ротора.

В случае возникновения КЗ в режиме, когда МДП генерирует в сеть реактивную мощность, ток КЗ максимален, что следует учитывать при выборе коммутационной аппаратуры, а также возникновение КЗ в данном режиме приводит к прерыванию выработки активной мощности во время КЗ.

В рассматриваемом случае с помощью регулирования реактивной мощности удастся увеличить остаточное напряжение при КЗ на шине МДП на 10% (с 0,5 до 0,55 о.е.) а также уменьшить пиковое значение тока короткого замыкания на 11,6% (с 3000 А до 2650 А), что положительно отражается на режиме сети.

Также при регулировании реактивной мощности МДП снижается пиковое значение тока в роторе при КЗ и пиковое значение напряжения на звене постоянного тока на 6% и 16,7% соответственно, что снижает износ МДП.

Но при выборе оборудования стоит учитывать, что при потреблении и генерации реактивной мощности увеличивается ток в установившемся режиме работы.

### Заключение

В результате выполнения данного исследования была выполнена оценка влияния машин двойного питания, участвующих в регулировании реактивной мощности, на параметры коротких замыканий и по работе можно сделать следующие выводы:

- при регулировании реактивной мощности МДП следует учитывать возрастание токов в сети в установившихся режимах;
- в случае возникновения КЗ в режиме, когда МДП генерирует в сеть реактивную мощность, ток КЗ максимален, что следует учитывать при выборе коммутационной аппаратуры, а также при возникновении КЗ в данном режиме прерывается выработка активной мощности МДП;
- генерация реактивной мощности МДП при КЗ позволяет значительно снизить токи КЗ (на 11,6%), а также увеличить остаточное напряжение на шинах МДП (на 10%);
- регулирования реактивной мощности позволяет снизить износ МДП при близких КЗ путем снижения бросков тока в цепях ротора и статора, а также путем снижения перенапряжения на звене постоянного тока.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared

### Список литературы / References

1. Министерство энергетики Российской Федерации: «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 01.12.19).
2. Highlights of the REN21 Renewables 2017 Global Status Report in perspective. URL: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/170607\\_GSR\\_2017\\_Highlights.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/170607_GSR_2017_Highlights.pdf). (дата обращения: 01.12.19).
3. Сидоренко, Г.И. Анализ изменения значений капитальных вложений на строительство энергетических объектов на основе возобновляемых источников энергии / Г.И. Сидоренко, П.Ю. Михеев // Энергетик. – 2017. - № 10. – С. 34-37.
4. Ассоциация «НП Совет Рынка»: «Возобновляемые источники энергии» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (дата обращения 01.12.19)
5. Министерство энергетики Российской Федерации: «Доклад о реализации Энергетической стратегии России на период до 2030 года по итогам 2018 года» [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/1026/100241> (дата обращения: 01.12.19).
6. ГОСТ Р 58491 – 2019. Электроэнергетика. Распределенная генерация. Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок. Москва: Стандартинформ, 2019.
7. Илюшин, П.В. Совершенствование противоаварийного и режимного управления энергорайонов с распределенной генерацией: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (05.14.02) / Илюшин Павел Владимирович; ФГАОУ ДПО «Петербургский Энергетический Институт Повышения Квалификации». – Санкт-Петербург, 2019. – 499 с.
8. Муравьев, А.А. Управление машиной двойного питания, генерирующей электроэнергию при переменной частоте вращения: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (05.09.03) / Муравьев Артем Артурович; ФГБОУ ВО «Липецкий Государственный Технический Университет». – Липецк, 2018. – 159 с.
9. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО: «Распределенная энергетика в России: потенциал развития» [Электронный ресурс]. URL: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_DER-3.0\\_2018.02.01.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf) (Дата обращения 05.12.19).
10. Rhodium Group. The State of the Art in Valuing Distributed Energy Resources. January 2017.
11. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis, version 11.0 – 2017.
12. Ежегодник Enerdata: «Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии» [Электронный ресурс]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html> (Дата обращения 12.12.19).
13. Navigant Research. Global DER Deployment Forecast Database, 4Q 2017.
14. Куликов А.Л. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики / Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. // Вестник НГИЭИ. 2018. №11 (90). С. 123 – 136.
15. Кожуховский И.С. О проблемах развития малой распределенной энергетики в России // Форум ENES 2014. Москва, 20 ноября 2014 г.
16. Храмов А. Распределенная энергетика в России. Генераторы для применений с дизельными двигателями, а также с газовыми и паровыми турбинами / Храмов А., Поздняков А. // Control Engineering Россия. 2015. №6 (60). С. 48 – 49.

17. ГОСТ Р 51238-98. Нетрадиционная энергетика. Гидроэнергетика малая. Термины и определения. Москва: Госстандарт России, 1998.
18. Шерязов С.К. Ветроэлектрическая станция в системе распределенной генерации // СОК. 2018. №10. С. 90 – 93.
19. Микитич Е.Н. Конструкции генераторов ВЭУ / Микитич Е.Н., Олешкевич М.М. // Актуальные проблемы энергетики. СНТК 72. 2016. С. 295 – 298.
20. Аристов А.В. Современное состояние и перспективы развития машин двойного питания в составе электропривода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. С. 135 – 139.
21. Котов А.А. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / Котов А.А., Неустроев Н.И. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2017. Т. 17. №4. С. 80 – 89.
22. Некоммерческое партнерство «Научно-технический совет Единой энергетической системы»: «Протокол совместного заседания секции «Управления режимами энергосистем РЗА» и секции «Проблемы надежности и эффективности релейной защиты и средства автоматического системного управления в ЕЭС России» НП «НТС ЕЭС» по теме: «Требования к системам регулирования, управления и защиты возобновляемых источников энергии (ВИЭ) при их работе в составе ЕЭС России» [Электронный ресурс]. URL: [http://nts-ees.ru/sites/default/files/2018.08.02\\_vie.pdf](http://nts-ees.ru/sites/default/files/2018.08.02_vie.pdf) (Дата обращения: 02.02.20).
23. Shahzad Nazir Symmetrical Short-Circuit Parameters Comparison of DFIG-WT / Shahzad Nazir, M.; Wu, Q.; Li, M. Int. J. Electr. Comput. Eng. Syst. 2017, 8, pp 77–83.
24. National Grid Electricity Transmission // «Grid Code» (2010).

#### Список литературы / References in English

1. Ministerstvo jenergetiki Rossijskoj Federacii: «Jenergeticheskaja strategija Rossii na period do 2030 goda» [Ministry of Energy of the Russian Federation: “Energy Strategy of Russia for the Period until 2030”] [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed: 01.12.19). [in Russian]
2. Highlights of the REN21 Renewables 2017 Global Status Report in perspective. URL: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/170607\\_GSR\\_2017\\_Highlights.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/170607_GSR_2017_Highlights.pdf). (accessed: 01.12.19). [in Russian]
3. Sidorenko, G.I. Analiz izmenenija znachenij kapital'nyh vložhenij na stroitel'stvo jenergeticheskikh objektov na osnove vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии [Analysis of changes in the values of capital investments for the construction of energy facilities based on renewable energy sources] / G.I. Sidorenko, P.Ju. Miheev // Jenergetik [Energetics]. – 2017. – № 10. – P. 34-37. [in Russian]
4. Associacija «NP Sovet Rynka»: «Vozobnovljaemye istochniki jenerгии» [Association NP Market Council: Renewable energy sources] [Electronic resource]. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (accessed 01.12.19) [in Russian]
5. Ministerstvo jenergetiki Rossijskoj Federacii: «Doklad o realizacii Jenergeticheskoi strategii Rossii na period do 2030 goda po itogam 2018 goda» [Ministry of Energy of the Russian Federation: “Report on the implementation of the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030 following the results of 2018”] [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/1026/100241> (accessed: 01.12.19). [in Russian]
6. GOST R 58491 – 2019. Jelektrojenergetika. Raspredeleonnaja generacija. Tehnicheskie trebovanija k ob#ektam generacii na baze vetrojenergeticheskikh ustanovok. [Power industry. Distributed generation. Technical requirements for generating facilities based on wind power plants] Moskva: Standartinform, 2019. [in Russian]
7. Iljushin, P.V. Sovershenstvovanie protivovarijnogo i rezhimnogo upravlenija jenergorajonov s raspredelelnoju generaciej [Improving emergency and regime control of distributed generation energy areas]: dis....of PhD in Engineering (05.14.02) / Iljushin Pavel Vladimirovich; FGAOU DPO «Peterburgskij Jenergeticheskij Institut Povyshenija Kvalifikacii». – Sankt-Peterburg, 2019. – 499 p. [in Russian]
8. Murav'ev, A.A. Upravlenie mashinoy dvojnogo pitaniya, generirujushhej jelektrojenergiju pri peremennom chaste vrashhenija. [Control of a doubly-fed machine, generating electricity at a variable speed] dis....of PhD in Engineering (05.09.03) / Murav'ev Artem Arturovich; FGBOU VO «Lipeckij Gosudarstvennyj Tehniceskij Universitet». – Lipeck, 2018. – 159 p. [in Russian]
9. Centr jenergetiki Moskovskoj shkoly upravlenija SKOLKOVO: «Raspredeleonnaja jenergetika v Rossii: potencial razvitiya» [Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO: “Distributed Energy in Russia: Development Potential”] [Electronic resource]. URL: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_DER-3.0\\_2018.02.01.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf) (accessed: 05.12.19). [in Russian]
10. Rhodium Group. The State of the Art in Valuing Distributed Energy Resources. January 2017.
11. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis, version 11.0 – 2017.
12. Ezhegodnik Enerdata: «Dolja vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии v proizvodstve jelektrojenergii» [Enerdata Yearbook: “The share of renewable energy in electricity production”] [Electronic resource]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html> (accessed 12.12.19). [in Russian]
13. Navigant Research. Global DER Deployment Forecast Database, 4Q 2017.
14. Kulikov A.L. Problemy i osobennosti raspredelelnoju jelektrojenergetiki [Problems and features of distributed electricity] / Kulikov A.L., Osokin V.L., Papkov B.V. // Vestnik NGIJeI [Bulletin of NIIEI]. 2018. №11 (90). pp. 123 – 136. [in Russian]
15. Kozhuhovskij I.S. O problemah razvitiya maloj raspredelelnoju jenergetiki v Rossii [About the problems of development of small distributed energy in Russia] // Forum ENES 2014 [ENES 2014 Forum]. Moscow, 20 nov. 2014 y. [in Russian]
16. Hramov A. Raspredeleonnaja jenergetika v Rossii. Generatory dlja primenenij s dizel'nyimi dvigateljami, a takzhe s gazovymi i parovymi turbinami [Distributed energy in Russia. Generators for applications with diesel engines, as well as gas and steam turbines] / Hramov A., Pozdnjakov A. // Control Engineering Rossija [Control Engineering Russia]. 2015. №6 (60). pp. 48 – 49. [in Russian]

17. GOST R 51238-98. Netradicionnaja jenergetika. Hidrojenergetika malaja. Terminy i opredelenija.[ Alternative energy. Small hydropower. Terms and Definitions] Moskva: Gosstandart Rossii, 1998. [in Russian]
18. Sher'jazov S.K. Vetrojelektricheskaja stancija v sisteme raspredelennoj generacii [Wind power station in a distributed generation system] // SOK. 2018. №10. pp. 90 – 93. [in Russian]
19. Mikitich E.N. Konstrukcii generatorov VJeU [Wind turbine generator designs] / Mikitich E.N., Oleshkevich M.M., // Aktual'nye problemy jenergetiki.[Actual problems of energy] SNTK 72. 2016. pp. 295 – 298. [in Russian]
20. Aristov A.V. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija mashin dvojnogo pitaniya v sostave jelektroprivoda kolebatel'nogo dvizhenija [The current state and development prospects of double-fed machines as part of an oscillating electric drive] // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta [News of Tomsk Polytechnic University]. 2004. V. 307. № 6. pp. 135 – 139. [in Russian]
21. Kotov A.A. Primenenie generatora dvojnogo pitaniya dlja vetrojenergeticheskikh ustanovok maloj, srednej i bol'shoj moshhnosti [Application of a dual-power generator for small, medium and high power wind power plants] / Kotov A.A., Neustroev N.I. // Vestnik JuUrGU. Serija «Jenergetika».[ Bulletin of SUSU. Series "Energy"] 2017. v. 17. №4. pp. 80 – 89. [in Russian]
22. Nekommercheskoe partnerstvo «Nauchno-tehnicheskij sovet Edinoj jenergeticheskoy sistemy»: «Protokol sovmestnogo zasedanija sekcii «Upravlenija rezhimami jenergosistem RZiA» i sekcii «Problemy nadezhnosti i jeffektivnosti relejnoj zashhity i sredstva avtomaticheskogo sistemnogo upravlenija v EJeS Rossii» NP «NTS EJeS» po teme: «Trebovanija k sistemam regulirovanija, upravlenija i zashhity vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии (VIJe) pri ih rabote v sostave EJeS Rossii» [Non-profit partnership “Scientific and Technical Council of the Unified Energy System”: “Protocol of a joint meeting of the section“ Control of the modes of energy systems of the relay protection and automation system ”and the section“ Problems of reliability and efficiency of relay protection and automatic system control in the UES of Russia ”NP“ NTS UES ”on the topic:“ Requirements for the systems of regulation, management and protection of renewable energy sources (RES) during their operation as part of the UES of Russia”] [Electronic resource].URL: [http://nts-ees.ru/sites/default/files/2018.08.02\\_vie.pdf](http://nts-ees.ru/sites/default/files/2018.08.02_vie.pdf) (accessed: 02.02.20). [in Russian]
23. Shahzad Nazir Symmetrical Short-Circuit Parameters Comparison of DFIG–WT / Shahzad Nazir, M.; Wu, Q.; Li, M. Int. J.Electr. Comput. Eng. Syst. 2017, 8, pp. 77–83
24. National Grid Electricity Transmission // «Grid Code». 2010.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.018>**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ**

Научная статья

**Соколов П.Э.<sup>1,\*</sup>, Нечай Д.В.<sup>2</sup>, Сентенберг С.А.<sup>3</sup>, Мячина А.А.<sup>4</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3960-5010;<sup>1, 2, 4</sup> Институт архитектуры и строительства, Волгоградский государственный технический университет,  
Волгоград, Россия;<sup>3</sup> Волгоградский технологический колледж, Волгоград, Россия

\* Корреспондирующий автор (pr7391[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Области применения керамзитобетон в строительстве расширяются с каждым годом. Это в свою очередь приводит к повышению требований не только к материалам, но и технологии изготовления керамзитобетон. Одним из направлений повышения эксплуатационных свойств керамзитобетон является применение и широкое внедрение различных видов химических добавок – суперпластификаторов. Проблема выбора наилучшей добавки из множества требует технического обоснования ее эффективности. С этой целью проведены исследования влияния различных добавок суперпластификаторов на изменение свойств керамзитобетонных смесей и керамзитобетон. Произведен анализ полученных при исследовании данных. Результаты анализа позволили дать оценку влияния исследованных добавок – суперпластификаторов на свойства керамзитобетона. На основании проведенного корреляционного анализа выявлены зависимости между исследованными характеристиками и теснота связи между ними. На примере одной из добавок построена регрессионная модель зависимости прочности керамзитобетона от расхода добавки. Применение коэффициента конструктивного качества позволило дать оценку эффективности керамзитобетон с добавками суперпластификаторов

**Ключевые слова:** керамзитобетон, суперпластификатор, эффективность, состав, корреляционно-регрессионный анализ.

**EVALUATING THE EFFICIENCY OF SUPERPLASTICIZER USAGE FOR OPERATING ABILITIES  
IMPROVEMENT OF EXPANDED-CLAY CONCRETE**

Research article

**Sokolov P. E.<sup>1,\*</sup>, Nechai D. V.<sup>2</sup>, Sentenberg S. A.<sup>3</sup>, Miachina A. A.<sup>4</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3960-5010;<sup>1, 2, 4</sup> Institute of Engineering and Architecture, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia;<sup>3</sup> Volgograd College of Technology, Volgograd, Russia

\* Corresponding author (pr7391[at]yandex.ru)

**Abstract**

Expanded-clay concrete application domain for construction expands as the years pass. Therefore requirements not just to the materials but to the expanded-clay concrete manufacturing technologies increase. One of the ways to improve the operating abilities of expanded-clay concrete is the usage and large-scale implementation of various chemical additives – superplasticisers. The problem of choosing the best additive demands technical justification of its efficiency. To achieve that goal, research concerning the effect that various superplasticiser additives have on the change of expanded-clay concrete aggregates and expanded-clay concrete performance is conducted. The data obtained through the research is analysed. Analysis results enabled the evaluation of the effect that the studied additives – superplasticisers – had on the expanded-clay concrete performance. Based on the correlation analysis, dependence of the studied characteristics and the strength of relationship between them is discovered. Through the example of one of the additives, the regression model of expanded-clay concrete strength dependence on the amount of the additive is built. The usage of design quality index enabled the evaluation of expanded-clay concrete containing superplasticisers efficiency

**Keywords:** expanded-clay concrete, superplasticizer, efficiency, composition, correlation-regressive analysis.

**Введение**

В настоящее время бетон и железобетон остается основным материалом для изготовления изделий и конструкций, возведения зданий и сооружений. Как строительный материал – бетон обладает сложной структурой и свойствами позволяющими эксплуатировать изделия и конструкции в разных условиях.

Проектирование состава бетона позволяет учесть различные факторы, влияющие на его структуру и получить материал с заданными, требуемыми свойствами [1].

Одной из наиболее распространенных и востребованных разновидностей цементных бетонов на искусственных пористых заполнителях является керамзитобетон [2], [3]. Как и любой легкий бетон – керамзитобетон наряду с требуемой прочностью должен обладать более низкой плотностью, которая должна обеспечить определенные теплофизические свойства [4]. Такие бетоны изготавливают с использованием искусственных пористых заполнителей. В силу ряда объективных причин наибольшее распространение среди искусственных пористых заполнителей получил керамзит. Мировая практика в строительстве показывает, что применение легкого бетона стремительно возрастает. В отдельную группу относят цементные бетоны на различных видах пористых заполнителей. В силу экологических и других аспектов искусственные пористые заполнители широко применяются в строительстве. Некоторые из них, например, керамзит на протяжении значительного промежутка времени находится на относительно высоком уровне производства и применения в строительстве [2], [3]. Легкий бетон на керамзите имеет столь разнообразные свойства,



что, обладая определенной прочностью, может иметь различные показатели плотности и при этом обладать теплофизическими или конструкционными характеристиками [4]. Что дает хорошую возможность эффективно регулировать и получать необходимые свойства керамзитобетона для строительства.

Керамзит применяется во многих видах строительства, как в России, так и за рубежом [5], [6], [7]. Однако с развитием технологий и появлением новых видов материалов сферы применения керамзитобетона расширяются, повышаются требования к свойствам керамзитобетонной смеси и керамзитобетона, технологии его производства и эксплуатации готовых изделий и конструкций [8]. Поэтому проблема повышения эксплуатационных свойств керамзитобетона и эффективности изготовления керамзитобетонных изделий из него является актуальной задачей.

Одним из путей решения этой задачи является внедрение и применение различных видов современных и перспективных химических добавок. Их использование позволяет целенаправленно регулировать свойства керамзитобетонных смесей и изделий на их основе.

Среди химических добавок в зависимости от сферы воздействия на свойства бетона наибольшее распространение получили пластифицирующие и комплексные добавки. Эффективность применения химических добавок определяется множеством различных факторов, которые позволяют получить необходимый эффект от их введения в керамзитобетонную смесь.

В целях повышения эксплуатационных свойств керамзитобетона на кафедре «Строительные материалы и специальные технологии» ИАиС ВолгГТУ и лаборатории АО «Промстройконструкция» (Волгоград) разработаны составы конструкционного керамзитобетона класса В15. Выбор данного класса объясняется тем, что керамзитобетон этого класса наиболее распространен и востребован в производстве. Подбор состава бетона произведен на основании действующей нормативной документации [9], [11], [12].

Под повышением эффективности легких бетонов, по нашему мнению, следует понимать, прежде всего, повышение степени использования их положительных свойств.

К положительным свойствам легких бетонов по сравнению с тяжелыми относятся:

- меньшая средняя плотность;
- повышение прочности (относительной);
- лучшая теплоизоляционная способность;
- более высокая огнестойкость;
- более высокая сопротивляемость динамическим воздействиям;
- более высокая трещиностойкость.

Кроме того, для легких бетонов характерны более высокая упругость, что позволяет оптимизировать структуру бетона, и в свою очередь способствует повышению надежности и долговечности конструкций.

При выборе марки легких бетонов в целях использования их эффективности следует исходить не только из возможных показателей их прочности, но и из их деформативности, которая в значительной степени зависит от технологических факторов.

В нормативных документах, таких как [13] предусматривается строгое соответствие модуля упругости принимаемой марке бетона. Однако, по данным ряда исследователей, упруго-пластические свойства легких бетонов могут в значительных пределах изменяться при неизменной прочности. Это их свойство является эффективным средством повышения качества конструкции. Прочность же характеризует предельное состояние материала в момент его разрушения.

### Методы и принципы исследования

В работе были использованы следующие материалы. В качестве вяжущего вещества применен портландцемент марки ПЦ 500-Д0-Н [14], производства АО «Себряковцемент». Нормальная густота цементного теста составляет – 27%. Мелкий заполнитель – песок кварцевый, с модулем крупности  $M_k = 1,7$  и насыпной плотностью –  $1466 \text{ кг/м}^3$ . Мелкий заполнитель – добывается на территории Волгоградской области. Крупный заполнитель – керамзитовый гравий фракции – 5-20 мм, марка по прочности П125 и маркой по насыпной плотности Д600.

В работе были использованы следующие химические добавки в бетонную смесь:

- суперпластификатор «MasterPolyNeed 3040» [15], с дозировкой в интервале от 0,3 до 2,0% от массы цемента;
- суперпластификатор «Полипласт СП-1» [16], с дозировкой 0,35-0,8%, от массы цемента;
- суперпластификатор «Muraplast FK49» [17], с дозировкой 0,2-2,0%, от массы цемента.

После подбора состава керамзитобетона согласно [9], [10], [11] производился пересчет материалов для лабораторного замеса емкостью – 11 литров. У приготовленной бетонной смеси определялась подвижность стандартным методом [18]. Расход воды в составах бетонной смеси корректировался так, чтобы подвижность бетонной смеси соответствовала группе П2 (5-8 см, осадки стандартного конуса). Аналогичным образом подбирались составы керамзитобетонов с добавками [19], [20], [21].

Далее изготавливались стандартные бетонные кубы с ребром размером 15 см в количестве 3 шт. для каждой серии. Твердение кубов осуществлялось двумя способами. Первая серия кубов подвергалась тепловой обработке по режиму, принятому на предприятии. После чего определялась прочность пропаренных образцов. Вторая серия кубов твердела в нормальных условиях в течение 28 суток согласно [22], с последующим определением ее прочности.

Прочность образцов определялась на гидравлическом прессе ВМ-3.5.1 (см. рисунок 1). Полученные результаты обрабатывались в соответствии с требованиями [23].



Рис. 1 – Пресс гидравлический ВМ-3.5.1 для испытания образцов на сжатие

### Основные результаты

В результате расчета и лабораторной проверки состава керамзитобетона расходы материалов на контрольный замес составил (в пересчете на 1 м<sup>3</sup> керамзитобетона): цемент – 318 кг; песок – 871 кг; керамзитовый гравий – 345 кг и воды – 235 л. Контрольный состав показал следующие значения по результатам испытаний: прочность после тепловлажностной (ТВО), МПа – 13,4; прочность в возрасте 28 суток, МПа – 19,2; плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup> – 1759; плотность бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup> – 1590.

В таблице 1-3 приведены расходы составляющих и их характеристики для исследованных добавок.

Таблица 1 – Характеристики составов керамзитобетонов в зависимости от дозировки добавки «MasterPolyHeed 3040»

| Показатель  | Номер состава |      |      |      |      |      |      |
|---|---------------|------|------|------|------|------|------|
|   | 1-1           | 1-2  | 1-3  | 1-4  | 1-5  | 1-6  | 1-7  |
| 1   | 2             | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| Расход воды, л  | 153           | 149  | 145  | 142  | 139  | 135  | 132  |
| Расход добавки, %                                     | 0,3           | 0,55 | 0,85 | 1,15 | 1,4  | 1,7  | 2,0  |
| Прочность после ТВО, МПа                              | 15,4          | 16,8 | 18,1 | 19,5 | 20,5 | 22,0 | 23,4 |
| Прочность в возрасте 28 суток, МПа                    | 22,0          | 24,0 | 25,8 | 27,9 | 29,3 | 31,4 | 33,5 |
| Плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>           | 1702          | 1704 | 1707 | 1709 | 1712 | 1714 | 1716 |
| Плотность бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> | 1597          | 1601 | 1605 | 1610 | 1613 | 1616 | 1620 |

Таблица 2 – Характеристики составов керамзитобетонов в зависимости от дозировки добавки «Полипласт СП-1»

| Показатель  | Номер состава |      |      |      |      |      |      |
|---|---------------|------|------|------|------|------|------|
|   | 1-1           | 1-2  | 1-3  | 1-4  | 1-5  | 1-6  | 1-7  |
| 1   | 2             | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| Расход воды, л  | 175           | 176  | 176  | 175  | 175  | 175  | 175  |
| Расход добавки, %                                     | 0,35          | 0,43 | 0,51 | 0,58 | 0,65 | 0,72 | 0,80 |
| Прочность после ТВО, МПа                              | 16,1          | 17,8 | 19,4 | 20,9 | 22,6 | 24,2 | 25,6 |
| Прочность в возрасте 28 суток, МПа                    | 23,1          | 25,4 | 27,8 | 29,9 | 32,2 | 34,6 | 36,7 |
| Плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>           | 1718          | 1725 | 1728 | 1725 | 1725 | 1727 | 1738 |
| Плотность бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> | 1601          | 1605 | 1610 | 1613 | 1617 | 1621 | 1624 |

Таблица 3 – Характеристики составов керамзитобетонов в зависимости от дозировки добавки «Muraplast FK 49»

| Показатель  | Номер состава |      |      |      |      |      |      |
|---|---------------|------|------|------|------|------|------|
|   | 1-1           | 1-2  | 1-3  | 1-4  | 1-5  | 1-6  | 1-7  |
| 1   | 2             | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| Расход воды, л  | 187           | 186  | 186  | 184  | 183  | 182  | 181  |
| Расход добавки, %                                     | 0,2           | 0,5  | 0,8  | 1,1  | 1,4  | 1,7  | 2,0  |
| Прочность после ТВО, МПа                              | 16,0          | 16,9 | 17,7 | 18,2 | 18,7 | 19,1 | 19,4 |
| Прочность в возрасте 28 суток, МПа                    | 22,9          | 24,0 | 25,1 | 26,0 | 26,8 | 27,5 | 28,3 |
| Плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>           | 1728          | 1731 | 1736 | 1738 | 1740 | 1748 | 1750 |
| Плотность бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> | 1600          | 1602 | 1604 | 1606 | 1608 | 1609 | 1612 |

На рисунке 2 приведены графики зависимости прочности полученных керамзитобетонов от расхода исследованных добавок.

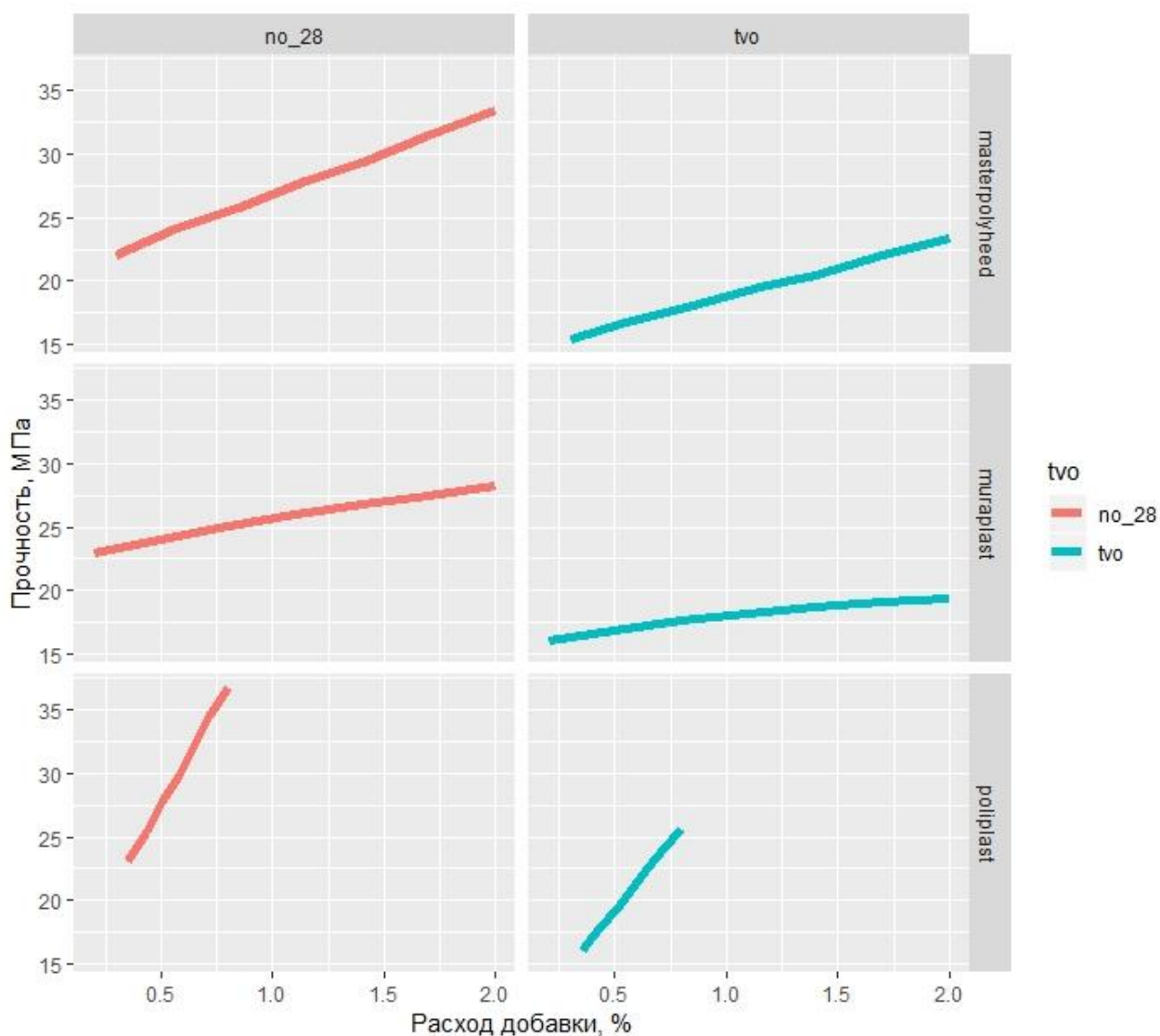


Рис. 2 – Зависимости прочности керамзитобетонов от расхода исследованных добавок  
 Обозначения: masterpolyheed - суперпластификатор «MasterPolyHeed 3040»; muraplast - суперпластификатор «Muraplast FK49»; poliplast - суперпластификатор «Полипласт СП-1»; tvo – керамзитобетон прошел тепловлажностную обработку, по режиму принятому на заводе; no\_28 - керамзитобетон твердел в нормальных условиях 28 суток.

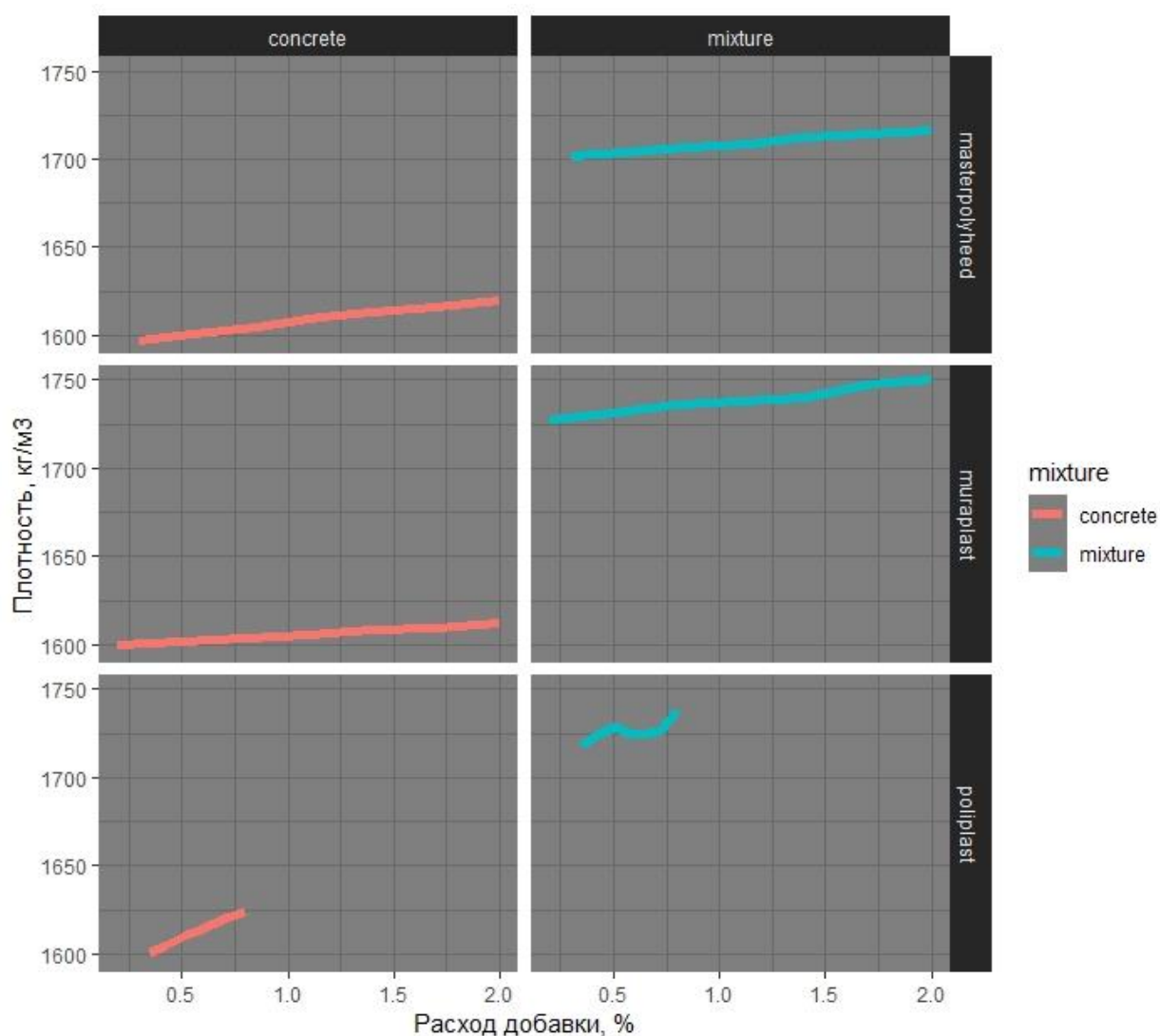


Рис. 3 – Зависимости плотности керамзитобетона и керамзитобетонной смеси от расходов исследованных добавок  
 Обозначения: *masterpolyheed* - суперпластификатор «MasterPolyHeed 3040»; *muraplast* - суперпластификатор «Muraplast FK49»; *polioplast* - суперпластификатор «Полипласт СП-1»; *concrete* – керамзитобетон в сухом состоянии; *mixture* – керамзитобетонная смесь.

Как видно из таблиц 1-3 и рисунков 2-3 увеличение расхода добавки приводит к повышению прочности керамзитобетонов, как подвергшихся тепловой обработке, так и твердеющих в нормальных условиях. Также очевидно, что твердение керамзитобетонов в нормальных условиях позволяет получать более высокие показатели по прочности на сжатие.

Однако необходимо отметить, что при максимальных расходах добавок наблюдается рост плотности. Поэтому для практического применения этих добавок в керамзитобетонах потребуется дополнительная корректировка их по плотности.

Кроме этого, необходимо отметить, что полученные значения для составов с добавками (как после ТВО, так и нормального твердения) показали более высокие значения по прочности по сравнению с контрольным составом.

### Обсуждение

Проведем сравнение полученных результатов с помощью «boxplot» диаграмм (диаграмма «ящик с усами») [24]. На рисунках 4–6 приведены результаты исследований, представленных в таблицах 1-3.

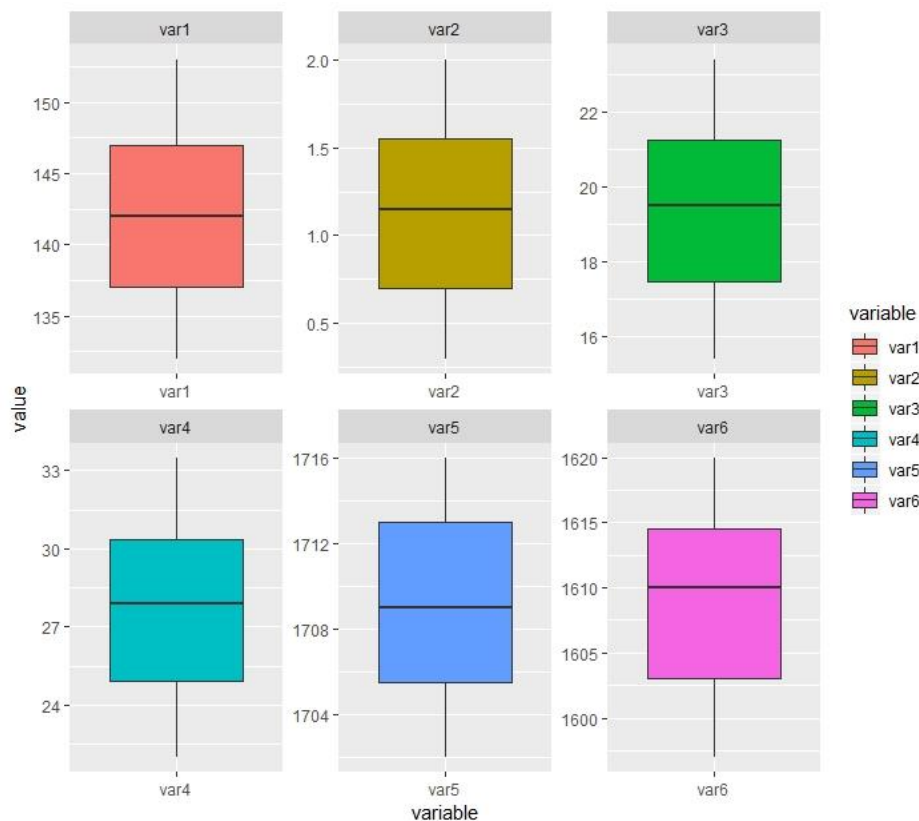


Рис. 4 – Визуализация результатов исследований с помощью диаграмм «boxplot» для суперпластификатора «MasterPolyHeed 3040»

Обозначения: var1 – расход воды, л; var2 – расход добавки, %; var3 – прочность бетона после ТВО, МПа; var4 – прочность бетона в возрасте 28 сут., МПа; var5 – плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>; var6 – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>

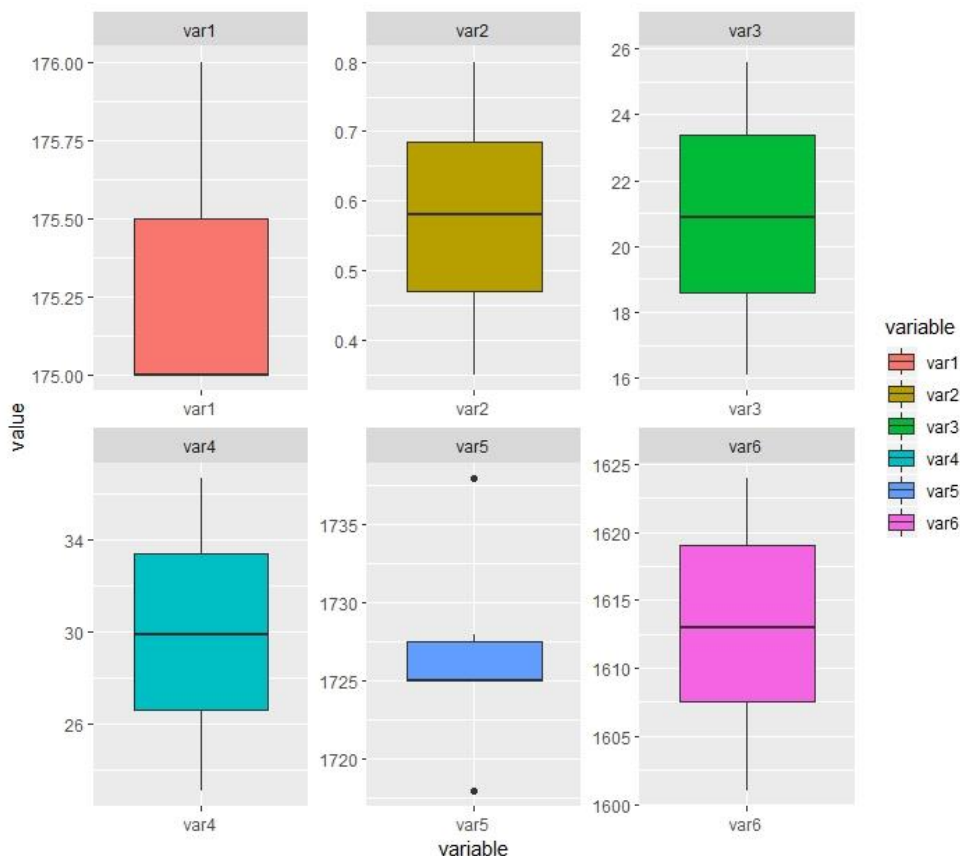


Рис. 5 – Визуализация результатов исследований с помощью диаграмм «boxplot» для суперпластификатора «Полипласт СП-1»

Обозначения: var1 – расход воды, л; var2 – расход добавки, %; var3 – прочность бетона после ТВО, МПа; var4 – прочность бетона в возрасте 28 сут., МПа; var5 – плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>; var6 – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>

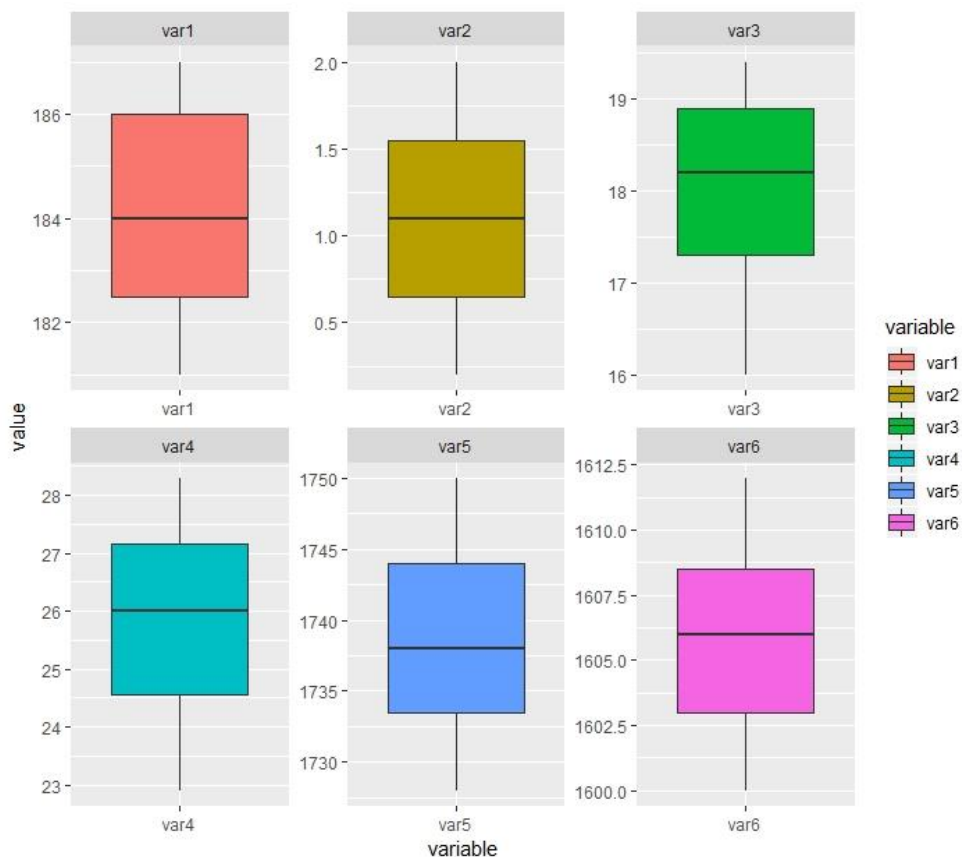


Рис. 6 – Визуализация результатов исследований с помощью диаграмм «boxplot» для суперпластификатора «Muraplast FK49»

Обозначения: *var1* – расход воды, л; *var2* – расход добавки, %; *var3* – прочность бетона после ТВО, МПа; *var4* – прочность бетона в возрасте 28 сут., МПа; *var5* – плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>; *var6* – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>

Для анализа описательных характеристик результатов исследований использованы диаграммы размахов – «boxplot». Для количественных переменных эта диаграмма представляет: максимальное и минимальное значение; медиану; нижний и верхний квартиль. Нижний квартиль – значение, которое 25% значений в выборке не превышают. Верхний квартиль – значение, которое 75% значений в выборке не превышает [24]. На примере расхода воды (см. рис. 4, *var1* – для добавки «MasterPolyHeed 3040») мы можем заключить следующее. Максимальное значение расхода воды составляет – 153 л. Минимальный расход воды составляет – 132 л. Медианное значение расхода воды – 142 л. Нижний квартиль – 137 л, верхний квартиль – 147 л.

Проведем анализ полученных результатов, применив корреляционно-регрессионный метод. Для этого воспользуемся языком статистических вычислений R и пакетом ggplot2 [25]. Анализировать полученные данные о зависимости и независимости переменных в числовом виде достаточно сложно. Поэтому сразу же представим их в виде корреляционной матрицы цветов (см. рисунок 7).

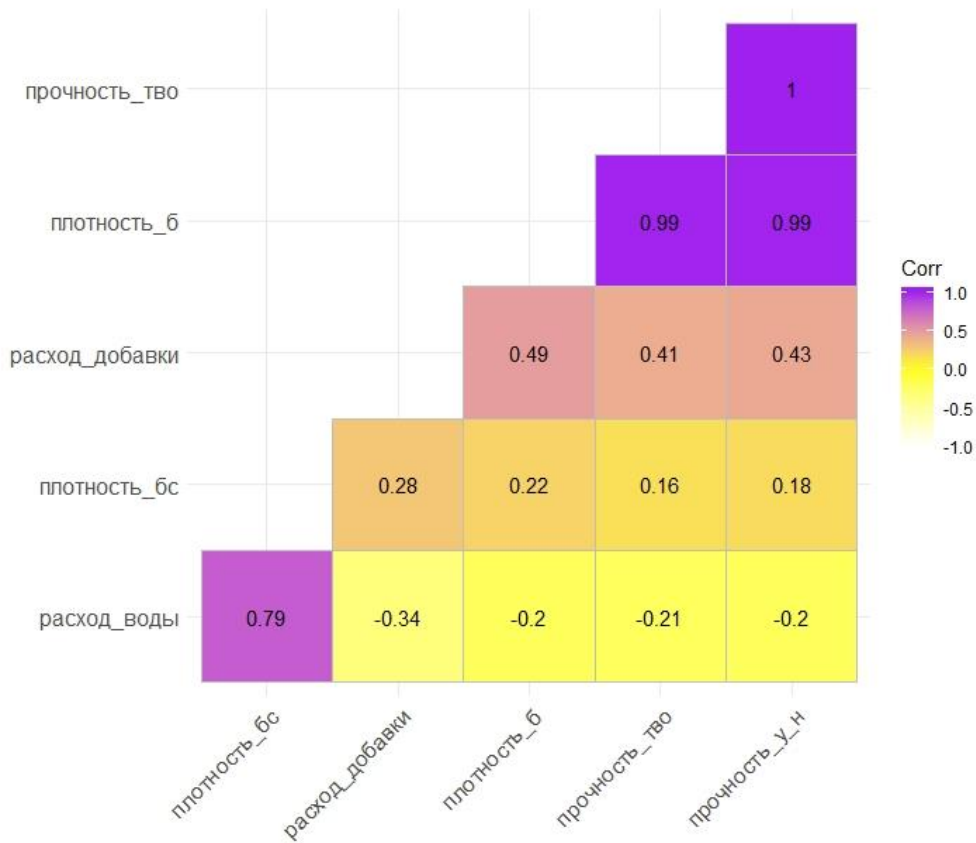


Рис. 7 – Корреляционная матрица между переменными для данных из таблиц 1-3  
 Примечание: Исходный порядок переменных изменен. Обозначения в тексте

Проанализируем корреляционную матрицу, представленную на рисунке 7. Благодаря использованию цветов видно, что ее элементы имеют как положительную, так и отрицательную связь. Очень сильная теснота связи имеет место между: прочностью бетона после ТВО (прочность\_тво) и прочностью бетона твердеющего в нормальных условиях (прочность\_у\_н); плотностью бетона (плотность\_б) и прочностью бетона после ТВО, а также плотностью бетона и прочностью бетона твердевшего в нормальных условиях. Сильная теснота связи отмечена между: расходом воды на 1 м<sup>3</sup> бетона (расход\_воды) и плотностью бетонной смеси (плотность\_бс). Умеренная теснота связи наблюдается между расходом добавки (расход\_добавки) и плотностью бетона. Слабая прямо пропорциональная зависимость имеет место между: расходом добавки и прочностью бетона после ТВО; расходом добавки и прочностью бетона, твердеющего в нормальных условиях, а также расходом добавки и плотностью бетонной смеси. Слабая обратно пропорциональная зависимость отмечена между расходом воды и расходом добавки. Теснота связи между остальными признаками является очень слабой, как прямо пропорциональной, так и обратно пропорциональной.

Определим количественную связь, между расходом добавки и прочностью керамзитобетона после тепловлажностной обработки используя регрессионный метод. Для установления степени зависимости между ними используется коэффициент корреляции. Если коэффициент корреляции по абсолютной величине близок к единице, то для построения зависимости используется линейная модель. Для других случаев используется более сложные нелинейные модели (например, экспоненциальные, полиномиальные и т.п.). Последовательным перебором вариантов регрессионных моделей было установлено, что наилучшие результаты показывает полиномиальная модель (см. рисунки 8 и 9).



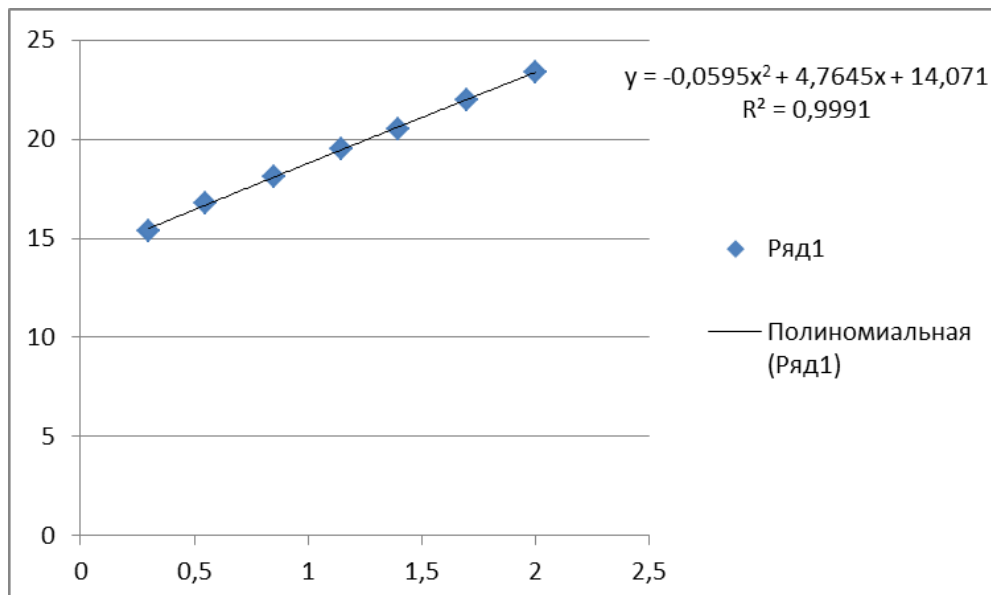


Рис. 8 – График регрессионных моделей зависимости прочности керамзитобетона от расхода добавки «MasterPolyHeed 3040» для бетона ускоренного твердения (тепловая обработка)

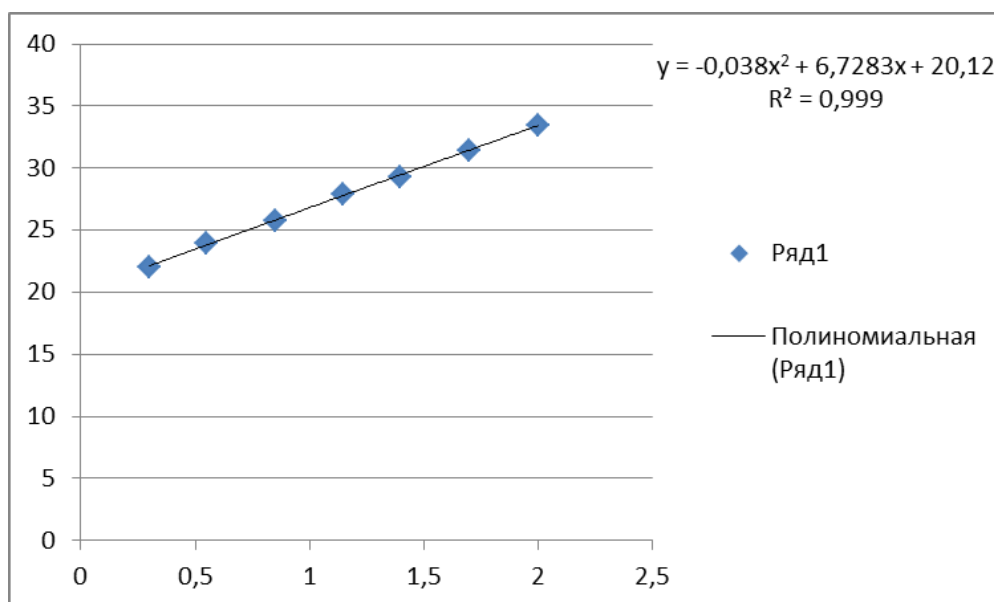


Рис. 9 – График регрессионных моделей зависимости прочности керамзитобетона от расхода добавки «MasterPolyHeed 3040» для бетона, твердеющего в нормальных условиях

Как видно из графиков величины достоверной аппроксимации  $R^2$  близки к 1. Это говорит о том, что линия тренда близка к фактическим данным. Причем для керамзитобетона, твердеющего в нормальных условиях,  $R^2$  имеет незначительно большее значение. Значимость критерия Фишера в обоих случаях гораздо меньше 0,05, что говорит о том, что обе модели могут считаться адекватными с вероятностью 0,95.

Проведем сравнение показателей прочности и плотности для составов с добавками и контрольным составом (без добавки). Как видно из таблицы 4 максимальный рост прочности керамзитобетонов как прошедших ТВО так и твердеющих в нормальных условиях показали составы на добавке «Полипласт СП-1». Минимальные результаты роста прочности при обоих вариантах твердения показали керамзитобетоны на добавке «MasterPolyHeed 3040». Однако в данном случае необходимо уточнить, что керамзитобетоны, полученные на добавке «MasterPolyHeed 3040» обладают наименьшими расходами воды.



Таблица 4 – Расчетные показатели керамзитобетон

| Показатели  | Расход добавки      |        |                |        |                 |        |
|---|---------------------|--------|----------------|--------|-----------------|--------|
|   | MasterPolyHeed 3040 |        | Полипласт СП-1 |        | Muraplast FK 49 |        |
|   | min                 | max    | min            | max    | min             | max    |
| Рост прочности керамзитобетона после ТВО                          | 1,149               | 1,746  | 1,201          | 1,910  | 1,194           | 1,448  |
| Рост прочности керамзитобетона, твердеющего в нормальных условиях | 1,146               | 1,745  | 1,203          | 1,911  | 1,193           | 1,474  |
| ККК керамзитобетона после ТВО                                     | 0,0096              | 0,0144 | 0,0100         | 0,0158 | 0,0100          | 0,0120 |
| ККК керамзитобетона, твердеющего в нормальных условиях            | 0,0138              | 0,0207 | 0,0144         | 0,0226 | 0,0143          | 0,0176 |

Закономерная связь между пределом прочности и величиной средней плотности используется для оценки эффективности материала в конструкциях и определяется вычислением условного коэффициента конструктивного качества (ККК) по формуле [6]:

$$KKK = \frac{R_{сж}}{\rho_0}, \quad (1)$$

где  $R_{сж}$  – предел прочности при сжатии, кг/см<sup>2</sup>;  $\rho_0$  – средняя плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Чем выше ККК, тем выше техническая эффективность материала, выше качество его в конструкциях. Максимальные значения ККК отмечены для керамзитобетон, полученных с использованием добавки «Полипласт СП-1» для обоих вариантов твердения. Минимальные значения получены для керамзитобетон с добавкой «MasterPolyHeed 3040». Для контрольной серии керамзитобетона (без добавок) показатели ККК составляют – 0,0084 (керамзитобетон прошедший ТВО) и 0,0121 (керамзитобетон, твердеющий в нормальных условиях) соответственной. Это однозначно доказывает, что использование добавок суперпластификаторов повышает техническую эффективность керамзитобетона. Однако необходимо отметить, что при проведении наших исследований не учитывалась группа цемента по эффективности при пропаривании [26].

### Заключение

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы. Применение добавок суперпластификаторов способствует увеличению прочности бетона, как после ТВО, так и при твердении в нормальных условиях. Однако рост прочности керамзитобетона сопровождается ростом плотности, что требует принятия соответствующих мер, т.к. к легким бетонам наряду с прочностью предъявляются требования к плотности.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов : учебное пособие для вузов / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1975. – 268 с.
2. Орендлихер Л.П. XXI век – век легких бетонов / Л.П. Орендлихер // Технологии бетонов. – 2010. – №1-2. – С. 18-21.
3. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны / Ю.М. Баженов. // Технологии бетонов. – 2012. – №3-4. – С. 39-43.
4. Комиссаренко Б.С. Перспективы развития производства керамзита и конструкций на его основе / Б.С. Комиссаренко, А.Г. Чикнорьян, Б.М. Горин, С.А. Токарева // Строительные материалы. – 2006. – №8. – С. 14-16.
5. Звездов А.И. Высокопрочные легкие бетоны в строительстве и архитектуре / А.И. Звездов, В.Р. Фаликман // Жилищное строительство. – 2008. – №7. – С. 2-6.
6. Лахтарина С.В. Легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.05 : защищена 14.07.16 : утв. 14.10.16 / Лахтарина Сергей Викторович. – Магеевка: ДонНАСА, 2016. – 163 с.
7. Vijayalakshmi R. Structural Concrete Using Expanded Clay Aggregate: A Review / R. Vijayalakshmi and S. Ramanagopal // Indian Journal of Science and Tehnology. 2018. Vol. 11(16). P. 1-12. DOI: 10.17485/ijst/2018/v11i16/121888.

8. Горин В.М. Применение керамзитобетона в строительстве путь к энерго- и ресурсоэффективности, безопасности зданий и сооружений / В.М. Горин // Строительные материалы. – 2010. – №8. – С. 8-10.
9. ГОСТ 27006-2019. Бетоны. Правила подбора состава [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200165762/> (дата обращения 08.07.2020).
10. Руководство по подбору составов конструкционных легких бетонов на пористых заполнителях – М.: Стройиздат, 1975. – 43 с.
11. Рекомендации по подбору составов легких бетонов (к ГОСТ 27006-86) – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
12. Бычков М.В. Особенности разработки легких самоуплотняющихся бетонов на пористых заполнителях / М.В. Бычков, С.А. Удодов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №3. [Электронный ресурс]: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1774/> (дата обращения 08.07.2020).
13. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/554403082/> (дата обращения 08.07.2020).
14. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/871001094/> (дата обращения 08.07.2020).
15. Masterpolyheed – суперпластифицирующие добавки на основе эфиров полиарила для железобетонных изделий и конструкций [Электронный ресурс]: <http://www.msk-emako.com/продукция/masterpolyheed/> (доступ свободный) (дата обращения 07.04.2020).
16. Суперпластификаторы Полипласт [электронный ресурс]: <http://www.polyplastug.ru/superplastifikator/> (доступ свободный) (дата обращения 07.04.2020).
17. Muraplast FK49. Суперпластификатор [электронный ресурс]: <http://www.mc-bauchemie.ru/produkty/dobavki-dlya-betonov-i-rastvorov/superplastifikatory/muraplast-fk-49.html> (доступ свободный) (дата обращения 07.04.2020).
18. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200115733/> (дата обращения 08.07.2020).
19. Протыко Н.С. Подбор составов керамзитобетонов плотной структуры, в том числе изготовленного из высокоподвижных бетонных смесей / Н.С. Протыко // Технологии бетонов. – 2014. – №12(101). – С. 23-29.
20. Дворкин Л.И. Использование метода «приведенного Ц/В» для проектирования составов конструкционных легких бетонов / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, О.М. Бордюженко // Технологии бетонов. – 2013. – №11(88). – С. 36-38.
21. Дружинин С.В. Влияние суперпластифицирующих добавок на прочность бетона / С.В. Дружинин, Д.А. Немыкина, Е.А. Краснова // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №2. [Электронный ресурс]: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/N2y2018/5006/> (дата обращения 08.07.2020).
22. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200164028/> (дата обращения 08.07.2020).
23. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200100908/> (дата обращения 08.07.2020).
24. Соколов П.Э. Естественная радиоактивность глинистых горных пород применяемых для производства строительных материалов / П.Э. Соколов, В.Ю. Дрик // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – №12(66). – Ч.5 – С. 148-151. DOI: 10.23670/IRJ.2017.66.141.
25. Соколов П.Э. Оценка влияния обжига на радиоактивность глинистых горных пород и материалов / П.Э. Соколов, С.А. Сентенберг // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №2. [Электронный ресурс]: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/N2y2018/4982/> (дата обращения 08.07.2020).
26. Афанасьева В.А. Эффективность цементов: факторы качества / В.А. Афанасьева // Технологии бетонов. – 2014. – №2. – С. 12-15.

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

1. Bazhenov Ju.M. Sposoby opredeleniya sostava betona razlichnyh vidov : uchebnoe posobie dlja vuzov [Methods for determining the composition of concrete of various types: textbook for universities] / Ju.M. Bazhenov. – М.: Strojizdat, 1975. – 268 p. [in Russian]
2. Orentliher L.P. XXI vek – vek legkih betonov [XXI century-the century of light concrete] / L.P. Orentliher // Tehnologii betonov [Concrete technologies]. – 2010. – №1-2. – P. 18-21. [in Russian]
3. Bazhenov Ju.M. Puti razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya: novye betony [Ways of development of building materials science: new concretes] / Ju.M. Bazhenov // Tehnologii betonov [Concrete technologies]. – 2012. – №3-4. – P. 39-43. [in Russian]
4. Komissarenko B.S. Perspektivy razvitiya proizvodstva keramzita i konstrukcij na ego osnove [Prospects for the production of expanded clay and structures based on it] / B.S. Komissarenko, A.G. Chiknovor'jan, B.M. Gorin, S.A. Tokareva // Stroitel'nye materialy [Building material]. – 2006. – №8. – P. 14-16. [in Russian]
5. Zvezdov A.I. Vysokoprochnye legkie betony v stroitel'stve i arhitekture [High-strength lightweight concrete in construction and architecture] / A.I. Zvezdov, V.R. Falikman // Zhilishhnoe stroitel'stvo [Housing construction]. – 2008. – №7. – P. 2-6. [in Russian]
6. Lahtarina S.V. Legkie vysokoprochnye betony s povyshennym koefitsientom konstruktivnogo kachestva [Lightweight high-strength concrete with an increased coefficient of structural quality] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.05 : defense of the thesis 14.07.16 : approved 14.10.16 / Lahtarina Sergej Viktorovich. – Makeevka: DonNASA, 2016. – 163 p. [in Russian]
7. Vijayalakshmi R. Structural Concrete Using Expanded Clay Aggregate: A Review / R. Vijayalakshmi and S. Ramanagopal // Indian Journal of Science and Tehnology. 2018. Vol. 11(16). P. 1-12. DOI: 10.17485/ijst/2018/v11i16/121888.
8. Gorin V.M. Primenenie keramzitobetona v stroitel'stve put' k jenergo- i resursojektivnosti, bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij [The use of expanded clay concrete in construction is the way to energy and resource efficiency, safety of buildings and structures] / V.M. Gorin // Stroitel'nye materialy [Building material]. – 2010. – №8. – P. 8-10. [in Russian]

9. GOST 27006-2019. Betony. Pravila podbora sostava [Concretes. Rules for selecting a team] [electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200165762/> (accessed 08.07.2020). [in Russian]
10. Rukovodstvo po podboru sostavov konstrukcionnyh legkih betonov na poristyh zapolniteljah [Guide to the selection of compositions of structural light concrete on porous aggregates] – M.: Strojizdat, 1975. – 43 p. [in Russian]
11. Rekomendacii po podboru sostavov legkih betonov (k GOST 27006-86) [Recommendations for the selection of light concrete compositions (to GOST 27006-86)] – M.: CITP Gosstroja SSSR, 1990. – 96 p. [in Russian]
12. Bychkov M.V. Osobennosti razrabotki legkih samouplotnjajushihjsja betonov na poristyh zapolniteljah [Features of development of light self-compacting concrete on porous aggregates] / M.V. Bychkov, S.A. Udodov // Inzhenernyj vestnik Dona [Don's engineering Bulletin]. – 2013. – №3. [electronic resource]: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1774/> (accessed 08.07.2020). [in Russian]
13. SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija [Concrete and reinforced concrete structures. Fundamentals] [electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/554403082/> (accessed 08.07.2020). [in Russian]
14. GOST 10178-85. Portlandcement i shlakoportlandcement. Tehnicheskie uslovija [Portland cement and slag Portland cement. Technical conditions] [electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/871001094/> (accessed 08.07.2020). [in Russian]
15. Masterpolyheed – superplastificirujushhie dobavki na osnove jefirov poliarila dlja zhelezobetonnyh izdelij i konstrukcij [Masterpolyheed-superplasticizing additives based on polyaryl esters for reinforced concrete products and structures] [electronic resource] : <http://www.msk-emako.com/продукция/masterpolyheed/> (free access) (accessed 07.04.2020). [in Russian]
16. Superplastifikatory Poliplast [Superplasticizers Polyplast] [electronic resource] : <http://www.polyplastug.ru/superplastifikator/> (free access) (accessed 07.04.2020). [in Russian]
17. Muraplast FK49. Superplastifikator [Muraplast FK 49. Superplasticizer] [electronic resource] : <http://www.mc-bauchemie.ru/produkty/dobavki-dlya-betonov-i-rastvorov/superplastifikatory/muraplast-fk-49.html> (free access) (accessed 07.04.2020). [in Russian]
18. GOST 10181-2014. Smesi betonnye. Metody ispytaniy [Concrete mixes. Test method] [electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200115733/> (accessed 08.07.2020). [in Russian]
19. Prot'ko N.S. Podbor sostavov keramzitobetonov plotnoj struktury, v tom chisle izgotovlennogo iz vysokopodviznyh betonnyh smesey [Selection of compositions of expanded clay concrete of dense structure, including those made of highly mobile concrete mixes] / N.S. Prot'ko // Tehnologii betonov [Concrete technologies]. – 2014. – №12(101). – P. 23-29. [in Russian]
20. Dvorkin L.I. Ispol'zovanie metody «privedennogo C/V» dlja proektirovaniya sostavov konstrukcionnyh legkih betonov [Using the "reduced C/V" method for designing lightweight concrete structures] / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, O.M. Bordjuzhenko // Tehnologii betonov [Concrete technologies]. – 2013. – №11(88). – P. 36-38. [in Russian]
22. GOST 18105-2018. Betony. Pravila kontrolja i ocenki prochnosti [Concretes. Rules for strength control and evaluation] [electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200164028/> (accessed 08.07.2020). [in Russian]
23. GOST 10180-2012. Betony. Metody opredelenija prochnosti po kontrol'nym obrazcam [Concretes. Methods for determining the strength of control samples] [electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200100908/> (accessed 08.07.2020) [in Russian].
24. Sokolov P.Je. Estestvennaja radioaktivnost' glinistyh gornyh porod primenjaemyh dlja proizvodstva stroitel'nyh materialov [Natural radioactivity of clay rocks used for the production of building materials] / P.Je. Sokolov, V.Ju. Drik // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International research journal]. – 2017. – №12(66). – P.5 – P. 148-151. DOI: 10.23670/IRJ. 2017. 66. 141. [in Russian]
25. Sokolov P.Je. Ocenka vlijanija obzhiga na radioaktivnost' glinistyh gornyh porod i materialov [Assessment of the impact of roasting on the radioactivity of clay rocks and materials] / P.Je. Sokolov, S.A. Sentenberg // Inzhenernyj vestnik Dona [Don's engineering Bulletin]. – 2018. – №2. [electronic resource]: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4982/> (accessed 08.07.2020). [in Russian]
26. Afanas'eva V.A. Jefferektivnost' cementov: faktory kachestva [The effectiveness of the cements: quality factors] / V.A. Afanas'eva // Tehnologii betonov [Concrete technologies]. – 2014. – №2. – P. 12-15. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.019>**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ХЛЕБОПЕКАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Научная статья

**Федотов В. А. \***<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3692-9722,

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

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

**Аннотация**

В статье приведена классификация существующих на сегодняшний день методов исследования и оптимизации технологии хлебобулочного производства. Традиционно оптимизация хлебопекарного производства учитывает критерии времени окончания замеса полуфабрикатов, готовности заквасок и опар (по падению скорости газообразования), готовности теста к разделке. Проведенные исследования позволили оптимизировать оценку и прогнозирование качества полуфабрикатов и готовых изделий за счет расширения методов исследования производства. Качество хлебобулочных изделий может быть прогнозируемо на основе физико-химических свойств пшеницы (твердозерность зерна) и технологических параметров производства (влажность опары). Получены уравнения формирования показателей качества хлеба, управление качеством хлебопекарной продукции возможно за счет выбора влажности опары при опарном способе тестоприготовления, учитывая сведения о твердозерности зерна, служившего сырьем для помола муки.

**Ключевые слова:** пшеница, зерно, хлебопекарные свойства, качество зерна, сорта пшеницы.

**MODERN RESEARCH AND OPTIMISATION METHODS OF BREAD MAKING**

Research article

**Fedotov V. A. \***

ORCID: 0000-0002-3692-9722,

Orenburg State University, Orenburg, Russia

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

**Abstract**

The article suggests the classification of modern research and optimisation methods of bread-making technology. Traditionally, optimisation of bread making takes into account the following criteria: end time of semi-products blending, the readiness of fermentation starters and pre-ferments (based on the decrease in gas production rates), the dough readiness for handling. The research conducted enabled optimising the evaluation and predicting the quality of semi-products and the end products through expanding the list of bread-making research methods. The quality of bakery products might be predicted through the physical and chemical profile of the wheat (the grain hardness) and the technological parameters of the bread making (pre-ferment humidity). Equations of bread quality attributes formation are obtained, quality control of the baking products is possible through changing the pre-ferment humidity when using doughing with pre-ferment while taking into account the hardness of the grains, used for flour milling.

**Keywords:** wheat, grain, baking capacity, grain quality, wheat varieties.

**Введение**

Технология производства хлебобулочных изделий представляет собой разрозненные процессы с большим количеством параметров. Жизнедеятельность дрожжей объединяет эти процессы в систему, которая при своем функционировании приводит к формированию потребительских свойств выпекаемых изделий. Хлебопечение по своей природе является биотехнологическим производством, ее изучение должно основываться прежде всего на исследовании жизнедеятельности дрожжей. Осуществлять это производство следует через управление процессом брожения заквасок, опар и теста [1].

Современная технология хлебопечения не имеет своих специальных методов исследования. Вместо них применяются методы определения готовности полуфабрикатов по кислотности, подъемной силе (по всплывающему шару) и органолептическим показателям. Но это не специальные методы исследования, а лишь методики, т. е. технические операции по определению указанных параметров. Они не обеспечивают получения достоверной информации (о природе и специфике производства хлебобулочных изделий, его динамике и эффективности), которую можно использовать для оптимального управления процессом с целью выработки продукции наилучшего качества [2].

**Методы и принципы исследования**

Для изучения специфики производства хлебобулочных изделий необходим ряд специальных методов исследования. Первым среди них должен быть метод исследования брожения полуфабрикатов. [3] Из всех проявлений жизнедеятельности дрожжей доминирующим является спиртовое брожение. В этом процессе между сброженной глюкозой и образующимися этанолом и диоксидом углерода существуют строгие количественные отношения, располагая данными о количестве одного из этих веществ, можно достаточно точно вычислить количества других в любой момент брожения.

Оптимизация производства хлебобулочных изделий складывается из оптимизации его ключевых операций: замес заквасок, опар и теста, брожение полуфабрикатов, разделка теста, расстойка и термическая обработка тестовых заготовок. Все операции к определенному моменту своего развития достигают максимального положительного эффекта или оптимума. Для его определения необходим объективный критерий, по которому можно было бы точно установить момент окончания данной операции [4], [5].

Ведение опытных и контрольных вариантов исследований до изготовления изделий наилучшего качества является обязательным, но не единственным требованием, обеспечивающим получение достоверных данных об эффективности функционирования производства. Получение результатов может быть достигнуто только тогда, когда эти варианты будут отличаться лишь по одному составляющему производства и оставаться неизменными по остальным. Так, при изучении влияния изменения влажности теста на процесс приготовления хлеба исследуемые варианты должны отличаться только по влажности теста, но не по используемому сырью, способу и режиму приготовления теста, его разделки и выпечки. Обязательное выполнение этого требования обуславливается тем, что при одновременном изменении нескольких составляющих производства, например не только влажности теста, но и способов его приготовления или выпечки, определяется суммарный эффект их воздействия на процесс приготовления хлеба, а какова эффективность функционирования каждого из них в отдельности - остается неизвестным.

### Основные результаты и их обсуждение

Интенсивность, динамика и общая направленность изменений скорости газообразования полуфабрикатов изучались в их взаимосвязи с физиологическим состоянием (адаптированностью или неадаптированностью к мучной среде) и размножением дрожжей, образованием и сбраживанием сахаров субстратов, стабильностью консистенции, эластичности и растяжимости теста и др. Это позволило установить закономерные связи и отношения между процессами и дало возможность судить о ходе их развития по динамике скорости газообразования.

По результатам многочисленных экспериментальных данных был построен график динамики скорости газообразования полуфабрикатов - опары, теста (рисунок 1). Скорость газообразования, как видно из графика, в любой момент брожения данного полуфабриката соответствует определенной абсолютной величине. Динамика скорости газообразования, т. е. ход ее развития под воздействием внутренних и внешних факторов, у разных полуфабрикатов неодинакова. Так, скорость газообразования пшеничной опары нарастает до максимума с двумя перепадами (1 ч 15 мин - 1 ч 45 мин и 2 ч 45 мин - 3 ч 15 мин), что определяется их неадаптированностью к мучной среде, а в случае ржаной закваски - без перепадов, поскольку она готовится на заквасочных дрожжах, адаптированных к этой среде [6], [7].

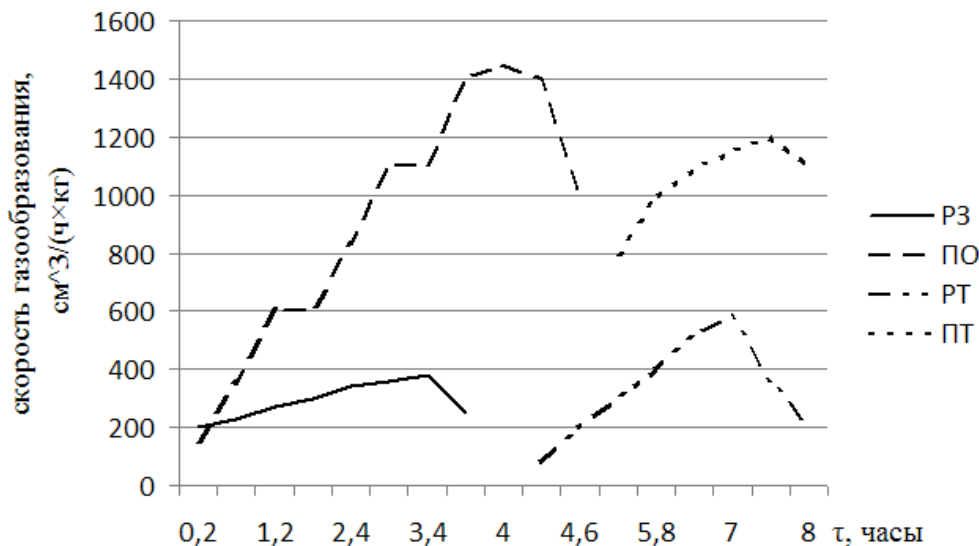


Рис. 1 – Динамика скорости газообразования полуфабрикатов: ПО - густая пшеничная опара; ПТ – пшеничное тесто на опаре; РЗ - густая ржаная закваска; РТ - ржаное тесто на закваске

Теория производства хлебобулочных изделий формулирует критерии для достижения максимального эффекта:

- окончания замеса полуфабрикатов - образование их однородной массы, потому что только в этом случае возникают оптимальные условия для протекания микробиологических, биохимических, коллоидных и других процессов, которые определяют формирование потребительских свойств у выпекаемых изделий;

- готовности заквасок и опар - падение скорости их газообразования после достижения ею максимума, как показано на рисунке 1, поскольку к этому моменту в заквасках образуется предельно возможное количество дрожжевых клеток, а в опарах заканчивается адаптация прессованных дрожжей к сбраживанию сахаров мучной среды;

- готовности теста к разделке - время начала разделки  $G$ , определяемое вычитанием суммарной длительности операций разделки  $F$  (деление, округление, предварительная расстойка, формование) и окончательной расстойки  $R$  из продолжительности брожения теста с момента замеса до максимума скорости газообразования  $M$  по формуле:

$$G = M - (F + R) \quad (1)$$

так как к этому времени создаются условия для формования заготовок, обеспечивающие выработку изделий наилучшего качества, которое возможно при приготовлении данного теста до  $96 \pm 3^\circ \text{C}$ , поскольку лишь при такой температуре они превращаются в хлебобулочные изделия. [7]

Методы исследования производства хлебобулочных изделий могут быть расширены и дополнены результатами проведенных исследований, которые позволили оптимизировать оценку и прогнозирование качества. Используемая в исследованиях мука производилась из зерна, характеризуемого широким диапазоном твердозерности (от 10 до 28 кг/мм²). Из муки готовили пробную выпечку – производили хлеб белый опарным способом из пшеничной муки первого

сорта. Готовили образцы опар, влажность которых варьировали от 41 % до 72 % с шагом 1 %, чтобы охватить весь возможный диапазон влажности используемых в производстве опар. Основываясь на качестве производимых образцов хлеба устанавливали оптимальную влажность опары. [8]

Получены уравнения зависимостей показателей качества хлеба от структурно-механических свойств исходного сырья и технологических параметров тестоприготовления – влажности выбранной опары:  $H/D$  - формоустойчивость;  $Est$  - общая балловая оценка, балл;  $B$  - весовой выход хлеба, %;  $V$  - объемный выход,  $cm^3 / 100$  г муки;  $X_1$  - твердозерность зерна, служившего сырьем,  $kg/mm^2$ ;  $X_2$  - влажность опары, %. [9] Получены следующие уравнения регрессии показателей качества хлеба

$$V = 79,518 \cdot X_1 - 15,313 \cdot X_2 - 3,489 \cdot X_1^2 + 0,0015 \cdot X_2^2 + 0,852 \cdot X_1 \cdot X_2 + 224,099 \quad (2)$$

$$Est = 14,124 \cdot X_1 - 2,657 \cdot X_2 - 0,620 \cdot X_1^2 + 0,157 \cdot X_1 \cdot X_2 + 23,185 \quad (3)$$

$$B = 0,251 \cdot X_1 + 0,107 \cdot X_2 + 128,713 \quad (4)$$

Мука из низкотвердозерного зерна (при твердозерности до  $14 kg/mm^2$ ) позволяет произвести хлеб со максимально возможным объемным выходом при минимальной влажности опары 40 %, с повышением твердозерности для получения максимальных значений объемного выхода хлеба необходимо выбирать опару с влажностью 50-55 %. Однако, максимально возможный весовой выход хлеба из муки исходного зерна твердозерности до  $14 kg/mm^2$  достигается использованием более влажной опары (вплоть до 70 %). [10]

### Заключение

1. Для изучения специфики производства хлебобулочных изделий необходим ряд специальных методов. Для оптимизации производства хлебобулочных изделий необходимо, но не достаточно учитывать критерии: времени окончания замеса полуфабрикатов (опары, закваски, теста), готовности заквасок и опар, готовности теста к разделке.

2. Судя по результатам исследований, показатели качества хлебобулочных изделий могут быть прогнозируемы на основе физико-химических свойств пшеницы (твердозерность зерна) и технологических параметров производства (влажность опары).

3. Полученные в результате исследований уравнения регрессии формирования показателей качества хлеба характеризуются высокой степенью достоверности. В частности, формоустойчивость хлеба формируется под действием показателя твердозерности исходного зернового сырья и выбранной влажности опары, прогнозирование общей балловой оценки хлеба возможно на основе тех же сведений о твердозерности зерна и влажности опары, от них же значимо зависит весовой выход хлеба. Таким образом, управление качеством хлебопекарной продукции возможно за счет выбора опары при опарном способе тестоприготовления, учитывая сведения о твердозерности зерна, служившего сырьем для помола муки.

### Конфликт интересов

Не указан

### Conflict of Interest

None declared

### Список литературы / References

1. Федотов, В. А. Факторы формирования потребительских свойств зерномучных товаров / В. А. Федотов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 186-190.
2. Беркутова, Н. С. Микроструктура пшеницы / Н. С. Беркутова, И. А. Швецова. - М.: Колос, 1977. - 122 с.
3. Петров, Ю.А. Комплексная автоматизация управления предприятием: Информационные технологии - теория и практика / Ю.А. Петров, Е.Л. Шлимович, Ю.В. Ирюпин. - М.: Финансы и статистика, 2001. - 160 с.
4. Parker, J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. – Wiley / J. R. Parker. - 2 edition, 2010. - 504 p.
5. Rosicka-Kaczmarek J. Composition and thermodynamic properties of starches from facultative wheat varieties / Rosicka-Kaczmarek, J., Makowski, B., Nebesny, E., Tkaczyk, M., Komisarczyk, A., Nita, Z., (2016) Food Hydrocolloids, 54, pp. 66-76.
6. Магомедов, М.Д. Экономика пищевой промышленности / М.Д. Магомедов, А.В. Заздравных, Г.А. Афанасьева. – М.: Дашков и К, 2011. – 232 с.
7. Тарасенко, Ф. П. Прикладной системный анализ (наука и искусство решения проблем): Учебник / Ф. П. Тарасенко. - Томск; Издательство Томского университета, 2004. – 128 с.
8. Медведев, П. В. Комплексная оценка потребительских свойств зерна и продуктов его переработки / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 7-1 (38). - С. 77-80.
9. Шепелев, А. Ф. Товароведение и экспертиза электротоваров: учебное пособие для вузов / А. Ф. Шепелев, И. А. Печенежская. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. - 192 с.
10. Медведев, П.В. Управление качеством продуктов переработки зерна и зерномучных товаров / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. - 2016. - № 1. - С. 61 – 69.

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

1. Fedotov, V. A. Faktory` formirovaniia potrebitel'skikh svoi`stv zernomuchny`kh tovarov [Factors of formation of consumer properties of grain products] / V. A. Fedotov // Vestneyk Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg state University]. – 2011. – № 4. – pp. 186-190. [in Russian]
2. Berkutova, N. S. Mikrostruktura pshenitsy [Microstructure of wheat] / N. S. Berkutova, I. A. Shvetcova. - M.: Kolos, 1977. - 122 p. [in Russian]
3. Petrov, Iu.A. Kompleksnaia avtomatizatsiia upravleniia predpriatiem: Informatcionny`e tekhnologii - teoriia i praktika [Complex automation of enterprise management: Information technologies-theory and practice] / Iu.A. Petrov, E.L. Shlimovich, Iu.V. Iriupin. - M.: Finansy` i statistika [Finance and statistics], 2001. - 160 p. [in Russian]
4. Parker, J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. – Wiley / J. R. Parker. - 2 edition, 2010. - 504 p.
5. Rosicka-Kaczmarek J. Composition and thermodynamic properties of starches from facultative wheat varieties / Rosicka-Kaczmarek, J., Makowski, B., Nebesny, E., Tkaczyk, M., Komisarczyk, A., Nita, Z., (2016) Food Hydrocolloids, 54, pp. 66-76.
6. Magomedov, M.D. E`konomika pishchevoi` promy`shlennosti [Economics of the food industry] / M.D. Magomedov, A.V. Zazdravny`kh, G.A. Afanas`eva. – M.: Dashkov i K, 2011. – 232 p. [in Russian]
7. Tarasenko, F. P. Prikladnoi` sistemny`i` analiz (nauka i iskusstvo resheniia problem): Uchebnik [Applied system analysis (science and art of problem solving): Textbook] / F. P. Tarasenko. - Tomsk; Tomsk University Press, 2004. – 128 p. [in Russian]
8. Medvedev, P. V. Kompleksnaia ocenka potrebitel'skikh svoi`stv zerna i produktov ego pererabotki [Complex assessment of consumer properties of grain and products of its processing] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Mezhdunarodny`i` nauchno-issledovatel'skii` zhurnal [International research journal]. - 2015. - № 7-1 (38). - pp. 77-80. [in Russian]
9. Shepelev, A. F. Tovarovedenie i e`kspertiza e`lektrotovarov: uchebnoe posobie dlia vuzov [Commodity science and expertise of electrical goods: textbook for universities] / A. F. Shepelev, I. A. Pechenezhskaia. - Rostov-na-Donu: Feniks, 2002. - 192 p. [in Russian]
10. Medvedev, P.V. Upravlenie kachestvom produktov pererabotki zerna i zernomuchny`kh tovarov [Quality Management of grain processing products and grain products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Nauchny`i` zhurnal NIU ITMO. Seriya: ProtCESSy` i apparaty` pishchevy`kh proizvodstv [Scientific journal of the ITMO research INSTITUTE. Series: Processes and devices of food production]. - 2016. - № 1. - pp. 61 – 69. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.020>**ОРГАНИЗАЦИЯ ФОРМАЛЬНО – КОГНИТИВНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ**

Научная статья

**Пьявченко А.О.<sup>1</sup>, Черный С.А.<sup>2</sup>, Шестаков А.В.<sup>3,\*</sup>, Свирепю Е.А.<sup>4</sup>**<sup>1, 2, 3</sup> Южный федеральный университет<sup>4</sup> ООО «ПК РУС»

\* Корреспондирующий автор (trtualval[at]rambler.ru)

**Аннотация**

Статья посвящена проблемам использования формальных методов и оценок в рамках процессов когнитивного моделирования. Рассматривается специальная модель, обозначаемая, как формальная когнитивная нейросеть (ФКНС). Для описания модели используется сочетание трех инструментов: аппарата теории графов; когнитивного моделирования; нейросетевого моделирования. Собственно модель ФКНС представляется в виде совокупности следующих описаний: топологической структуры ФКНС; модели основного обрабатывающего элемента структуры, определяемого, как формальный нейроконцепт (фнк); модели линий коммутации, обеспечивающих информационное взаимодействие фнк и определяемой как связи влияния (св). В статье рассмотрены различные типы задач анализа, проводимые на основе ФКНС.

**Ключевые слова:** когнитивное моделирование, концепт, расплывчатые методы, синаптические связи, фазификация/ дефазификация.

**ORGANISATION OF FORMALLY COGNITIVE NEURAL NETS  
TO RESEARCH UNDERFORMALISED SYSTEMS**

Research article

**Piavchenko A. O.<sup>1</sup>, Chernyi S. A.<sup>2</sup>, Shestakov A. V.<sup>3,\*</sup>, Svirepo E. A.<sup>4</sup>**<sup>1, 2, 3</sup> Southern Federal University<sup>4</sup> ООО "PC RUS"

\* Corresponding author (trtualval[at]rambler.ru)

**Abstract**

The article looks into the problems of using formal methods and evaluations in the process of cognitive modelling. A particular model named as the Formal Cognitive Neural Net (FCNN) is considered. A combination of the three tools is used to describe the model: theory of graphs means, cognitive modelling; neural nets modelling. The FCNN model itself comes as the combination of the following descriptions: FCNN topological structure; the model of the main processing element of the structure named as the Formal Neural Concept (FNC); the models of switching lines providing for the information links of FNC and named as the Impact Links (IL). The article looks into various types of analysis tasks based upon FCNN.

**Keywords:** cognitive modelling, concept, vague techniques, synaptic links, fuzzification/defuzzification.

**Введение**

Когнитивные структуры получили достаточно широкое распространение, как эффективный инструмент моделирования, в области исследования слабоформализуемых задач [1], [2]. Основой для организации когнитивного анализа исследуемых систем, объектов, процессов (в дальнейшем обозначаемых, как ИС) являются экспертные оценочные суждения специалистов, поэтому наиболее естественным представлением этих оценок являются нечеткие – расплывчатые представления. Тем не менее, во многих случаях имеется возможность, по крайней мере, частичной формальной (четкой) оценки некоторых факторов ИС, функциональные аналоги которых используются в качестве концептов в когнитивных моделях.

Использование формальных параметров в когнитивных системах предусматривается по двум направлениям: во-первых, для формирования значений концептов в процессе моделирования, во-вторых, для оценки необходимости корректировки моделей. Т.о., предлагается определенная модификация традиционных когнитивных процедур, направленная на сочетание когнитивных (нечетких) и формальных (четких) оценок при формировании значения состояния концепта. Подобная модифицированная модель будет именоваться, как формально – когнитивная нейросеть (ФКНС).

Как указывалось выше, когнитивный подход используется в случае сложности или невозможности применения непосредственных измерений параметров ИС, или формальных расчетных методик, описывающих поведение ИС. Вместе с тем, в отдельных случаях имеется возможность оценки некоторых факторов модели как когнитивными, так и формальными методами. Так, например, при организации исследований модели электростанции [3] когнитивными методами, в состав модели может быть включен концепт «Себестоимость электроэнергии» как когнитивный фактор, зависимый через причинно – следственные связи от таких концептов, как «Уровень квалификации персонала», «Объемы отпускаемой электроэнергии», «Состояние оборудования» и т.п. Кроме того, данный фактор может быть определен в процессе реальной деятельности предприятия в соответствии общепринятыми нормативами и методиками и отражен в документах бухгалтерской отчетности.

**Функционирование формально–когнитивных нейросетевых моделей**

Предлагаемые подходы к построению обсуждаемых в настоящей статье моделей связаны с определенной общностью базовых представлений и основных конструктивных элементов, используемых для формирования указанных моделей: графовых, когнитивных и нейросетевых. Данная общность обуславливается следующими



соответствиями [4]: а) вершина графовой модели – концепт когнитивной модели – нейрон (нейроэлемент) нейросетевой модели; б) дуга графовой модели – причинно – следственная связь когнитивной модели – синаптическая связь нейросетевой модели. В рассматриваемой модели ФКНС базовыми конструктивными элементами являются: а) формальный нейроконцепт (фнк); б) связь влияния (вс). Таким образом, топология формально – когнитивной сети описывается подобно графовой системе следующим образом:

$$T_{\text{ФКН}} = \{\{\text{ФНК}, \text{ВС}\}\} \quad (1)$$

Здесь  $\text{ФНК} = \{\text{фнк}_{\text{II}}\}_{\text{II}=1 \dots \text{N1}}$  – множество формальных нейроконцептов ( $\text{N1}$  – мощность множества ФНК). Каждый из фнк в рамках общей модели рассматривается, как элементарный процессор обработки информации для исполнения сетевых формально–концептуальных вычислений.  $\text{ВС} = \{\text{вс}_{\text{I2}}\}_{\text{I2}=1 \dots \text{N2}}$  – множество связей влияния ( $\text{N2}$  – мощность множества связей влияния), топологически соответствующих дугам графовой модели и по смысловой нагрузке аналогичны причинно – следственным связям когнитивных моделей. Учитывая топологические особенности графовых моделей можно указать, что каждая подобная связь фактически представляет собой пару, содержащую указание на а) формальный нейроконцепт, для которого описываемая связь является входом (первый элемент пары); б) формальный нейроконцепт, из которого связь исходит (второй элемент пары):  $\text{I2} = \langle \text{I1}, \text{I3} \rangle$ , т.о., вместо индекса  $\text{I2}$  может быть указана соответствующая пара индексов.

Рассматривая формальный нейроконцепт, как элементарный процессор – обработчик в рамках ФКНС, алгоритм его функционирования определим в виде нижеприводимой последовательности шагов, иллюстрируемой рисунком 1.

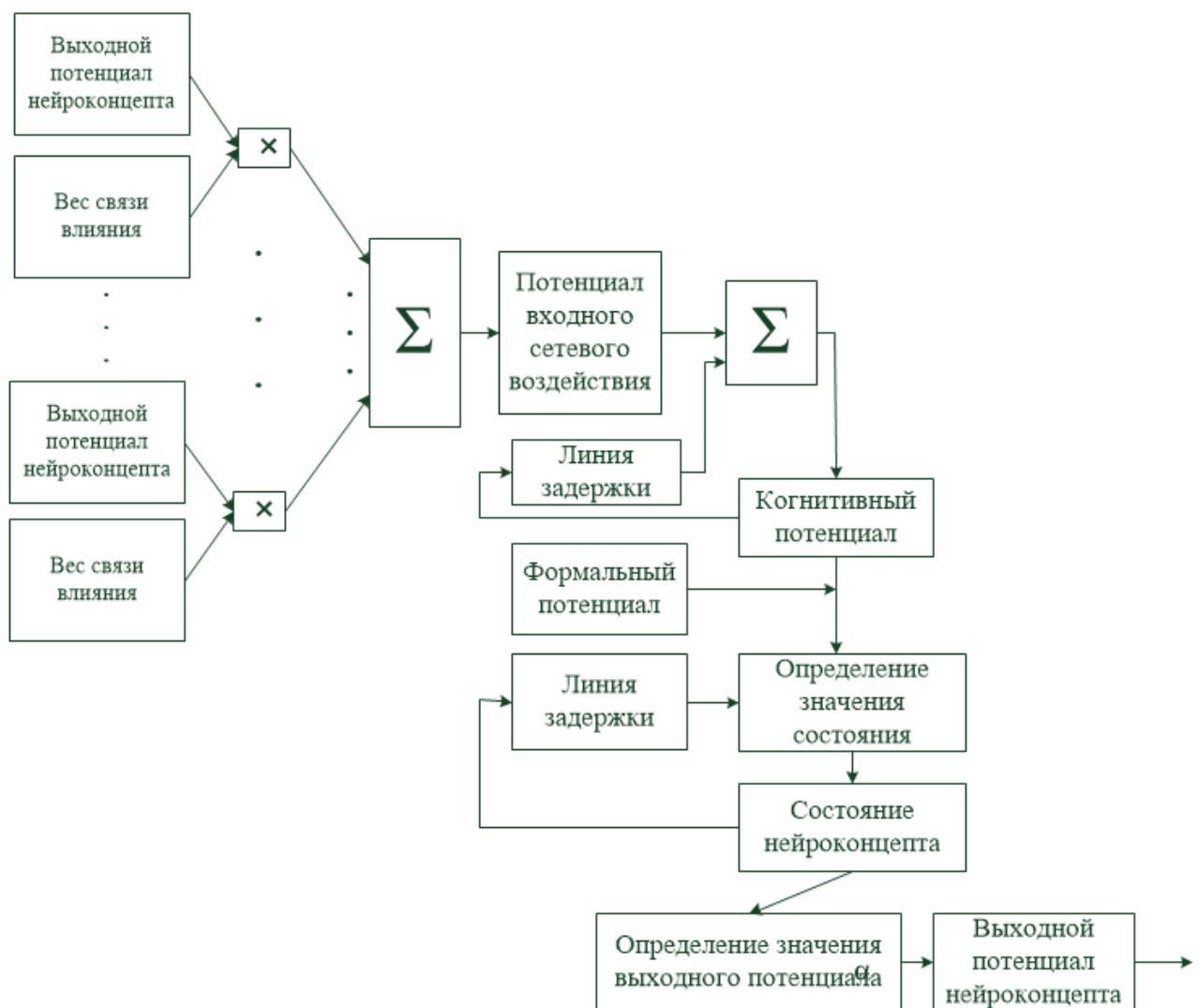


Рис. 1 – Алгоритм функционирования формального нейроконцепта.

ШАГ 1: Определение значения элементарного воздействия от сети (эвс):

$$\text{эвс}_{\text{II}, \text{I3}}(t_k) = \text{вс}_{\text{II}, \text{I3}} * \text{п\_вых}_{\text{I3}}(t_k).$$

Здесь:  $\text{эвс}_{\text{II}, \text{I3}}$  – элементарное воздействие на формальный нейроконцепт с индексом  $\text{II}$  от формального нейроконцепта с индексом  $\text{I3}$ ;

–  $\text{вс}_{\text{II}, \text{I3}}$  – вес связи влияния;

–  $\text{п\_вых}_{\text{I3}}$  – выходной потенциал (потенциал воздействия на сеть) формального нейроконцепта с индексом  $\text{I3}$ .

ШАГ 2. Определение значения потенциала общего входного сетевого воздействия на формальный нейроконцепт ( $\text{п\_вх}$ ):

$$\text{п\_вх}_{\text{II}} = \sum_{\text{I3}=1 \dots \text{N3}} \text{эвс}_{\text{II}, \text{I3}}(t_k).$$

ШАГ 3\*. Определение потенциала когнитивного воздействия ( $p_{\text{кв}}$ ). Указанный потенциал формируется как совокупность двух частей, включающих а) значение потенциала на предыдущем шаге моделирования и б) потенциала входного воздействия на текущем шаге. При этом, в определенном смысле, общее элементарное воздействие можно рассматривать как приращение (положительное или отрицательное) на текущем шаге моделирования:

$$p_{\text{квII}}(t_k) = p_{\text{квII}}(t_{k-1}) + \text{эвсII}(t_k).$$

ШАГ 3\*\*. Определение формального потенциала ( $p_{\text{ф}}$ ). Как уже отмечалось, данные процедуры определения формального нейроконцепта являются индивидуальными и определяются спецификой предметной области. Для технических систем подобный параметр может формироваться на основе показаний датчиков/измерительных систем. Для организационных – на основе документальных данных или показателей расчетных методик. Так, в упоминавшемся выше примере, фактор «Себестоимость» отражается в соответствующей документации по финансово – экономической деятельности электростанции и имеет четкое выражение.

ШАГ 4. Определение полного потенциала воздействия на формальный нейроконцепт ( $p_{\text{о}}$ ):

$$p_{\text{оII}}(t_k) = f_{\text{пв}}(p_{\text{квII}}(t_k), p_{\text{кфII}}(t_k)),$$

где:  $f_{\text{пв}}$  – функция формирования потенциала воздействия. В зависимости от особенностей моделируемой ИС предлагается использования нескольких вариантов представления функции  $f_{\text{п}}$ :

$$1) \text{ Выбор максимума: } p_{\text{оII}} = \text{MAX}(p_{\text{квII}}(t_k), p_{\text{кфII}}(t_k)).$$

$$2) \text{ Медианный выбор: } p_{\text{оII}} = ((p_{\text{квII}}(t_k) + p_{\text{кфII}}(t_k))/2).$$

$$3) \text{ Весовой выбор: } p_{\text{оII}} = k_1 * p_{\text{квII}}(t_k) + k_2 * p_{\text{кфII}}(t_k),$$

где  $k_1, k_2$  – весовые коэффициенты.

Частный случай варианта 3 –  $k_2=0$ . В этом случае формальная составляющая используется только для задач корректировки моделей.

Следует отметить, что на данном шаге возникает проблема совместного использования в вычислительных процедурах когнитивных параметров, определяемых в нечетком (расплывчатом) представлении и формальных (четких) представлений. Традиционным образом данная проблема решается за счет использования таблиц фазификации/дефазификации [5], которые формируются на стадии синтеза ФКНС – модели на основе экспертных оценок.

ШАГ 5. Определение состояния формального нейроконцепта ( $c_{\text{фнк}}$ ) на текущем ( $t_k$  – ом) шаге моделирования. По аналогии с механизмом определения значения потенциала, значение состояния на текущем шаге определяется как совокупность двух составляющих – значения состояния на предыдущем шаге (как базовой составляющей) и значения потенциала воздействия (как приращения на текущем шаге):

$$c_{\text{фнкII}}(t_k) = c_{\text{фнкII}}(t_{k-1}) + p_{\text{оII}}(t_k).$$

ШАГ 6. Определение значения выходного потенциала (потенциала воздействия):

$$p_{\text{выхII}}(t_k) = f_{\text{вп}}(c_{\text{фнкII}}(t_k)).$$

По аналогии с традиционными когнитивными моделями в качестве выходного потенциала может быть использовано значение общего потенциала, который является смысловым аналогом значения концепта. Однако, используя подход из области нейросетевого моделирования, для введения нелинейности в процесс моделирования предлагается использование соответствующих процедур, например, сигмоидов, что позволяет как усиливать слабые сигналы, так и не насыщаться от сильных сигналов [6].

Формирование функциональной модели ФКНС, с одной стороны, строится на основе а) совмещения формальных и когнитивных представлений концепта; б) использования нейросетевых механизмов для моделирования указанных формально – когнитивных взаимодействий. Следует отметить, что применение нейросетевого аппарата для моделирования когнитивных процессов позволяет использовать мощный нейросетевой инструментарий для построения и обработки когнитивных моделей, в том числе, и для обработки информации от экспертов при построении модели как процесс обучения нейросетевой модели. Несмотря на обозначенную выше общность когнитивных и нейросетевых представлений, невозможно напрямую подобрать аналог модели нейрона для адекватного описания модели ФКНС. В первую очередь это связано с отсутствием в традиционных нейронных моделях средств для представления параметра «состояние концепта» из когнитивных описаний. В качестве наиболее подходящего аналога предлагается использование предложенной авторами ранее модели динамического нейрона с памятью состояния (ДНПС) [7].

### Организация процессов моделирования

Учитывая роль формальных нейроконцептов как элементарных обработчиков информации, связей влияния, как линий коммуникации, ниже рассматривается структурная организация указанных конструктивных элементов ФКНС – моделей:

А) Структурное описание фнк:

$$\text{стр\_фнкII} = \{ \langle \text{им\_нкII} \rangle, \langle \text{табл\_фдII} \rangle \},$$

где:  $\text{им\_нк}$  – имя функционального нейроконцепта;  $\text{табл\_фд}$  – таблица фазификации/дефазификации значений параметров нейроконцепта.

Б) Структурное описание связи влияния:

$$\text{стр\_вII} = \{ \langle \text{н\_верII} \rangle, \langle \text{к\_верII} \rangle, \langle \text{всII} \rangle \},$$

где  $\text{н\_вер}$  – номер вершины, из которой исходит связь (начальная вершина);  $\text{к\_вер}$  – номер вершины, в которую направлена связь (конечная вершина).

Введенные выше описания, кроме выполнения основных функций моделирования, могут использоваться для формирования иерархических структур и динамической интеграции исследуемых систем из ранее подготовленных фрагментов.

Жизненный цикл моделей, формируемых в соответствии с рассматриваемыми в настоящей статье предложениями, можно представить в виде нижеприводимой последовательности этапов:

Формирование опорной модели (ОМ);

Исполнение модели/решение задач анализа ИС в соответствии с конкретным расчетным заданием;

Реконструкция модели.

ОМ представляет собой информационно – логическое описание ИС. Подобная модель содержит топологическое описание ФКНС в виде графовой структуры в соответствии с соотношением (1), а также весовые значения основных конструктивных элементов и описывается следующим соотношением:

$$ОМ = \{Т\_ФКН, С\_ФНК(0), ВС\}.$$

Здесь:  $С\_ФНК(0)$  – массив начальных весов (значений) состояний формальных нейроконцептов,  $ВС$  – массив весов связей влияния, подготовленные на стадии формирования опорной модели.

Исполнение модели, связанное с формально – когнитивным анализом поведения ИС, можно представить в виде некоторого оператора, обозначаемого как « $\leftrightarrow$ », переводящего начальные условия для анализа и описание моделируемой системы в результаты моделирования (результаты анализа) в соответствии с нижеприводимым соотношением:

$$(ВОЗД(T)):МОД(T) \rightarrow (МОД(T+1)),$$

что интерпретируется, как процедура воздействия на текущую формальную нейрокогнитивную модель ( $МОД(T)$ ) с переводом ее в новое состояние ( $МОД(T+1)$ ), которое рассматривается в качестве результата исполнения моделирования. Применительно к специфике рассматриваемой предметной области, можно выполнить конкретизацию приведенного достаточно общего соотношения.

В этом случае вектор воздействий ( $ВОЗД(T)$ ), управляющих или возмущающих, рассматривается как переопределение полученных на стадии формирования опорной модели значений состояний отдельных формальных нейроконцептов. Учитывая то обстоятельство, что одной из приоритетных задач является исследование динамики поведения, предполагается, что возмущение задается в виде приращения (положительного или отрицательного) значения текущего состояния. Следует обратить внимание, что достаточно сложно определяется механизм работы с приращениями в рамках нечетких представлений. В настоящей статье предлагается специальный подход к организации вычислений, который будем обозначать, как «рейтинговые/процентные вычисления». В соответствии с указанным подходом, формируется рейтинговая таблица фазификации/дефазификации, в которой нечеткому представлению переменных ставится в соответствии четкий числовой интервал (верхняя граница – нижняя граница – медианная точка). В этом случае традиционное задание на моделирование в виде нечеткого высказывания «ввести небольшое улучшение значения параметра «Себестоимость» адекватно может быть сформулирована, как рейтингово – процентное высказывание «ввести улучшение показателя себестоимость на 4%». Очевидно, что рейтингово – процентная оценка для эксперта не менее естественна, чем расплывчатые оценки типа «значение себестоимости несколько улучшилось» или «значение себестоимости стало очень плохим». Другими словами, эксперту с достаточной степенью удобства и наглядности привычно манипулировать рейтинговыми оценками, хотя они, конечно, в большей степени являются качественными, чем количественными (т.е. рейтинговая оценка является индивидуальной числовой оценкой качественного показателя).

Строго говоря, предлагаемый механизм рейтинговых вычислений не соответствует классическому подходу в концепциях нечеткого моделирования. Тем не менее, учитывая определенный уровень условности обоих механизмов, можно считать адекватными оба подхода.

Учитывая высокую степень условности и субъективности когнитивных процессов и оценок, важную роль играют степень наглядности и информативности представления результатов моделирования. В соответствии с этим предлагается реализация вычислительного механизма, обозначаемого как вычисление по трем точкам. Данный механизм предусматривает формирование заданий на расчет/анализ в формально – когнитивных нейросистемах, выполнение вычислений и представление результатов выполняется не в виде единого значения, а в виде тройки оценок (пессимистическое – минимальное; оптимистическое – максимальное; наиболее ожидаемое – медианное). Представление результата в виде трех значений в наибольшей степени подходит для экспертного анализа в действительно расплывчатых ситуациях.

Необходимость реконструкции модели обуславливается получением неадекватных результатов. Очевидно, что указанная неадекватность может быть определена путем соотнесения результатов моделирования с некоторыми реальными представлениями, которые могут быть в т.ч. и формальными составляющими.

Таким образом, формальную составляющую в описываемой модели предлагается использовать не только для определения значения выходного потенциала и состояния нейроконцепта, но и для анализа корректности модели. Данная процедура основана на вычислении «невязки»:

$$\varepsilon_{II}(t_k) = |п\_кв_{II}(t_k) - п\_кф_{II}(t_k)|$$

Превышение некоторого допустимого предела, т.е. выполнение соотношения

$$\varepsilon_{II}(t_k) - \varepsilon_{доп} \geq 0$$

означает необходимость корректировки моделей (здесь  $\varepsilon_{доп}$  – допустимая невязка).

При реализации комплекса формирования и исследования ФКНС, основные конструктивные элементы ФКНС рассматриваются как элементы систем авторегулирования с исполнением моделирования в среде SimInTech [8].

Серьезной проблемой, подлежащей отдельному рассмотрению, является организация первичной (опорной) структуры ФКНС при больших объемах данных (в том числе – при наличии большого объема формальных нейроконцептов), при которых является невозможной или недостаточно эффективной обработка данных экспертами ручными методами. Для решения указанной задачи, связанной с необходимостью классификации и кластеризации пространства формируемых формальных нейроконцептов, предусматривается использование биоинспирированных алгоритмов фильтрации и классификации в рекомендательных системах [9], [10].

**Финансирование**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00412 и № 19-07-00570.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Funding**

The reported study was funded by RFBR according to the research projects no.19-01-00412 and no. 19-07-00570.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Колоденкова А.Е. Построение системы когнитивных моделей и методов анализа реализуемости проекта по созданию информационно – управляющих систем для атомных станций / А.Е. Колоденкова // Глобальная ядерная безопасность – 2016. – №3(20), С. 43 – 50.
2. Кулинич А.А. Когнитивная система поддержки принятия решений “Канва” / А.А. Кулинич // Программные продукты и системы. –2002. – №3. – С. 23 – 27.
- 3.Нагорная Н.В. Экономика энергетики: учеб. пособие / Н.В. Нагорная; – Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2007. – 157 с.
4. Guzik V.F. Fuzzy Cognitive Maps Considering Real Parameters of Simulated Systems / V.F. Guzik, A.S. Gamisonia, S.A. Chernyj, A.V. Shestakov // International Journal of Innovation, Creativity and Change. –2019. – Volume 7, Issue – P. 153 – 160.
5. Павлов А.Н. Методы обработки экспертной информации: учебно - методическое пособие / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов Б.В. // СПб: ГУАП, 2005. – 42 с.
6. Функции активации в нейронных сетях [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/activation-function.html>
7. Гузик В.Ф. Модели нейронов с памятью состояния для организации нейроразвивающихся вычислений / Гузик В.Ф., С.А. Черный, А.В. Шестаков // Научный журнал КубГАУ. – 2017 – № 133(09) – С. 467 – 474.
8. Карташов Б.А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаетов, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 423 с.
9. О.Н. Родзина. Гибридная модель и биоинспирированный алгоритм фильтрации для рекомендательных систем. Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2019» («ИС & ИТ-2019», «IS&IT'19»). Научное издание в 2-х т. / Родзина О.Н., Гинис Л.А., Родзина Л.С., А.В. Шестаков А.В.. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2019. – С. 234 – 236
10. С.И. Родзин Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) / Родзин С.И., Курейчик В.В. Кибернетика и программирование. – 2017. – № 3. – С. 51 – 79.

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

1. Kolodenkova A.E. Postroenie sistemy kognitivnyh modelej i metodov analiza realizuemosti proekta po sozdaniyu informacionno – upravlyayushchih sistem dlya atomnyh stancij [Building a system of cognitive models and methods for analyzing the feasibility of a project to create information management systems for nuclear plants] / A.E. Kolodenkova // Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety] – 2016. – №. 3 (20), P. 43 – 50. [in Russian]
2. Kulinich A.A. Kognitivnaya sistema podderzhki prinyatiya reshenij “Kanva” [Cognitive decision support system “Canva”] / A.A. Kulinich // Programmnye produkty i sistemy [Software products and systems]. –2002. – № 3. – P. 23 – 27. [in Russian]
3. Nagornay N.V. Ekonomika energetiki: ucheb. posobie [Energy Economics: Textbook. Allowance] / N.V. Nagornay – Vladivostok: Publishing House DVG TU – 2007. – P 157 . [in Russian]
4. Guzik V.F. Organisation of Fuzzy Cognitive Maps Considering Real Parameters of Simulated Systems / V.F. Guzik, A.S. Gamisonia, S.A. Chernyi, A.V. Shestakov // International Journal of Innovation, Creativity and Change. – 2019. – Vol 7, Issue 12, – P. 153 – 160.
5. Pavlov A.N. Metody obrabotki ekspertnoj informacii: uchebno – metodicheskoe posobie [Methods for processing expert information: teaching aid] / A.N. Pavlov, B.V. Sokolov – St. Petersburg: GUAP, 2005. – 42 p. [in Russian]
6. Funkcii aktivacii v nejronnyh setyah [Activation functions in neural networks] [Electronic resource]. – URL: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/activation-function.html>. . [in Russian]
7. Guzik V.F. Modeli nejronov s pamyat'yu sostoyaniya dlya organizacii nejroevolyucionnyh vychislenij [Neuron models with state memory for organizing neuroevolutionary computing] / V.F. Guzik, B.V. S.A. Chernyj, A.V. Shestakov Nauchnyj zhurnal KubGAU [Scientific journal KubSAU]. – 2017. – № 133 (09) –P. 467 – 474 [in Russian]
8. B.A. Kartashov Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech [Medium of dynamic modeling of technical systems SimInTech] / Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M – M.: DMC Press, 2017. – 423 p. [in Russian]
9. Rodzina O.N. Gibridnaya model' i bioinspirovannyj algoritm fil'tracii dlya rekomendatel'nyh sistem. Trudy Mezhdunarodnogo nauchno – tekhnicheskogo kongressa «Intellektual'nye sistemy i informacionnye tekhnologii - 2019» («IS & IT-2019», «IS&IT'19»). Nauchnoe izdanie v 2-h t. [Hybrid model and bio – inspired filtering algorithm for recommendation systems. Proceedings of the International Scientific and Technical Congress “Intelligent Systems and Information Technologies / . – 2019” (“IS & IT-2019”, “IS & IT'19”). Scientific publication in 2 volumes T. 1. ] / O.N. Rodzina, L.A. Ginis, L.S. Rodzina, A.V. Shestakov // Taganrog: Izd-vo Stupina S.A. [Publishing house Stupina S.A.]. – 2019. —P. 234 – 236 [in Russian]
10. Rodzin S.I. Teoreticheskie voprosy i sovremennyye problemy razvitiya kognitivnyh bioinspirovannyh algoritmov optimizacii (obzor) [Theoretical questions and modern problems of the development of cognitive bio-inspired optimization algorithms (review)] / Rodzin S.I., Kureichik V.V // Kibernetika i programmirovaniye. [Cybernetics and programming]. – 2017. – №. 3. – P. 51 – 79. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.021>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН

Научная статья

Тимохова О. М.<sup>1,\*</sup>, Бурмистрова О. Н.<sup>2</sup>, Тимохов Р. С.<sup>3</sup><sup>1, 2, 3</sup> Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

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

### Аннотация

В статье рассматривается один из эффективных способов повышения долговечности деталей лесозаготовительных машин, работающих в условиях трения. Напыление на рабочие поверхности долговечных износостойких газотермических покрытий, позволяет экономить дорогостоящие материалы, увеличивать срок службы и надежность механизмов и успешно решать задачи и проблемы восстановления для повторного использования изношенных деталей. С целью повышения эффективности газотермического напыления проведены исследования с терморреагирующими материалами (NiAl), в состав которых были введены наноприбриллы (НФЦ).

**Ключевые слова:** износ, газотермическое покрытие, детали лесных машин.

## INVESTIGATION OF THE WEAR RATE OF THERMAL SPRAY COATINGS OF FOREST MACHINE PARTS

Research article

Timokhova O. M.<sup>1,\*</sup>, Burmistrova O. N.<sup>2</sup>, Timokhov R. S.<sup>3</sup><sup>1, 2, 3</sup> Ukhta state technical university, Ukhta, Russia

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

### Abstract

The article discusses one of the most effective ways to improve the durability of parts of forestry machines operating under friction conditions. Spraying on the working surfaces of durable wear-resistant gas-thermal coatings allows saving expensive materials, increasing the service life and reliability of mechanisms and successfully solving problems and problems of recovery for reuse of worn parts. In order to increase the efficiency of thermal spraying, studies were carried out with thermoreactive materials (NiAl), in which nanofibrils (NFC) were introduced.

**Keywords:** wear, gas-thermal coating, forest machine parts.

### Введение

Проблема повышения надёжности лесных машин в условиях современных лесозаготовительных предприятий ставит задачу создания новых технологических процессов и применения новых материалов, позволяющих повысить ресурс и долговечность лесных машин. Повышение износостойкости и коррозионной стойкости, сопротивления усталостным процессам поверхностей трения актуально для крупногабаритных тяжело нагруженных быстроизнашивающихся деталей лесных машин, на замену которых ежегодно расходуются значительные средства.

Одним из эффективных способов повышения долговечности деталей лесных машин, работающих в условиях трения, является напыление на их рабочие поверхности прочных износостойких газотермических покрытий, позволяющих экономить дорогостоящие материалы, повышать ресурс и надёжность механизмов, успешно решать проблемы восстановительного ремонта в целях повторного использования изношенных деталей.

### Результаты исследований

Создание новых композиционных материалов и разработка технологического процесса напыления без последующей термической обработки для восстановления и упрочнения деталей лесных машин, которые помогут повысить эксплуатационные свойства и прочность сцепления покрытия с основой для повышения ресурса крупногабаритных тяжело нагруженных деталей.

На технологичность порошковых материалов и на свойства покрытий влияет форма исходных частиц, а также особенности её структуры и фазового состава. С точки зрения технологичности важным положительным фактором является сферичность частиц порошка. Максимально приближённая к сфере форма частиц обеспечивает их хорошую текучесть, равномерность расхода и прогрева и, как следствие, высокую производительность напыления, а также способствует получению покрытий с меньшей пористостью и более высокой прочностью сцепления.

С целью повышения эффективности газотермического напыления проведены исследования с терморреагирующими материалами (NiAl), в состав которых были введены наноприбриллы (НФЦ). Физико-механические свойства наноприбрилл позволяют создать наноструктурированную поверхность покрытия.

Исследования показали, что интенсивность изнашивания покрытия при напылении порошком ПТ-ЮНХ15СР2 при удельной нагрузке до 40 МПа ниже, чем у стали 45. Износ для исследуемого состава порошка (ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ) не превышает 20 мкм. С увеличением нагрузки свыше 40 МПа интенсивность изнашивания, как у покрытий из ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ, так и для стали 45, уменьшается, причём это уменьшение у ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ значительно больше, чем у других.

Объяснить характер зависимостей износа покрытий можно следующим образом.

При сравнительно небольших удельных нагрузках (до 30 МПа) преобладающим видом разрушения является схватывание и окислительный процесс. Так как в композиционных покрытиях на границах твёрдых составляющих происходит накопление дислокаций и вакансий, то из-за малой их подвижности на поверхностях скольжения не создаются центры схватывания.

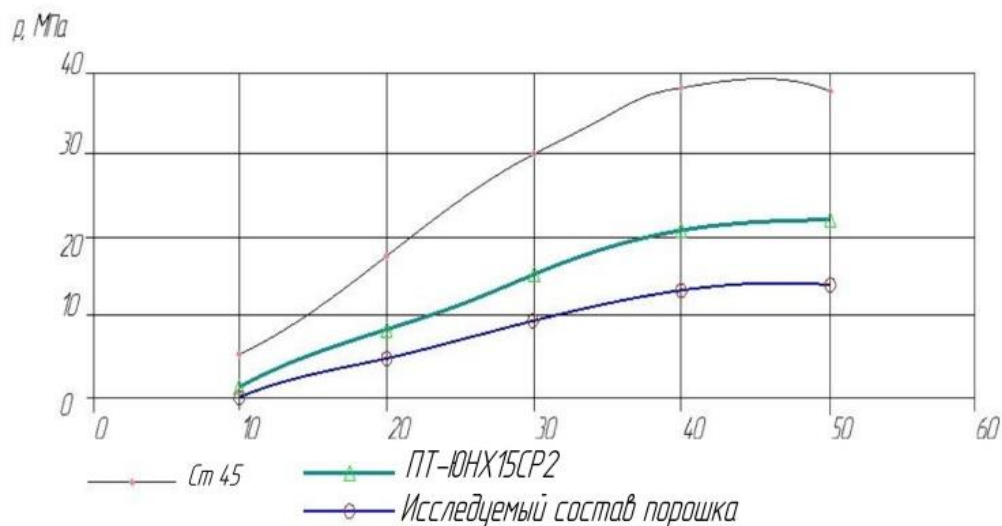


Рис. 1 – Зависимость износа материалов от удельной нагрузки ( $A = 0,06$  мм,  $N = 1 \times 10^6$ ,  $f = 25$  Гц)

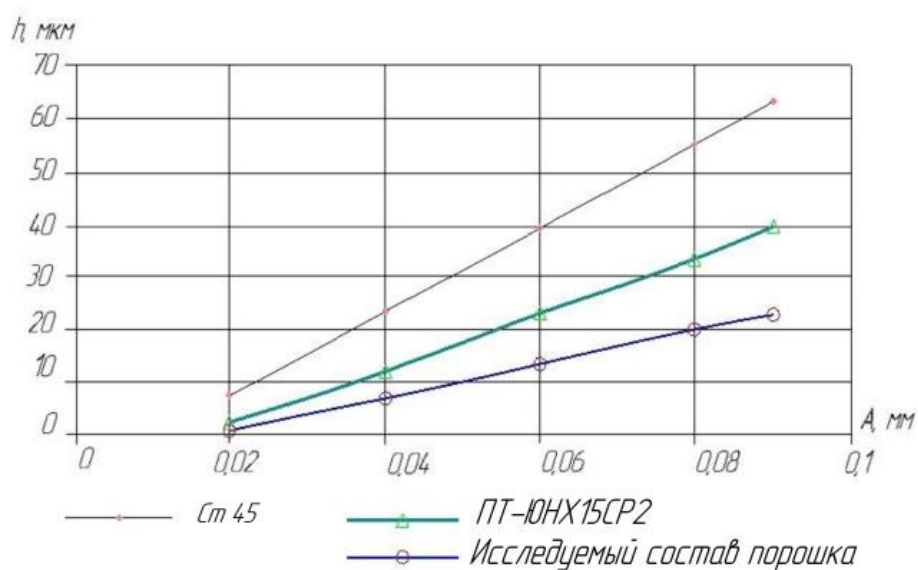


Рис. 2 – Зависимость износа материалов от амплитуды колебаний ( $p = 40$  МПа,  $N = 1 \times 10^6$ ,  $f = 25$  Гц)

Второй причиной сравнительно низкой интенсивности изнашивания полученных покрытий при удельной нагрузке до 30 МПа являются меньшие температуры в зоне трения по сравнению со сталью 45, возникающие за счёт прохождения упругих волн, что снижает интенсивность окислительных процессов у данных покрытий.

С увеличением удельной нагрузки примерно до 40 МПа интенсивность изнашивания как стали 45, так и полученных композиционных покрытий возрастает до максимального значения.

На этой стадии износа происходит разрушение вследствие усталости выступов, создаются первичные продукты износа, часть из которых (Ni, Fe) окисляется (аналогично для стали 45). Однако при разрушении покрытий большую часть продуктов износа составляют частицы первичных кристаллов, у стали 45 – железо.

Интенсивность окислительных процессов при коррозионных процессах стали 45 выше, чем при аналогичном разрушении композиционных покрытий. Поэтому у образцов из стали 45 значительно интенсивнее происходит усталостное разрушение.

С увеличением удельной нагрузки свыше 40 МПа интенсивность изнашивания образцов с покрытиями и из стали 45 уменьшается. Это явление может быть объяснено следующим образом: увеличение удельной нагрузки приводит к образованию большего количества продуктов изнашивания и их дроблению, что, в свою очередь, приводит к погашению относительного движения этой прослойки продуктов износа (улучшается отвод частиц из зоны трения, уравновешивая их возникновение) и созданию условий скольжения или качения продуктов износа между собой и поверхностями контакта, что способствует снижению интенсивности изнашивания.

Интенсивность изнашивания образцов с покрытием ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ и из стали 45 от амплитуды колебаний является линейной (рис. 2). Износ, независимо от природы материалов, прямо пропорционален величине амплитуды колебаний в исследуемом диапазоне значений.

При пониженных амплитудах скольжения интенсифицируются процессы локального абразивного действия продуктов износа и усталостного разрушения металла, усугубленные химической активизацией поверхностей трения. Эти процессы происходят интенсивнее при трении образцов из стали 45, поэтому и интенсивность изнашивания их выше по сравнению с напылёнными образцами.



С увеличением амплитуды повышается вероятность контакта вновь образованных (химически активных) поверхностей и их схватывание. При этом не исключено, что с увеличением амплитуды колебаний микровыступы одной поверхности начинают интенсивнее взаимодействовать с неровностями сопряжённой с ней поверхности. В результате возрастает количество знакопеременных взаимодействий в пятнах фактического контакта, что приводит к усталостному выкрашиванию. Для образцов с покрытием из состава порошка ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ интенсивность указанных процессов ниже, чем для стальных образцов (рис. 3).

С увеличением частоты колебаний (примерно до 25 циклов в секунду) износ убывает до минимального значения и впоследствии стабилизируется. Было установлено, что устойчивые к окислению материалы мало реагируют на изменение частоты колебаний, и действительно, как показывают результаты проведённых экспериментов (рис. 3), покрытие из исследуемого состава порошка ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ, содержащее наноприлизмы, в меньшей степени реагируют на изменение частоты колебаний, чем сталь 45.

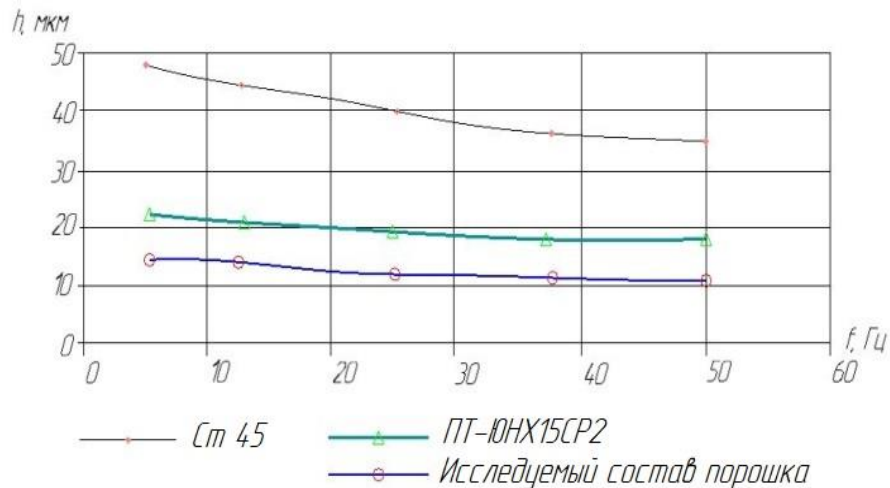


Рис. 3 – Зависимость износа материалов от частоты колебаний ( $A = 0,06$  мм,  $N = 1 \times 10^6$ ,  $p = 40$  МПа)

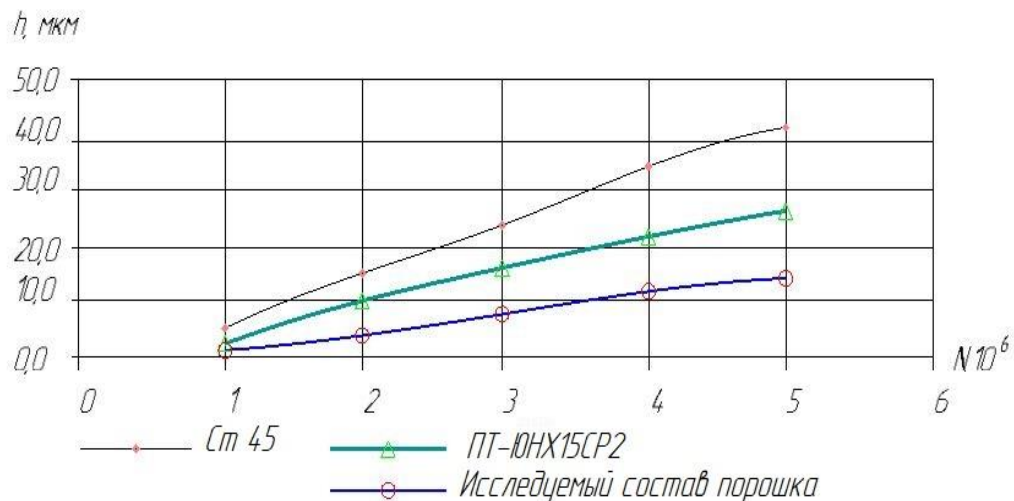


Рис. 4 – Зависимость износа материалов от числа циклов ( $A = 0,06$  мм,  $p = 40$  МПа,  $f = 25$  Гц)

Снижение интенсивности изнашивания с увеличением частоты колебаний можно объяснить следующим образом: если считать, что абразивное действие отделившихся частиц металла зависит от степени их окисления, можно предположить, что при малых частотах колебаний вблизи металлической поверхности более вероятно образование твёрдых абразивных частиц окислов. При больших частотах плоскость раздела между окисленными и неокисленными частицами должна сдвигаться от металлической поверхности, так как скорость окисления частиц будет меньше. В этом случае интенсивность изнашивания при протекании коррозионных процессов должна уменьшаться. На характер повреждаемости при коррозионных процессах оказывает влияние и температурный фактор. Температура в зоне контакта при увеличении частоты колебаний повышается менее интенсивно для покрытий по сравнению со стальными образцами вследствие более низкого коэффициента трения.

Изнашивание покрытий и стали 45 зависит от числа циклов нагружения (рис. 4). Интенсивность разрушения при протекании коррозии возрастает с увеличением количества циклов реверсивного нагружения. Из графика видно, что износ покрытий из напыленного состава порошка ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ ниже, чем из стали 45. Это можно объяснить, как и в предыдущих опытах, характером образования и разрушения окисных плёнок, характером воздействия абразивных частиц, устойчивостью к окислению и т. п.

Следует отметить, что при количестве циклов выше  $3 \times 10^6$  интенсивность изнашивания испытываемых образцов, как из стали 45, так и с покрытиями, снижается. Это явление можно объяснить тем, что с увеличением количества циклов

происходит накопление мелкодисперсных частиц (продуктов износа) в зоне контакта, что уменьшает металлический контакт, уменьшает относительное движение и создаёт условия их скольжения или качения между собой и поверхностями контакта.

В коррозионных условиях и под действием высоких удельных нагрузок в процессе эксплуатации слабо упрочняющаяся пластичная матрица легко переносится на сопряжённую поверхность, предохраняет её от повреждений и способствует релаксации напряжений. Это обуславливает высокую износостойкость полученных покрытий по сравнению со сталью 45, закалённой до 40...43 HRC (в 1,7...3,0 раза), сравнимую с износостойкостью оплавленного сплава ПТ-ЮНХ15СР2.

### Заключение

В результате исследований изнашивания при коррозионных процессах полученных покрытий установлено, что исследуемый состав порошка имеет износостойкость в 1,5...2,0 раза выше по сравнению со сталью 45 и сопоставимую с износостойкостью оплавленного самофлюсующегося сплава ПТ-ЮНХ15СР2 во всём диапазоне удельных нагрузок, количества циклов нагружения, амплитуды и частоты колебаний. Установлено, что износостойкость в условиях граничного трения покрытий из исследуемого состава порошка ПТ-ЮНХ15СР2 + НФЦ во всём диапазоне удельных нагрузок (10...40 МПа) и скоростей скольжения (0,5...3,5 м/с) в 1,3...2,3 раза выше, чем стали 45, закалённой до 40...43 HRC, и сопоставима с износостойкостью оплавленного самофлюсующегося сплава ПТ-ЮНХ15СР2. Высокая износостойкость может быть объяснена наноструктурированным характером структуры исследуемого покрытия.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Тимохова О. М. Вопросы технологического обеспечения плазменного напыления и упрочнения покрытий деталей машин / О. М. Тимохова, А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. Л. Махонин // Воронежский научно-технический вестник. – 2017. – Т.4. – № 4(22). – С. 16-31.
2. Тимохова О. М. Повышение коррозионной стойкости технологического оборудования и деталей машин / О. М. Тимохова, Н. Р. Шоль, Г. Б. Коптяева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 3. – С. 141.
3. Тимохова О.М. Исследование наноматериалов при поверхностном упрочнении деталей лесных машин / О.М. Тимохова, Н.Р. Шоль // Система. Методика. Технологии. – 2012. – №4 (6). – С. 29-31.
4. David E.J. Corrosion science and technology / E.J. David, D.R. James. – CRC Press, 2010. – 432 p.
5. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления / Л.Х. Балдаев. – М., 2004. – 134 с.

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

1. Timokhova O.M. Voprosy tehnologicheskogo obespechenija plazmennogo napylenija i uprochnenija pokrytij detalej mashin [Questions of technological support of plasma spraying and strengthening of coatings of machine parts] / O.M. Timokhova, A.M. Kadyrmetov, E.V. Snyatkov, V.L. Makhonin // Voronezhskij nauchno-tehnicheskij vestnik [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]. – 2017. – V.4. – No. 4 (22). – P. 16-31. [in Russian]
2. Timokhova O.M. Povyshenie korrozionnoj stojkosti tehnologicheskogo oborudovanija i detalej mashin [Improving the corrosion resistance of processing equipment and machine parts] / O.M. Timokhova, N.R. Scholl, G.B. Kopteva // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. [Scientific-technical Vestnik of the Volga region]. – 2011. – No. 3. – P. 141-144. [in Russian]
3. Timokhova O.M. Issledovanie nanomaterialov pri poverhnostnom uprochnenii detalej lesnyh mashin [Research of nanomaterials at surface hardening of parts of forest machines] / O.M. Timokhova, N.R. Scholl // Sistema. Metodika. Tehnologii. [System. Methodology. Technology]. – 2012. – No. 4 (6). – P. 29-31. [in Russian]
4. David E.J. Corrosion science and technology / E.J. David, D.R. James. – CRC Press, 2010. – 432 p.
5. Baldaev L.H. Renovacija i uprochnenie detalej mashin metodami gazotermicheskogo napylenija [Renovation and strengthening of machine parts by methods of thermal spraying] / L.H. Baldaev. – М., 2004. – 134 p. [in Russian]



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.022>**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕНИТНОГО УГЛА НАКЛОННО НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЫ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОКОЛОСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА**

Научная статья

**Юдаков В.С.<sup>1,\*</sup>, Деканоидзе Э.М.<sup>2</sup>, Мухтаров М.Ш.<sup>3</sup>, Тиличкан А.А.<sup>4</sup>**<sup>1,3</sup> Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;<sup>2,4</sup> ООО «НПО «Центротех», г. Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (bob1n57[at]gmail.com)

**Аннотация**

В данном научном исследовании изучены факторы, влияющие на потерю устойчивости ствола скважины в процессе бурения, установлено влияние зенитного угла на геомеханические процессы в массиве горных пород. Авторами исследования разработан метод по выбору оптимальной траектории скважины, с учетом действующих напряжений горных пород с наклонно направленным окончанием ствола. Разработан алгоритм определения оптимальных зенитных углов на основе расчетов теории Кулона-Мора напряженного состояния в неустойчивых или слабосвязанных горных породах, с целью повышения устойчивости, предупреждения обвалов и аварий.

**Ключевые слова:** устойчивость ствола скважины, бурение, теория Кулона-Мора, касательные напряжения, нормальные напряжения.

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE ZENITH ANGLE OF AN INCLINED DIRECTIONAL WELL ON THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE BIRD SPACE**

Research article

**Yudakov V.S.<sup>1,\*</sup>, Dekanoidze E.M.<sup>2</sup>, Mukhtarov M.Sh.<sup>3</sup>, Tilichkan A.A.<sup>4</sup>**<sup>1,3</sup> St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia;<sup>2,4</sup> LLC SPA Centrotech, St. Petersburg, Russia

\* Corresponding author (bob1n57[at]gmail.com)

**Abstract**

In this scientific study, the factors affecting the loss of stability of the wellbore during drilling were studied, and the influence of the zenith angle on the geomechanical processes in the rock mass was established. The authors of the study developed a method for choosing the optimal well trajectory, taking into account the acting stresses of rocks with an obliquely directed end of the wellbore. An algorithm has been developed for determining the optimal zenith angles on the basis of calculations of the Coulomb-Mohr theory of the stress state in unstable or weakly connected rocks, in order to increase stability, prevent landslides and accidents.

**Keywords:** wellbore stability, drilling, Coulomb-Mohr theory, shear stresses, normal stresses.

**Введение**

На современном этапе в технологии бурения наклонно направленных и горизонтальных скважин требуется решения целого ряда технологических проблем. Важнейшим элементом, в значительной мере определяющим технико-экономические показатели и качество строительства скважин, является обеспечение устойчивости ствола скважины.

В поисках решения проблем устойчивости ствола скважины, были рассмотрены различные теории прочности. Теория прочности горных пород Кулона-Мора является самой распространенной и обладает неоспоримыми экспериментальными подтверждениями. Для прогнозирования предела прочности тех или иных пород данная теория является наиболее приемлемой. Основными параметрами модели этой теории являются угол внутреннего трения и величина сцепления горной породы. Соответственно, при изменении последних можно влиять на прочность породы и изменение напряженного состояния горных выработок [1], [5].

Однако, в настоящее время нет целостной методики по прогнозированию устойчивости ствола скважины. Установлены лишь влияние плотности бурового раствора, механической скорости бурения, скорости движения промывочной жидкости на устойчивость стенок скважины. В данной работе рассмотрен иной подход профилактики предупреждения осыпей и обвалов стенок скважин. Он заключается в изменении траектории ствола скважины, в зависимости от геологической структуры горной породы, а именно зенитного угла скважины, значение которого впоследствии позволяют перераспределять напряжения на стенке скважины, уменьшив тем самым количество опасных напряжений [2].

Основные задачи исследования зависимости устойчивости ствола скважины от зенитного угла:

1. Аналитическая оценка состояния работ и проблем совершенствования инженерных методов управления проявлениями горного давления.
2. Оценка влияния геолого-технических факторов на процессы проявления горного давления (деформации и разрушения породных массивов), в зависимости от зенитных углов.

**Методы и принципы исследования**

В качестве условий расчета были применены значения действующей скважины на Федоровском нефтяном месторождении:

- глубина скважины  $h=2500$  м;
- плотность бурового раствора  $1,1$  г/см<sup>3</sup>;
- плотность вышележащих горных пород  $2,7$  г/см<sup>3</sup>;
- изменение зенитного угла  $20, 30, 45, 70$  и  $90$  градусов.

- $\rho = 27,58 \cdot 10^{-3}$  (угол внутреннего трения породы) ;
- $k = 27,43^\circ$  (коэффициент сцепления).

На рисунке 1 показан участок наклонной скважины, пробуренной в породе.

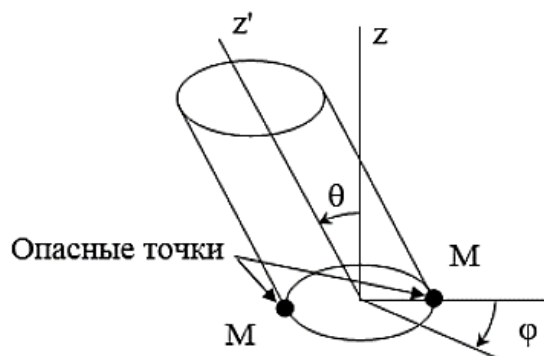


Рис. 1 – Участок наклонной скважины и положение потенциально опасных точек на контуре скважины для малых зенитных углов

На рисунке 2 показано положение опасных точек на контуре скважины, где напряжения достигают максимума. Для малых углов наклона скважины они находятся в плоскости, образуемой вертикалью и осью скважины (точки М). С ростом угла наклона скважины максимальные касательные напряжения растут и точки максимумов смещаются относительно точки М в обе стороны по окружности на угол, определяемый выражением (3) (точки N). При этом, естественно, повышается вероятность разрушения. Как показывают расчеты, при увеличении угла наклона скважины предельные касательные напряжения будут возникать во всем большем числе точек на контуре [4], [8].

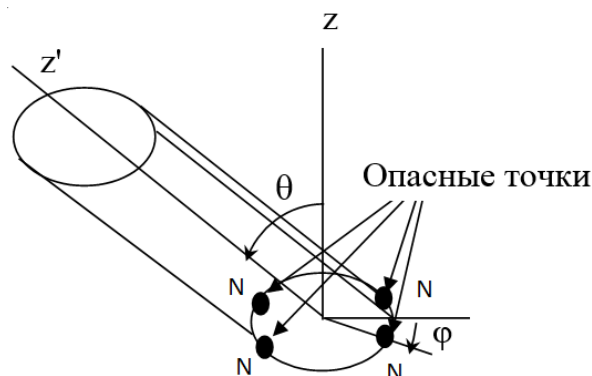


Рис. 2 – Положение потенциально опасных точек при больших зенитных углах

### Основные результаты

В данной работе был составлен расчет для участка горной породы песчаник светло-серый, залегающий на глубине 2321-2562 метров:

Горное давление  $q$  определяется по формуле ( $q < 0$ ):

$$q = -\rho_{\Gamma\Pi} gh, \quad (1)$$

где  $\rho_{\Gamma\Pi}$  - плотность вышележащих горных пород.

$$q = -\rho_{\Gamma\Pi} gh = 2700 \cdot 9,81 \cdot 2500 \cdot 10^{-6} = -66,21 \text{ МПа.}$$

Давление в скважине  $p$  определяется по формуле ( $p > 0$ ):

$$p = \rho_{БР} gh, \quad (2)$$

где  $\rho_{БР}$  - плотность вышележащих горных пород.

$$p = \rho_{БР} gh = 1100 \cdot 9,81 \cdot 2500 \cdot 10^{-6} = 26,97 \text{ МПа}$$

При условии  $0 \leq \theta \leq \rho$  (зенитный угол меньше угла внутреннего трения породы) опасные точки располагаются на верхней и на нижней стенке скважины (точки М рис. 2). Если  $\rho \leq \theta \leq 90^\circ$ , то положение опасных точек определяется выражением (3).

Предоставим расчет для зенитного угла  $45^\circ$ :

$$\phi = \frac{1}{2} \arccos \left[ \frac{\sin \rho}{\sin \theta} \right] = \frac{\arccos \left( \frac{\sin 27,58}{\sin 45} \right)}{2} = 24,55^\circ \quad (3)$$

Нормальное напряжение  $\sigma_n$  при  $\theta = 45^\circ$  и  $\phi = 24,55^\circ$  (4):

$$\sigma_n = q - (q + p_c) \cos 2\phi \sin^2 \theta = -66,21 - (-66,21 + 26,97) \cos(2 \cdot 24,55) \cdot \sin^2 45 = 58,48 \quad (4)$$

Предел прочности касательных напряжений породы (5):

$$[\tau] = k - \sigma_n \operatorname{tg} \rho = 27,43 \cdot 10^{-3} + 55,01 \cdot \operatorname{tg} 27,58 = 30,57 \text{ МПа} \quad (5)$$

где  $\sigma_n$  – нормальное напряжение на площадке,  $k$  – величина сцепления горной породы и  $\rho$  – угол внутреннего трения породы.

Абсолютная величина касательных напряжений определяется по формуле (6):

$$\begin{aligned} \tau &= -(q + p_c) \sin \theta \sqrt{1 - \cos^2 2\phi \sin^2 \theta} = \\ &= -(-66,21 + 26,97) \sin 45 \sqrt{1 - \cos^2(2 \cdot 24,55) \cdot \sin^2(2 \cdot 45)} = 26,64 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициент запаса прочности  $n$  вычисляется по формуле (7):

$$n = \frac{[\tau]}{\tau_{\max}} = \frac{30,57}{26,64} = 1,147 \quad (7)$$

Судя по величине коэффициента запаса прочности можно говорить об устойчивости ствола скважины. При  $n > 1$  стенки скважины находятся в стабильном состоянии. При коэффициенте запаса  $\leq 1$  величина нагрузок превышает либо равна пределу прочности, и стенка скважины теряет устойчивость [3], [6].

На основе вычисленных значений строим график разности предела прочности  $[\tau]$  и касательных напряжений  $\tau$  (рис. 3).

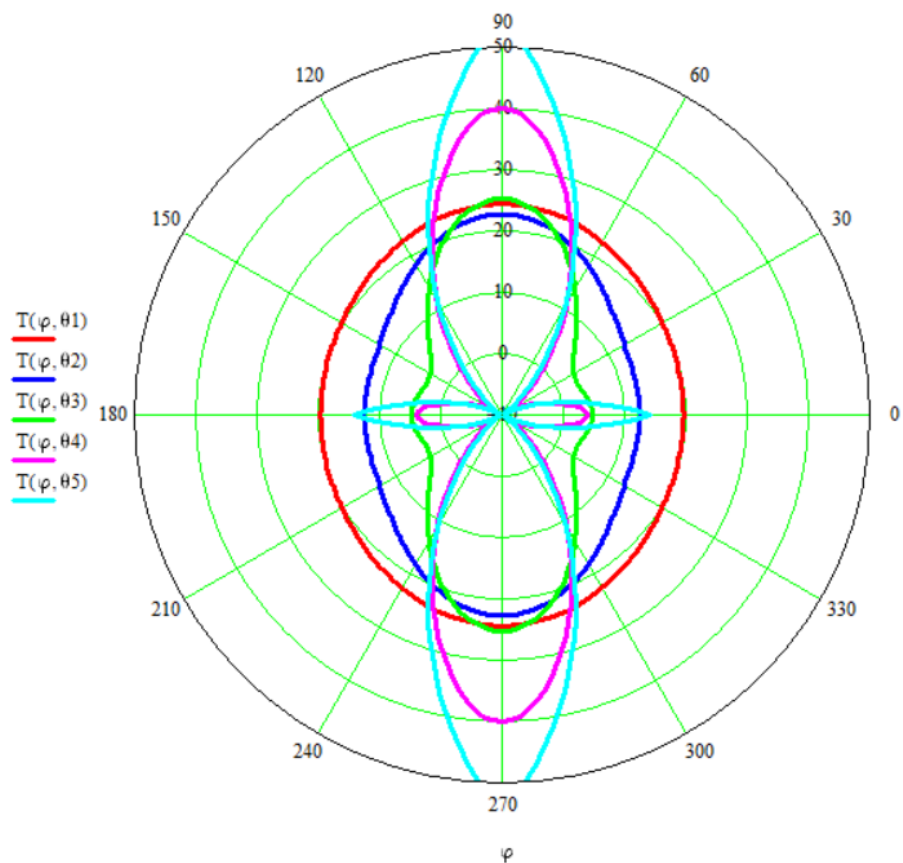


Рис. 3 – Разность предела прочности и касательных напряжений на стенке скважины на участке песчаников 2321 – 2562 метров, где  $\varphi$  – полярный угол; 20, 30, 45, 70, 90 – зенитный угол скважины (горизонтальное сечение скважины, вид сверху).

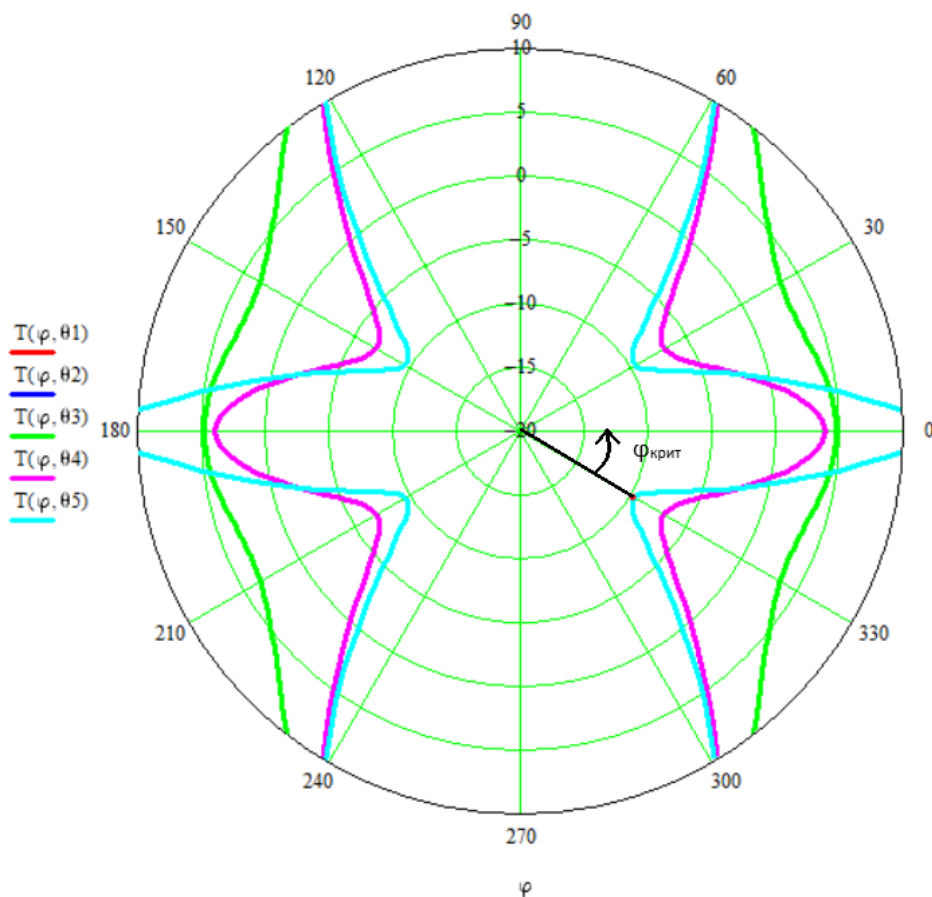


Рис. 4 – Увеличенный график разности предела прочности и касательных напряжений,  $\varphi_{\text{крит}}$  – потенциально опасный угол, максимум касательных напряжений; 20, 30, 45, 70, 90 – зенитный угол скважины (горизонтальное сечение скважины, вид сверху).

Область линий, которая заходит за границы 0 МПа, является зоной разрушения. Как видно из графика, скважина при данных условия потеряет устойчивость при зенитном угле  $70^\circ$  и  $90^\circ$ . Результаты расчетов подтверждают графическое изображение, при данных углах коэффициент запаса  $<1$ . Подтверждается верность вычисления положения потенциально опасных точек на контуре скважины [7], [9].

На основании расчетных данных можно сделать следующие выводы:

- с увеличением наклона скважины растет и величина максимума напряжений;
- с ростом угла наклона скважины не только увеличивается величина максимума напряжений, но также увеличивается и размер области, в которой действуют высокие напряжения. Поэтому, процесс разрушения, возникший при некотором угле наклона скважины в узкой области в окрестности точки, по мере увеличения наклона расширяется, захватывая все более широкую область, пока не наступает потеря устойчивости стенок скважины.

Данный метод по расчету напряженного состояния вокруг стенок скважины позволит проектировать наклонно направленные и горизонтальные скважины с высокой устойчивостью ствола. По данным расчетам можно прогнозировать опасные горно-геологические участки, с целью корректировки зенитных углов, не провоцирующих разрушение стенок скважины [10].

### Заключение

Объединяя результаты расчетов напряженного состояния в околоскважинном пространстве, в зависимости от зенитного угла, определено положение критических точек на контуре скважины.

В результате данных вычислений можно наблюдать динамику изменения запаса прочности породы в рассматриваемой точке скважины в зависимости от зенитного угла. Данная методика позволяет определить опасные сечения скважины при проектировании профилей. В перспективе, с помощью этой методики определения устойчивости возможна оптимизация профиля скважины, исключая протяженные интервалы опасных зенитных углов.

Таким образом, благодаря данному методу решения проблемы осыпей и обвалов, можно проектировать профили наклонно направленных и горизонтальных скважин с необходимой устойчивостью ствола.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Вашкевич А.А. Развитие подходов комплексного геомеханического моделирования в ПАО «Газпром нефть» / А.А. Вашкевич, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.С. Бочков // Нефтяное хозяйство-№12, 2016, – С. 16-19.
2. M-I SWACO, группа «Шлюмберже», Системы растворов и реагентов для бурения // Решения для бурения - Редакция 6, 2014
3. Шарова О.Ю. Методики подбора комплексных сухих смесей кольматантов для предупреждения и ликвидации зон осложнений / О.Ю. Шарова, А.Ф. Галиев, А.В. Самыскин и др. // Территория Нефтегаз. №5. 2012. – С.34-37.
4. Змеев Ю.В. Выбор ингибирующего бурового раствора в системе «буровые растворы» при строительстве скважин в ОАО «Сургутнефтегаз» // Бурение и нефть - №1, 2011.
5. Карев В.И. Определение деформационных и прочностных свойств горных пород применительно к баженевским отложениям / В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов// «Технологии ТЭК», № 3 (22), 2005, – С. 17-21.
6. Овчинникова В.П. Справочник бурового мастера / В.П. Овчинникова, С.И. Грачёва, А.А. Фролова. М.:Инфра-Инженерия, 2006. – 608 с.
7. Voitenko V.S. / Applied geomechanics in drilling. - Oxford IBH Publishing Co. PVT Ltd. New delhi, Bombay, Calcutta, 1995.
8. Даныш Д.В. Расчет скорости сужения ствола скважины в пластичных породах / Д.В. Даныш, Е.Г. Леонов, Б.С. Филатов // Нефтяное хозяйство-№ 6. – С. 9-12.
9. Киреев А.М. Разработка и исследование технологий и технических средств управления горным давлением при строительстве скважин: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.15 - Тюмень, 2002. – 195 с.
10. Лехницкий С.Г. Определение напряжений в упругом изотропном массиве вблизи вертикальной цилиндрической выработки круглого сечения //Изв. АН СССР, ОПТ. - 1938. - № 7.

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

1. Vashkevich A.A. Razvitie podhodov kompleksnogo geomechanicheskogo modelirovaniya v PAO «Gazprom neft'» [Development of integrated geomechanical modeling approaches at PJSC Gazprom Neft] / A.A. Vashkevich, V.V. Zhukov, Ju.V. Ovcharenko, A.S. Bochkov // Oil Industry-№12, 2016, – P. 16-19. [in Russian]
2. M-I SWACO, gruppa «Shljumberzhe», Sistemy rastvorov i reagentov dlja burenija [M-I SWACO, Schlumberger Group, Drilling Fluid and Reagent Systems] // Drilling Solutions - Edition 6, 2014[in Russian]
3. Sharova O.Yu. Metodiki podbora kompleksnyh suhih smesey kol'matantov dlja preduprezhdenija i likvidacii zon oslozhnenij [Methods for the selection of complex dry mixtures of colmatants for the prevention and elimination of zones of complications] / O.Ju. Sharova, A.F. Galiev, A.V. Samyskin i dr.// Territory Neftegaz. No. 5. 2012. – P.34-37. [in Russian]
4. Zmeev Yu.V. Vybor ingibirujushhego burovogo rastvora v sisteme «burovyje rastvory» pri stroitel'stve skvazhin v OAO «Surgutneftegaz» [The choice of inhibitory drilling fluid in the system "drilling fluids" in the construction of wells in OJSC "Surgutneftegas"] // Drilling and oil - No. 1, 2011. [in Russian]
5. Kireev A.M. Razrabotka i issledovanie tehnologij i tehniceskikh sredstv upravlenija gornym davleniem pri stroitel'stve skvazhin [Development and research of technologies and technical tools for managing rock pressure during well construction]: Dis. ... cand. tech. Sciences: 25.00.15 - Tyumen, 2002. – 195 p. [in Russian]
6. Ovchinnikova V.P. Spravochnik burovogo mastera [Handbook of the drill master] / V.P. Ovchinnikova, S.I. Grachjova, A.A. Frolova.. M.: Infra-Engineering, 2006. – 608 p. [in Russian]

7. Voitenko V.S. / Applied geomechanics in drilling. - Oxford IBH Publishing Co. PVT Ltd. New delhi, Bombay, Calcutta, 1995.
8. Danish D.V. Calculation of the rate of narrowing of the wellbore in plastic rocks / D.V. Danysh, E.G. Leonov, B.S. Filatov // Oil industry-№ 6. – S. 9-12. [in Russian]
9. Karev V.I. Opredelenie deformatsionnyh i prochnostnyh svoystv gornyh porod primenitel'no k bazhenovskim otlozhenijam [Determination of the deformation and strength properties of rocks as applied to Bazhenov deposits] / V.I. Karev, Ju.F. Kovalenko, K.B. Ustinov // “Technologies of the Fuel and Energy Complex”, No. 3 (22), 2005, – P. 17-21. [in Russian]
10. Lekhnitsky S.G. Opredelenie naprjazhenij v uprugom izotropnom massive vblizi vertikal'noj cilindricheskoj vyrabotki kruglogo sechenija [Determination of stresses in an elastic isotropic array near a vertical cylindrical working of circular cross section] // Izv. USSR Academy of Sciences, OPT. - 1938. - №. 7. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.023>**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЮВЕНИЛЬНЫХ ГЕНОВ УСТОЙЧИВОСТИ К ВОЗБУДИТЕЛЮ БУРОЙ РЖАВЧИНЫ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ФАЗУ ПРОРОСТКОВ В УСЛОВИЯХ ЮГА РОССИИ**

Научная статья

Агапова В.Д.<sup>1</sup>, Ваганова О.Ф.<sup>2</sup>, Волкова Г.В.<sup>3</sup>\*<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7296-3565;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-2345-2643;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-3696-2610;<sup>1, 2, 3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений, Краснодар, Россия\* Корреспондирующий автор ([galvol.bpp\[at\]yandex.ru](mailto:galvol.bpp[at]yandex.ru))**Аннотация**

Озимая пшеница подвержена комплексу фитопатогенов, одним из которых является бурая ржавчина (возбудитель *Puccinia tritica* Erikss.). Целью исследования являлась оценка эффективности генов устойчивости *Lr* к северокавказской популяции возбудителя бурой ржавчины озимой пшеницы в фазу проростков в 2019 году. Было проанализировано 22 монопустульных изолята с использованием 43 близкородственных линий с известными генами устойчивости к возбудителю бурой ржавчины. Установлено, что *Lr*-гены: 9, 15, 19, 20, 24, 29, 38, 41, 42, 43+24, 47, 52(W) были эффективными в отношении северокавказской популяции бурой ржавчины пшеницы, что составляет 25,5 % от числа изученных. При этом только линия с геном *Lr9* была устойчива ко всем изученным изолятам гриба. Эффективные гены рекомендуются для включения в селекционные программы для защиты озимой пшеницы от бурой ржавчины в условиях юга России.

**Ключевые слова:** озимая пшеница, гены устойчивости, эффективность генов, бурая ржавчина, *Puccinia tritica*.

**THE EFFICIENCY OF JUVENILE GENES OF ORANGE LEAF RUST RESISTANCE OF WINTER WHEAT DURING THE GERMINAL PHASE IN THE CLIMATE OF THE RUSSIAN SOUTH**

Research article

Agapova V. D.<sup>1</sup>, Vaganova O. F.<sup>2</sup>, Volkova G. V.<sup>3</sup>\*<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7296-3565;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-2345-2643;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-3696-2610;<sup>1, 2, 3</sup> All-Russian Institute of Plant Protection, Krasnodar, Russia\* Corresponding author ([galvol.bpp\[at\]yandex.ru](mailto:galvol.bpp[at]yandex.ru))**Abstract**

Winter wheat is liable to a variety of phytopathogens including the orange leaf rust, which is triggered by *Puccinia tritica* Erikss. This research is purposed to evaluate the efficiency of resistance genes *Lr* to the North Caucasian population of orange leaf rust of the winter wheat during the germinal phase in 2019. Twenty-two single-pustule isolates were analysed through 43 close-isogenic stocks with the known genes of resistance to the orange leaf rust pathogens. It was established that *Lr*-genes 9, 15, 19, 20, 24, 29, 38, 41, 42, 43+24, 47, 52(W) were effective against the North Caucasian population of orange leaf rust, representing 25,5% of those studied. This being said, only the *Lr9*-stock demonstrated resistance to all of the studied fungus isolates. The effective genes are recommended for inclusion into breeding programs to protect winter wheat against the orange leaf rust in the climate of the Russian South.

**Keywords:** winter wheat, resistance genes, gene efficiency, orange leaf rust, *Puccinia tritica*.

На территории Краснодарского края озимая пшеница является одной из главных сельскохозяйственных культур, площадь её возделывания в 2019 год достигала 1 млн. 360 тыс. га. Озимая пшеница подвержена комплексу фитопатогенов, одним из которых является бурая ржавчина. Бурая, или листовая, ржавчина пшеницы вызывается облигатным грибом *Puccinia tritica* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici* Erikss. et Henn. Он образует на поверхности листа бурые пустулы, содержащие одноклеточные округлые уредоспоры [1, С. 22]. Споры мигрируют аэрогенным путем и за летний сезон патоген способен давать несколько урединиогенераций, это способствует быстрому распространению болезни на достаточно широкие площади, что наносит большой ущерб урожаю [2, С. 127]. Для сохранения экологии целесообразно использовать устойчивые сорта, тем самым снижая пестицидную нагрузку [3, С. 164].

Олигогены, обеспечивающие пшенице иммунитет к *P. tritica*, являются *Lr*-гены, они делятся на гены ювенильной и гены возрастной устойчивости. Ювенильные гены устойчивости проявляются в растениях на этапе первого листа и обеспечивают противодействие к одной или разным расам патогена на протяжении всего онтогенеза. Возрастные гены устойчивости «объявляются» уже в более поздних стадиях (появление флагового и предфлаговых листьев и др.) [4, С. 75]. В базе данных генетических ресурсов пшеницы KOMUGI (2017) известно 77 генов резистентности к бурой ржавчине [5]. Для результативной селекции на устойчивость к листовой ржавчине требуется знание об изменении вирулентности популяции гриба и эффективности *Lr*-генов по отношению к северокавказской популяции патогена.

На территории России многообразие популяционного состава гриба *P. tritica* влияет на проявлении различной эффективности одних и тех же генов устойчивости в отдельных регионах. Так, гены *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr38*, *Lr42*, *Lr47* на Юге России и Красноярском крае сохраняют свою высокую ювенильную эффективность на протяжении многих лет, однако в Ростовской области ген *Lr38* проявил среднюю устойчивость [6, С. 55], [7, С. 71], [8, С. 34]. В ЦЧР и Нижнем Поволжье вышеперечисленные гены также показывают высокую эффективность на стадии всходов [9, С. 74], [10, С.

40]. На Южном Урале только ген *Lr24* обеспечил надежную эффективность проросткам пшеницы [11, С. 526]. Мониторинг вирулентности фитопатогена помогает охарактеризовать динамику развития популяции, связанную с естественным отбором и другими механизмами изменчивости, что позволяет установить эффективные гены устойчивости и выявить их срок надежного действия для определенного региона [12, С. 142].

Цель нашего исследования – оценка эффективности генов устойчивости *Lr* к популяции возбудителя бурой ржавчины озимой пшеницы в фазу проростков в условиях Краснодарского края.

### Материалы и методы исследований

Эксперимент проводили на базе ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений», г. Краснодар в условиях теплицы. Инфекционным материалом служила сборная популяция *P. triticina*, собранная во время маршрутных обследований производственных и селекционных посевов озимой пшеницы на Юге России (Краснодарский и Ставропольский края, Ростовская область) в 2019 году. Пораженные бурой ржавчиной листья были отобраны на посевах пшеницы, урединиопустулы гриба прижизнены на восприимчивом сорте Мичиган Амбер, размножены и использованы для выделения монопустульных изолятов патогена по существующим методикам [13, С. 24].

Для оценки вирулентности изолятов гриба *P. triticina* использовали 43 близкородственных линий Thatcher с генами *Lr*: 1, 2a, 2b, 2c, 3, 3bg, 3ka, 9, 10, 11, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 36, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 50, B, 52(W), *Exch*, *KRIKR2*. Растения каждой линии выращивали в вазонах (50 мл) на гидропонике с применением питательного раствора Кнопа [14, С. 26]. На стадии одного листа проводили инокуляцию спорами монопустульного изолята, затем зараженные растения помещали во влажную камеру на 12 – 16 часов. После чего проростки пшеницы содержали при температуре +18+20° С, интенсивности освещения до 15 тыс. лк и влажности воздуха 60–70 %. На 10 – 14-й день фиксировали инфекционные типы по шкале Mains и Jackson [15, С.111]: 0 – отсутствие признаков заболевания; 0; – хлоротичные пятна; 1 – очень мелкие пустулы, окруженные некрозом; 2 – мелкие пустулы, окруженные некрозом; 3-4 – крупные пустулы со слабым хлорозом или без него. Растения с типами от 0 до 2 баллов характеризуются как устойчивые к бурой ржавчине, с типами 3, 4 балла как восприимчивые к болезни.

### Результаты исследований и обсуждение

Было проанализировано 22 монопустульных изолята *P. triticina*. Результаты оценки эффективности генов устойчивости к популяции 2019 года возбудителя бурой ржавчины озимой пшеницы в фазу всходов представлены в таблице 1.

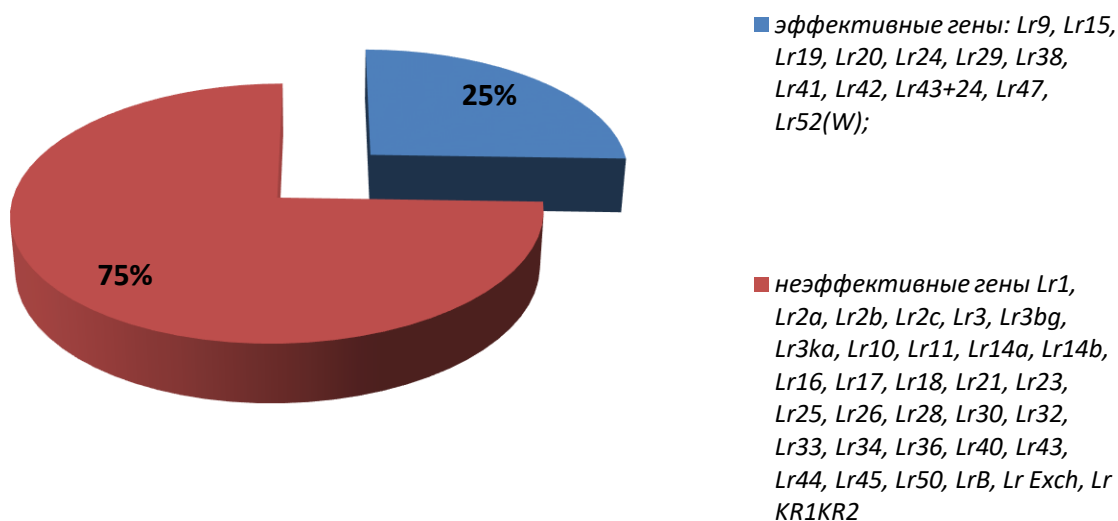


Рис. 1 – Диаграмма, иллюстрирующая соотношение генов по категории устойчивости к бурой ржавчине озимой пшеницы в фазу всходов (теплица ВНИИБЗР, 2019 г.)

Согласно проведенной оценке, гены устойчивости *Lr* классифицированы следующим образом:

- эффективные гены *Lr* (тип реакции на заражение 0-2 балла): 9, 15, 19, 20, 24, 29, 38, 41, 42, 43+24, 47, 52(W);
- неэффективные гены *Lr* (тип реакции на заражение 3-4 балла): 1, 2a, 2b, 2c, 3, 3bg, 3ka, 10, 11, 14a, 14b, 16, 17, 18, 21, 23, 25, 26, 28, 30, 32, 33, 34, 36, 40, 43, 44, 45, 50, B, *Exch*, *KRIKR2*.

Выявлено, что 25,5 % генов от числа изученных оказались эффективными, среди них только линия с геном *Lr9* проявила абсолютную устойчивость к патогену.

*Puccinia triticina* – высокопластичный грибок, способный к образованию новых рас за короткий период. Взаимоотношения между пшеницей (растение-хозяин) и бурой ржавчиной подчиняются теории Флора [16, С. 281]. Поэтому модификации в генах вирулентности патогена приводят к изменению реакции комплементарных генов устойчивости растения-хозяина. Так, на протяжении пяти лет (2011-2015 гг.) на территории юга России *Lr*-гены: 9, 24, 29, 41, 42, 43+24, 47, 50 проявляли абсолютную устойчивость [17], но в 2019 году ген *Lr50* утратил свою эффективность.

На основе литературных данных, можно проследить эффективность генов *Lr15*, *Lr20*. С 2000 по 2009 годы оба гена были неэффективными, в 2016 году ген *Lr15* проявил эффективность и продолжает сохранять ее и в настоящее время. Ген *Lr20* только в 2019 году проявил свою эффективность [18, С. 32]. Возможно, это связано с тем, что ранее на



территории Северо-Кавказского региона были широко районированы сорта, содержащие гены устойчивости *Lr15* и *Lr20*, что повлекло накопление вирулентных к ним изолятов *P. tritici*. В результате сортоисменности могло произойти уменьшение посевных площадей сортов пшеницы, содержащих данные гены, и, как следствие, снижение частоты вирулентных к ним изолятов.

На протяжении 10 лет (2000-2009 гг.) гены *Lr41* и *Lr45* являлись эффективными, но через 5 лет частота изолятов с генами вирулентности *pp41*, *45* превысила 25 %, что делало их неэффективными. Ген *Lr45* не изменил своей эффективности, а в 2019 году ген *Lr41* был оценен как эффективный [19, С. 53].

В 2016 году впервые были обнаружены изоляты, вирулентные к линии с геном *Lr9*, а в 2006 году к линии с геном *Lr24*. Также в 2017-2018 годах были выявлены изоляты с геном вирулентности *pp24* [20, С. 25], [21, С. 630]. Процент вирулентных клонов гриба к линии с геном *Lr19* увеличивается с каждым годом, что в будущем повлияет на эффективность данного гена устойчивости [17]. Это может быть связано с увеличением посевных площадей сортов озимой пшеницы, защищенных данным геном [22, С. 375].

Необходимой процедурой, предшествующей успешной селекции пшеницы на иммунитет, является оценка эффективности известных генов устойчивости пшеницы к бурой ржавчине. Это позволяет вовремя отслеживать потерю эффективности генов и устойчивости сортов, происходящую вследствие непрерывного образования новых вирулентных рас патогена.

### Заключение

В результате проведенной оценки эффективности генов устойчивости к популяции возбудителя бурой ржавчины в фазу проростков в 2019 году выявлены эффективные *Lr*-гены: 9, 15, 19, 20, 24, 29, 38, 41, 42, 43+24, 47, 52(W), что составляет 25,5 % от числа изученных. При этом гены *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr38*, *Lr42*, *Lr47* сохраняют свою высокую эффективность к патогену на Северном Кавказе в течение многих лет [6, С. 55]. Они рекомендуются для включения в селекционные программы для защиты озимой пшеницы от бурой ржавчины в условиях юга России.

### Финансирование

Исследования выполнены согласно Государственному заданию № 075-00376-19-00 Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № 0686-2019-0008.

### Funding

The research was carried out in accordance with the State task № 075-00376-19-00 of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation in the framework of research work on the topic № 0686-2019-0008

### Конфликт интересов

Отсутствует

### Conflict of Interest

Absent

### Список литературы / References

1. Койшыбаев М. Болезни пшеницы. Анкара: Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) // монография, 2018. – 365 с.
2. Кудинова О.А. Распространение бурой ржавчины в различных агроклиматических зонах Северо-Кавказского региона в 2016-2018 гг. / О.А. Кудинова, О.Ф. Ваганова, Г.В. Волкова // В сборнике: Защита растений от вредных организмов Материалы IX международной научно-практической конференции – Краснодар, 2019. – С. 127-129.
3. Гвоздева М.С. Об актуальности биологической защиты озимой пшеницы от возбудителей болезней в Краснодарском крае / М.С. Гвоздева, Г.В. Волкова // В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса Сборник статей по материалам IX Всероссийской конференции молодых ученых – Краснодар, 2016. – С. 193-195.
4. Тырышкин Л.Г. Подразделение *Lr*-генов устойчивости пшеницы *Triticum aestivum* L. к листовой ржавчине (*Puccinia tritici* Eriks.) на ювенильные и возрастные: реальность или условность / Л.Г. Тырышкин, В.Г. Захаров, В.В. Сюков // Сельскохозяйственная биология, 2013. – Т. 48. – № 1. – С. 74-77.
5. McIntosh R.A. Catalogue of gene symbols for wheat: 2017 supplement. / McIntosh R.A., Dubcovsky J., Rogers W.J., Morris C., Xia X.C URL: <https://shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/macgene/supplement2017.pdf>. (accessed: 08.05.2020.)
6. Волкова Г.В. Скрининг *Lr*-генов пшеницы на устойчивость к *Puccinia tritici* в условиях Северо-Кавказского региона / Г. В. Волкова, О.А. Кудинова, О.Ф. Ваганова // Вестник российской сельскохозяйственной науки, 2019. – № 5. – С. 54-56.
7. Шишкин Н.В. Эффективность генов устойчивости пшеницы к бурой ржавчине в условиях Ростовской области / Н.В. Шишкин, Т.Г. Дерова, Е.И. Гуляева, Е.Л. Шайдаюк // Зерновое хозяйство России, 2019. – № 2 (62). – С. 69-73.
8. Мешкова Л.В. Физиологическая специализация возбудителя бурой ржавчины пшеницы в Красноярском крае / Л.В. Мешкова, Л.П. Россеева, А.В. Сидоров, О.Б. Сабаева, Т.С. Зверовская, И.А. Белан // Вестник КрасГАУ, 2019. – № 1 (142). – С. 29-36.
9. Зеленева Ю.В. Структура популяции *Puccinia tritici* Erikss. в Центральном Черноземье / Ю.В. Зеленева, В.П. Судникова, И.В. Гусев // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета, 2019. – № 3 (58). – С. 70-76.
10. Гуляева Е.И. Расширение генетического разнообразия сортов яровой мягкой пшеницы по устойчивости к бурой ржавчине (*Puccinia tritici* Eriks.) В Нижнем Поволжье / Е.И. Гуляева, С.Н. Сибикеев, А.Е. Дружин, Е.Л. Шайдаюк // Сельскохозяйственная биология, 2020. – Т. 55. – № 1. – С. 27-44.
11. Тюнин В.А. Характеристика вирулентности популяций и перспективы использования генов *Lr24*, *Lr25*, *LrSp* в селекции яровой мягкой пшеницы на Южном Урале / В.А. Тюнин, Е.Р. Шрейдер, Е.И. Гуляева, Е.Л. Шайдаюк // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 523-529.

12. Гуляева Е. И. Популяционно-генетическое исследование возбудителя бурой ржавчины пшеницы *Puccinia tritica* в Дагестане / Е.И. Гуляева, Е.Л. Шайдаюк, К. М. Абдуллаев // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 2018. – Т. 179. – № 2. – С. 140-150.
13. Волкова Г.В. Вирулентность популяций возбудителей ржавчины зерновых колосовых культур (учебное пособие) / Г.В. Волкова, О.А. Кудинова, Е. В. Гладкова, О.Ф. Ваганова, А.В. Данилова, И.П. Матвеева – Краснодар, 2018. – 38 с.
14. Смирнова Л.А. Усовершенствованный метод выращивания всходов зерновых культур для иммунологических исследований / Л.А. Смирнова, Т.П. Алексеева // Селекция и семеноводство. – 1988. – №4. – С. 25-27.
15. Mains E. B. Physiologic specialization in the leaf rust of wheat: *Puccinia tritica* Erikss / Mains E. B., Jackson H. C. // Phytopathology. – 1926. – V. 16(1). – P. 89-120.
16. Flor H.H. Current status of the gene-for-gene concept // Annu. Rev Phytopathol., 1971. – Vol. 9. – P. 275-296.
17. Volkova G.V. Virulence of *Puccinia tritica* in the North Caucasus region of Russia / Volkova G.V., Vaganova O. F., Kudina O. A. // Spanish Journal of Agricultural Research, [S.I.], – v. 18, n. 1, – p. e10SC01, mar. 2020. ISSN 2171-9292. Date accessed: 30 mar. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2020181-14749>
18. Волкова Г.В. Характеристика популяции возбудителя бурой ржавчины пшеницы по вирулентности в пяти агроклиматических зонах Северного Кавказа / Г.В. Волкова, Л.К. Анпилогова, П.А. Полушин, О.Ф. Ваганова, Ю.В. Авдеева // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук, 2011. – № 4. – С. 31-33.
19. Ваганова О.Ф. Анализ вирулентности северокавказской популяции *Puccinia tritica* Erikss. в 2016 году // Сборник тезисов по материалам II научно-практической конференции молодых ученых Всероссийского форума по селекции и семеноводству – Краснодар, 2018. – С. 52-53.
20. Волкова Г.В. Разнообразие фенотипов вирулентности популяции *Puccinia tritica* в различных агроклиматических зонах Северного Кавказа / Г.В. Волкова, О.А. Кудинова, О.Ф. Ваганова // Российская сельскохозяйственная наука, 2019. – № 6. – С. 23-26.
21. Volkova G.V. Postulation of leaf rust resistance genes in cultivars of soft winter wheat / Volkova G.V., Vaganova O.F. // Journal of International Scientific Publications: Agriculture & Food, 2016. – Т. 4. – P. 627-632.
22. Тырышкин Л.Г. Сравнительная характеристика вирулентности *Puccinia recondita* rob. Ex desm. Syn.: *Puccinia tritica* Erikss. в среднем Поволжье / Л.Г. Тырышкин, В.Г. Захаров, В.В. Сюков // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2014. – Т. 18. – № 2. – С. 373-377.

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

1. Kojshybaev M. Bolezni pshenicy [Wheat disease]. Ankara: Prodovol'stvennaya i sel'skohozyajstvennaya organizaciya OON (FAO) // monografiya [monograph], 2018. – 365 p. [in Russian]
2. Kudina O.A. Rasprostranenie buroj rzhavchiny v razlichnyh agroklimatechskih zonah Severo-Kavkazskogo regiona v 2016-2018 gg. [Distribution of brown rust in various agroclimatic zones of the North Caucasus region in 2016-2018.] / O.A. Kudina, O.F. Vaganova, G.V. Volkova // V sbornike: Zashchita rastenij ot vrednyh organizmov Materialy IX mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [In the collection: Plant Protection from Pests Materials of the IX International Scientific and Practical Conference] – Krasnodar, 2019. – P. 127-129. [in Russian]
3. Gvozdeva M.S. Ob aktual'nosti biologicheskoy zashchity ozimoy pshenicy ot vozbuditelej boleznej v Krasnodarskom krae [On the relevance of the biological protection of winter wheat from pathogens in the Krasnodar Territory] / M.S. Gvozdeva, G.V. Volkova // V sbornike: Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa Sbornik statej po materialam IX Vserossijskoj konferencii molodyh uchenyh [In the collection: Scientific support for the agro-industrial complex Collection of articles on the materials of the IX All-Russian Conference of Young Scientists] – Krasnodar, 2016. – P. 193-195. [in Russian]
4. Tyryshkin L.G. Podrazdelenie Lr-genov ustojchivosti pshenicy Triticum aestivum L. k listovoj rzhavchine (Puccinia tritica Eriks.) na yuvenil'nye i vozrastnye: real'nost' ili uslovnost' [The division of Lr genes of resistance of wheat Triticum aestivum L. to leaf rust (Puccinia tritica Eriks.) On juvenile and age: reality or convention] / L.G. Tyryshkin, V.G. Zaharov, V.V. Syukov // Sel'skohozyajstvennaya biologiya [Agricultural biology], 2013. – V. 48. – № 1. – P. 74-77. [in Russian]
5. McIntosh R.A. Catalogue of gene symbols for wheat: 2017 supplement / McIntosh R.A., Dubcovsky J., Rogers W.J., Morris C., Xia X.C.. URL: <https://shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/macgene/supplement2017.pdf>. (accessed: 08.05.2020.)
6. Volkova G.V. Skringing Lr-genov pshenicy na ustojchivost' k Puccinia tritica v usloviyah Severo-Kavkazskogo regiona [Screening of wheat Lr genes for resistance to Puccinia tritica in the North Caucasus region] / G. V. Volkova, O.A. Kudina, O.F. Vaganova // Vestnik rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki [Bulletin of the Russian agricultural science], 2019. – № 5. – P. 54-56. [in Russian]
7. Shishkin N.V. Effektivnost' genov ustojchivosti pshenicy k buroj rzhavchine v usloviyah Rostovskoj oblasti [The effectiveness of the genes of wheat resistance to brown rust in the conditions of the Rostov region] / N.V. Shishkin, T.G. Derova, E.I. Gul'tyaeva, E.L. SHajdayuk // Zernovoe hozyajstvo Rossii [Grain Farm in Russia], 2019. № 2 (62). P. 69-73. [in Russian]
8. Meshkova L.V. Fiziologicheskaya specializaciya vozbuditelya buroj rzhavchiny pshenicy v Krasnoyarskom krae [Physiological specialization of the pathogen of brown rust of wheat in the Krasnoyarsk Territory] / L.V. Meshkova, L.P. Rosseeva, A.V. Sidorov, O.B. Sabaeva, T.S. Zverovskaya, I.A. Belan // Vestnik KrasGAU [Bulletin of KrasGAU], 2019. № 1 (142). P. 29-36. [in Russian]
9. Zeleneva YU.V. Struktura populyacii Puccinia tritica Erikss. v Central'nom Chernozem'e [Population structure of Puccinia tritica Erikss. in the Central Black Earth Region] / YU.V. Zeleneva, V.P. Sudnikova, I.V. Gusev // Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Michurinsk State Agrarian University], 2019. – № 3 (58). – P. 70-76. [in Russian]
10. Gul'tyaeva E.I. Rasshirenie geneticheskogo raznoobraziya sortov yarovoj myagkoj pshenicy po ustojchivosti k buroj rzhavchine (Puccinia tritica Eriks.) V Nizhnem Povolzh'e [Works on applied botany, genetics and villages Expansion of the genetic diversity of spring soft wheat varieties in brown rust resistance (Puccinia tritica Eriks.) In the Lower Volga Region] /

- E.I. Gul'tyaeva, S.N. Sibikeev, A.E. Druzhin, E.L. SHajdayuk // *Sel'skohozyajstvennaya biologiya* [Agricultural biology], 2020. – V. 55. – № 1. – P. 27-44. [in Russian]
11. Tyunin V.A. Harakteristika virulentnosti populyacij *Puccinia triticina* i perspektivy ispol'zovaniya genov Lr24, Lr25, LrSp v selekcii yarovoj myagkoj pshenicy na Yuzhnom Urale [Characterization of the virulence of *Puccinia triticina* populations and prospects of using the Lr24, Lr25, LrSp genes in spring soft wheat breeding in the Southern Urals] / V.A. Tyunin, E.R. SHrejder, E.I. Gul'tyaeva, E.L. SHajdayuk // *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii* [Vavilov Journal of Genetics and Breeding], 2017. – V. 21. – № 5. – P. 523-529. [in Russian]
12. Gul'tyaeva E. I. Populyacionno-geneticheskoe issledovanie vozbuditelya buroj rzhavchiny pshenicy *Puccinia triticina* v Dagestane [Population-genetic study of the causative agent of brown rust of wheat *Puccinia triticina* in Dagestan] / E.I. Gul'tyaeva, E.L. SHajdayuk, K. M. Abdullaev // *Trudy po prikladnoj botanike, genetike i selekcii* [Works on applied botany, genetics and selection], 2018. – V. 179. – № 2. – P. 140-150. [in Russian]
13. Volkova G.V. Virulentnost' populyacij vozbuditel' rzhavchiny zernovykh kolosovykh kul'tur (uchebnoe posobie) [Virulence of populations of rust pathogens of cereal crops (study guide)] / G.V. Volkova, O.A. Kudinova, E.V. Gladkova, O.F. Vaganova, A.V. Danilova, I.P. Matveeva – Krasnodar, 2018. – 38 p. [in Russian]
14. Smirnova L.A. Uovershenstvovannyj metod vyrashchivaniya vskhodov zernovykh kul'tur dlya immunologicheskikh issledovanij [An improved method for growing seedlings of crops for immunological studies] / L.A. Smirnova, T.P. Alekseeva // *Selekcija i semenovodstvo* [Breeding and seed production]. – 1988. – №4. – P. 25-27. [in Russian]
15. Mains E. B. Physiologic specialization in the leaf rust of wheat: *Puccinia triticina* Erikss / Mains E. B., Jackson H. C. // *Phytopathology*. – 1926. – V. 16(1). – P. 89-120.
16. Flor H.H. Current status of the gene-for-gene concept // *Annu. Rev. Phytopathol.*, 1971. Vol. 9. P. 275-296.
17. Volkova G.V. Virulence of *Puccinia triticina* in the North Caucasus region of Russia / Volkova G.V.; Vaganova, O. F.; Kudinova, O. A. // *Spanish Journal of Agricultural Research*, [S.I.], v. 18, n. 1, p. e10SC01, mar. 2020. ISSN 2171-9292. (accessed: 30 mar. 2020). doi: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2020181-14749>
18. Volkova G.V. Harakteristika populyacii vozbuditelya buroj rzhavchiny pshenicy po virulentnosti v pyati agroklimaticheskikh zonah Severnogo Kavkaza [The virulence of the brown rust rust pathogen population in five agroclimatic zones of the North Caucasus] / G.V. Volkova, L.K. Anpilogova, P.A. Polushin, O.F. Vaganova, YU.V. Avdeeva // *Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennykh nauk* [Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences], 2011. – № 4. – P. 31-33. [in Russian]
19. Vaganova O.F. Analiz virulentnosti severokavkazskoj populyacii *Puccinia triticina* Erikss. v 2016 godu [Analysis of the virulence of the North Caucasian population of *Puccinia triticina* Erikss. in 2016] // *Sbornik tezisov po materialam II nauchno-prakticheskoi konferencii molodykh uchenykh Vserossijskogo foruma po selekcii i semenovodstvu* [Collection of abstracts on the materials of the II scientific-practical conference of young scientists of the All-Russian Forum on Breeding and Seed Production] – Krasnodar, 2018. – P. 52-53. [in Russian]
20. Volkova G.V. Raznoobrazie fenotipov virulentnosti populyacii *Puccinia triticina* v razlichnykh agroklimaticheskikh zonah Severnogo Kavkaza [Variety of virulence phenotypes of the *Puccinia triticina* population in various agroclimatic zones of the North Caucasus] / G.V. Volkova, O.A. Kudinova, O.F. Vaganova // *Rossijskaya sel'skohozyajstvennaya nauka* [Russian agricultural science], 2019. – № 6. – P. 23-26. [in Russian]
21. Volkova G.V., Vaganova O.F. Postulation of leaf rust resistance genes in cultivars of soft winter wheat // *Journal of International Scientific Publications: Agriculture & Food*, 2016. – V. 4. – P. 627-632.
22. Tyryshkin L.G. Sravnitel'naya harakteristika virulentnosti *Puccinia recondita* rob. Ex desm. Syn.: *Puccinia triticina* Erikss. v srednem Povolzh'e [Comparative characteristics of virulence of *Puccinia recondita* rob. Ex desm. Syn. : *Puccinia triticina* Erikss. average Volga] / L.G. Tyryshkin, V.G. Zaharov, V.V. Syukov // *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii* [Vavilov Journal of Genetics and Breeding], 2014. – V. 18. – № 2. – P. 373-377. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.024>

## ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ИНТРОДУКЦИИ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР НА ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Обзорная статья

Ивлева О.Е.<sup>1</sup>, Берсенева С.А.<sup>2</sup> \*

<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-8685-3634;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9109-8063,

<sup>1, 2</sup> ФГБОУ ВО Приморская ГСХА, г. Уссурийск, Россия

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

### Аннотация

Научными исследованиями и практической составляющей доказано, что создание кормовой базы на территории Приморского края, возможно через повышение продуктивности естественных кормовых угодий, создания культурного пастбищного хозяйства и процесса интродукции кормовых культур из природного флористического состава.

Интродукция кормовых растений природного флористического разнообразия Приморского края в кормопроизводстве позволяет расширить ассортимент лугопастбищных трав и повысить продуктивность естественных кормовых угодий.

В статье представлен исторический обзор проблемы кормопроизводства в области интродукции кормовых растений в целях повышения продуктивности деградированных пахотных земель территории Приморского края.

**Ключевые слова:** кормовые угодья, кормовые травы, агрофитоценозы, интродукция, многолетние бобовые травы, кормопроизводство.

## HISTORICAL ASPECT OF FOOD CROPS INTRODUCTION IN PRIMORSKY KRAI

Review article

Ivleva O.E.<sup>1</sup>, Berseneva S.A.<sup>2</sup> \*

<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-8685-3634;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9109-8063,

<sup>1, 2</sup> Primorskaya State Academy of Agriculture, Ussuriysk, Russia

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

### Abstract

Scientific research and the practical component prove that the development of forage reserves in Primorsky Krai is possible by increasing the productivity of natural fodder lands, creating cultural pastures, and by the process of introducing forage crops from the natural floristic composition.

The introduction of fodder plants of the natural floristic diversity of the Primorsky Krai in fodder production allows us to expand the range of grassland territories and increase the productivity of natural forage lands.

The paper presents a historical overview of the problem of fodder production in the field of introduction of fodder plants to increase the productivity of degraded arable land in the Primorsky Krai.

**Keywords:** fodder land, forage grasses, agrophytocenoses, introduction, perennial leguminous grasses, forage production.

Почвенно-экологические факторы, муссонный климат, слабо плодородные почвы Приморского края влекут за собой низкий уровень земледельческой освоенности территории. На 01.01.2019 года, согласно статистических данных, 512 тысяч гектар площадей отведены под сельскохозяйственные угодья [19].

В Приморском крае естественные кормовые угодья характеризуются низкой продуктивностью, причиной которой является обеднение ботанического состава травостоя, исчезновение ценных в кормовом отношении видов из-за неустойчивости их абиотическим факторам среды [9].

В свете нового подхода в теории и практике землепользования, сущность которого заключается в создании устойчивых высокопродуктивных агроценозов, обладающих способностью к саморегуляции, актуальной является биогеографическая оценка структуры, функционирования, устойчивости и продуктивности агроландшафта [12].

Анализ литературы по вопросам создания кормовой базы любого региона, в т.ч. и Приморского края, позволяет сделать заключение, что решить такую проблему возможно за счет повышения продуктивности естественных кормовых угодий, создания культурного пастбищного хозяйства, восстановления семеноводства многолетних и лугопастбищных трав и осуществления процессов интродукции кормовых культур.

Расширение ассортимента кормовых культур путем интродукции и введения в культуру видов растений природной флоры с кормовой ценностью, имеет важное значение в развитии кормопроизводства [18], [24].

В сельскохозяйственном производстве, из 300 тысяч видов растений мировой флоры, используется только десятая их часть; 80% возделываемых земель занято 250 видами растений, обеспечивающих основную массу продукции растительного происхождения [23].

В 70-х годах прошлого столетия, по данным П.П. Вавилова [6], в России на кормовые цели широко возделывалось не более 25 видов. Полезные растения природной флоры неодинаковы с точки зрения возможностей введения их в культуру. Анализ интродукционной работы показывает, что число возделываемых видов можно увеличить за счет дикой растительности до 280-300, а экономически наиболее важных - до 120-140 видов.

Несмотря на богатство природной флоры, в полеводстве, до сих пор отсутствуют продуктивные и приспособленные к местным условиям кормовые растения. Ограниченный набор культур обуславливает неустойчивость кормопроизводства и затрудняет обеспеченность скота полноценным кормом.

В кормлении скота даже в пастбищный период не всегда удается ликвидировать сезонность - временный недостаток в зеленом корме. Дефицит кормов, чаще всего, приходится на раннюю весну и позднюю осень, когда на полях нет вегетирующих растений. В связи с этим, актуальны поиски в дикой флоре хорошо поедаемых видов растений, отличающихся ранним отрастанием и холодостойкостью [9].

По данным И.В. Ларина [14] на природных сенокосах и пастбищах произрастает около 11 тысяч видов растений, или более половины всего состава флоры. Из 5 тысяч изученных видов флоры нашей страны, 56% видов хорошо поедается скотом, но лишь 3 % от числа поедаемых, в той или иной степени, используется в посевах. Более 400 видов еще заслуживают испытания и оценки в культуре.

Анализ литературы по вопросам интродукции позволил установить, что число широко возделываемых кормовых растений можно увеличить более чем в 2 раза [5].

В укреплении кормовой базы животноводства могут сыграть виды растений, которые в местах естественного произрастания давно используются на кормовые цели, но до сих пор не получили распространения, поскольку не были введены в культуру [24].

Поиск видов культурных растений с высоким содержанием протеина ведется, в первую очередь, среди представителей семейства бобовых. В работу вовлекаются как виды, встречающиеся в природной флоре, так и виды культурных растений, возделываемых в других географических районах [6].

Флора Приморского края, характеризующаяся своим видовым разнообразием (более 4000 видов), представляет большой интерес с точки зрения кормопроизводства, так как включает более 70 видов, в т.ч. представителей семейства бобовые [21].

Издавна внимание исследователей флоры привлекают дикорастущие бобовые с высокими кормовыми свойствами: виды родов *Vicia L.*, *Lathyrus L.*, *Lespedeza Michx.*, произрастающие в Приморском крае.

В 30-х годах двадцатого столетия Ю.В. Бранке установил химический состав кормовых растений Дальневосточной флоры [3]. Полученные им данные вошли в издание под редакцией И.В. Ларина «Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР» [14].

Начало 40-х годов прошлого столетия ознаменовано проведением исследований дикорастущих видов в культуре на базе Горнотажной станции Д.П. Воробьевым, И.Ф. Беликовым и Б.П. Колесниковым, которые занимались определением содержания каротина в кормовых растениях Приморского края [4], [8].

Комплексным изучением кормовых свойств дикорастущих растений на сенокосах и пастбищах Приморского края в начале 60-х годов прошлого столетия занимался П.Д. Ярошенко, а в 1970-х годах В.П. Кузина проводила исследования по определению кормового значения дикорастущих бобовых на указанной территории [25], [26], [13].

В 1980-х годах Н.И. Бакуменко на территории Приморского края исследовала дикорастущие виды рода *Vicia sp.* и выделила наиболее перспективные для кормопроизводства: вику однолетнюю (*V. sativa L.*), вику узколистую (*V. angustifolia L.*), вику японскую (*V. japonica A. Gray*) и вику заборную (*V. sepium L.*), в сухом веществе которых содержится: 24-25% сырого протеина, в 100 кг кормовой массы которых около 17-28 кормовых единиц, а также большое количество витамина С и кальция. Все вышеуказанные виды чрезвычайно зимостойки, хорошо поедаются всеми видами животных и пригодны для заготовки сена [1].

Определив химический состав более 50 видов дикорастущих кормовых бобовых растений Российского Дальнего Востока (для 22 видов сведения были получены впервые), Н.С. Павлова выделила 20 видов, наиболее перспективных для практики кормопроизводства [16], [17].

С 1984 года в крае проводят исследования интродуцированной культуры для Приморья - козлятника восточного, завезенного из европейских регионов России. Для кормопроизводства эта культура представляет большой интерес. По содержанию протеина и витаминов козлятник восточный на 10-15% превосходит люцерну и клевер, зеленая масса и сено хорошо поедаются всеми видами сельскохозяйственных животных. В 100 кг. сена, заготовленном в фазу цветения, содержится 71,2 кормовые единицы и 11,01 кг. перевариваемого протеина. Несмотря на низкое содержание сахара (5-6%) козлятник восточный хорошо силосуется, в 100 кг силоса содержится 20-28 кормовых единиц. Однако, основной проблемой, препятствующей внедрению козлятника в кормопроизводство края, является отсутствие промышленного семеноводства [7], [10], [15].

Среди однолетних бобовых культур, возделываемых для кормовых целей в Приморском крае, одно из значимых мест принадлежит вике.

С 2002 года на базе Приморского НИИСХ впервые на Дальнем Востоке детально изучена коллекция вики яровой (*Vicia sativa Breeding.*). Создан исходный материал для получения сортов с высокой продуктивностью, устойчивостью к абиотическим факторам среды в условиях муссонного климата Приморья.

На сегодняшний день, работы по селекции вики яровой (*Vicia sativa Breeding*) продолжаются [22].

Особую актуальность в условиях Приморского края сегодня приобретает задача по созданию пастбищных сортов кормовых растений, интродуцированных из природной флоры, что, в свою очередь, позволит повысить урожайность и рациональность использования кормовых угодий.

В период с 2004 по 2008 годы на базе федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Приморская государственная сельскохозяйственная академия» (далее – ФГБОУ ВО Приморская ГСХА или Академия), для решения белковой проблемы в кормопроизводстве юга Дальнего Востока проводили агротехническую адаптацию представителя местной дикорастущей флоры чины Давида (*Lathyrus Davidii Hance*) [2], [11].

Надземная часть растений чины Давида в фазу цветения содержит (в %): сырого протеина – 11,6-16,56, клетчатки – 25,8-33,1, жира около 1,7 и каротина – 4,16-...8,3 мг/кг [2]. Результаты испытаний показали, что чина Давида хорошо культивируется и отрастает после укусов [11].

В результате совместной работы Приморским НИИСХ и Дальневосточной опытной станцией ВИР методом массового отбора из дикорастущих образцов донника белого выведен сорт Диомид. С 1990 года районирован в

Приморском крае [9]. Изучены биологические особенности и элементы технологии возделывания этой ценной кормовой и медоносной культуры [20].

На сегодняшний день в полеводстве края преобладают виды рода люцерны и донник.

Вопрос перспективных в кормопроизводстве дикорастущих видов флоры Приморского края остается открытым и требующим дополнительных исследований, с целью создания агрофитоценозов со стабильной продуктивностью растений и устойчивой их адаптивностью к конкретным условиям, в т.ч. муссонного климата изучаемого региона.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Бакуменко Н.И. Дикорастущие вики Приморья и их кормовое значение / Н.И. Бакуменко // Актуальные проблемы кормопроизводства в Приморском крае. – Уссурийск: ПСХИ, 1984. – С. 38-43.
2. Бочкарев В.В. Некоторые приемы выращивания чины Давида в культуре / В.В. Бочкарев // Аграрная политика и технология производства сельскохозяйственной продукции в странах Азиатско-Тихоокеанского региона: Матер. Междунар. научно-практ. Конференции. – Уссурийск: ПГСХА, 2002. – Т.2. – С. 53-57.
3. Бранке Ю.В. О химизме кормовых растений Дальневосточной флоры / Ю.В. Бранке // Вестник Дальневосточного фил. АН СССР, 1935. – Вып. 12. – С. 3-38.
4. Беликов И.Ф. Содержание каротина в кормовых растениях Приморского края / И.Ф. Беликов, Б.П. Колесников // Сб. науч. тр. с.-х. опытн. исслед. Учреждений Приморского края, в. 1, 1948. – С. 10-12.
5. Вавилов П.П. Новые кормовые культуры / П.П. Вавилов, А.А. Кондратьев. – М.: Россельхозиздат, 1975. – 351 с.
6. Вавилов П.П. Результаты исследований по возделыванию новых кормовых культур / П.П. Вавилов // Кормопроизводство сб. науч. раб. В. 17. – М.: НИИК им. В.Р. Вильямса, 1977. – С. 124-133.
7. Волошина Т.А. О возделывании козлятника восточного в условиях Приморского края / Т.А. Волошина, А.К. Чайка. – Уссурийск, 1985. – 48с.
8. Воробьев Д.П. Кормовые травы и их культура в горно-таежных районах Приморья / Д.П. Воробьев // Тр. Горно-таежной станции Дальневосточный филиал АН СССР. Владивосток: ДВФ Сиб. отд. АН СССР, 1946. – Т. 5. – С. 170-200.
9. Емельянов А.Н. Новые кормовые культуры и их семеноводство в Приморском крае / А.Н. Емельянов // Сборник научных трудов. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – С. 25-31.
10. Емельянов А.Н. О семеноводстве козлятника восточного в Приморском крае / А.Н. Емельянов, Т.А. Волошина // Кормопроизводство. – 2013. – № 7. – С. 22-23.
11. Кардай О.Е. Изучение технологии возделывания *Lathyrus Davidii* на кормовые цели в Приморском крае / О.Е. Кардай, В.В. Бочкарев // Молодые ученые - агропромышленному комплексу Дальнего Востока Материалы межвузовской научно-практической конференции аспирантов, молодых ученых и специалистов. – 2008. – С. 52-55.
12. Кирюшин В.И. Экологические основы земледелия / В.И. Кирюшин. – М.: Колос, 1996. – 367 с.
13. Кузина В.П. Дикорастущие бобовые Приморья и их кормовое значение / В.П. Кузина // Флора и растительность Дальнего Востока. – Владивосток, 1970. – №1. – С. 15-17.
14. Ларин И.В. Семейство бобовые // Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР. Т 2. – М.-Л.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, 1951. – С. 518-888.
15. Лютый А.В. Агротехнические приемы повышения урожайности семян козлятника восточного в условиях Приморского края : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.09 / Лютый Алексей Вячеславович. – Уссурийск, 2003. – 111 с.
16. Павлова Н.С. Итоги изучения дикорастущих кормовых бобовых Советского Дальнего Востока / Н.С. Павлова // Итоги и перспективы использования мировой коллекции ВИР в развитии сельскохозяйственного производства Дальнего Востока и Сибири. Тез. докл. – Владивосток, 1987. – С. 27 – 28.
17. Павлова Н.С. К изучению химического состава дикорастущих кормовых бобовых Российского Дальнего Востока / Н.С. Павлова // Биологические исследования на Горнотажной станции. – Владивосток, 2001. – № 7. – С. 78-97.
18. Полякова А.И. Дикорастущие кормовые растения Алтайского края как исходный материал для селекции / А.И. Полякова // Научн.-техн. бюл. – Новосибирск: Сиб. отдел. ВАСХНИЛ, 1978. – В. 5,6. – С. 29-39.
19. Приморье в цифрах: Краткий статистический сборник / Приморскстат, 2020. – 66 с.
20. Скалозуб О.М. Возделывание донника белого, как культуры многопланового использования: рекомендации / О.М. Скалозуб, А.Н. Емельянов. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 27 с.
21. Сосудистые растения советского Дальнего Востока. (Отв. ред. С.С. Харкевич). Л.: Наука, 1985. Т. 1, 398 е.; 1987. Т. 2, 446 е.; 1988. Т. 3, 421 е.; 1989. Т. 4, 380 е.; 1991. Т. 5, 390 е.; СПб.: Наука, 1992. Т. 6, 428 е.; 1995. Т. 7, 395 е.; 1996. Т. 8, 383 с.
22. Теличко О.Н. О селекции вики яровой (*Vicia sativa* Breeding) / О.Н. Теличко, О.В. Мохонь // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 7 (153). – С. 44-48.
23. Чернышев В.Д. К терминологии и биологической сущности интродукции / В.Д. Чернышев // Биологические исследования на Горнотажной станции. – 2001. – № 7. – С. 6-16.
24. Щукис Е.Р. Итоги работ по совершенствованию видового и сортового состава кормовых культур в Алтайском крае и задачи на перспективу / Е.Р. Щукис // Современные проблемы и достижения аграрной науки в земледелии, селекции и животноводстве. – Барнаул, 2005. – С. 227-238.
25. Ярошенко П.Д. Улучшение сенокосов и пастбищ Приморского края / П.Д. Ярошенко. – Владивосток, 1956. – 64 с.
26. Ярошенко П.Д. Сенокосы и пастбища Приморского края / П.Д. Ярошенко. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 188 с.

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

1. Bakumenko N.I. Dikorastushhie viki Primor'ja i ih kormovoe znachenie [Wild wiki of Primorye and their feed value] / N.I. Bakumenko // Aktual'nye problemy kormoproduktstva v Primorskom krae [Actual problems of feed production in the Primorsky Territory]. – Ussuriysk: PSHI, 1984. – P. 38-43. [in Russian]
2. Bochkarev V.V. Nekotorye priemy vyrashhivaniya chiny Davida v kul'ture [Some methods of growing the rank of David in culture] / V.V. Bochkarev // Agrarnaja politika i tehnologija proizvodstva sel'skohozjajstvennoj produkcii v stranah Aziatsko-Tihookeanskogo regiona: Mater. Mezhdunar. nauchno-prakt. Konferencii [Agricultural policy and agricultural production technology

- in the countries of the Asia-Pacific region: Mater. Int. scientific and practical. Conferences]. – Ussuriysk: PSAA, 2002. – Vol.2. – P. 53-57. [in Russian]
3. Branke Yu.V. O himizme kormovykh rastenij Dal'nevostochnoj flory / Ju.V. Branke [On the chemistry of forage plants of the Far Eastern flora] / Yu.V. Branke // Bulletin of the Far Eastern Phil. USSR Academy of Sciences, 1935. – Issue. 12. – P. 3-38. [in Russian]
  4. Belikov I.F. Soderzhanie karotina v kormovykh rastenijah Primorskogo kraja [The carotene content in fodder plants of the Primorsky Territory] / I.F. Belikov, B.P. Kolesnikov // Sat. scientific tr S.-kh. experienced researched Institutions of the Primorsky Territory, c. 1, 1948. – P. 10-12. [in Russian]
  5. Vavilov P.P. Novye kormovye kul'tury [New fodder crops] / P.P. Vavilov, A.A. Kondratyev. - M.: Rosselkhozizdat, 1975. – 351 p. [in Russian]
  6. Vavilov P.P. Rezul'taty issledovanij po vozdeleyvaniyu novykh kormovykh kul'tur [The results of studies on the cultivation of new feed crops] / P.P. Vavilov // Feed production sb. scientific slave B. 17. - M.: NIIC im. V.R. Williams, 1977. – P. 124-133. [in Russian]
  7. Voloshina T.A. O vozdeleyvanii kozljatnika vostochnogo v usloviyah Primorskogo kraja [On the cultivation of Eastern goatskin in the Primorsky Territory] / T.A. Voloshina, A.K. Gull. – Ussuriysk, 1985. – 48 p. [in Russian]
  8. Vorobyov D.P. Kormovye travy i ih kul'tura v gorno-taezhnykh rajonah Primor'ja [Feed grasses and their culture in mountain taiga regions of Primorye] / D.P. Vorobiev // Tr. Mountain taiga station Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences. Vladivostok: FEF Sib. Dep. USSR Academy of Sciences, 1946. – V. 5. – P. 170-200. [in Russian]
  9. Emelyanov A.N. Novye kormovye kul'tury i ih semenovodstvo v Primorskom krae [New fodder crops and their seed production in the Primorsky Territory] / A.N. Emelyanov // Collection of scientific papers. - Vladivostok: Dalnauka, 2010. – P. 25-31.
  10. Emelyanov A.N. O semenovodstve kozljatnika vostochnogo v Primorskom krae [About seed farming of Eastern goatskin in the Primorsky Territory] / A.N. Emelyanov, T.A. Voloshina // Feed production. – 2013. – No. 7. – P. 22-23. [in Russian]
  11. Kardai O.E. Izuchenie tehnologii vozdeleyvaniya Lathyrus Davidii na kormovye celi v Primorskom krae [The study of the technology of cultivation of Lathyrus Davidii for feed purposes in the Primorsky Territory] / O.E. Kardai, V.V. Bochkarev // Young scientists - the agricultural sector of the Far East Materials of the inter-university scientific and practical conference of graduate students, young scientists and specialists. – 2008. – P. 52-55. [in Russian]
  12. Kiryushin V.I. Jekologicheskie osnovy zemledelija [Ecological basis of agriculture] / V.I. Kiryushin. – M.: Kolos, 1996. – 367 p. [in Russian]
  13. Kuzina V.P. Dikorastushhie bobovye Primor'ja i ih kormovoe znachenie [Wild bean of Primorye and their feed value] / V.P. Cousin // Flora and Vegetation of the Far East. – Vladivostok, 1970. – No. 1. – P. 15-17. [in Russian]
  14. Larin I.V. Semejstvo bobovye [The bean family] // Feed plants of hayfields and pastures of the USSR. V 2. – M.-L.: Publishing house of agricultural literature, 1951. – P. 518-888. [in Russian]
  15. Lyuty A.V. Agrotehnicheskie priemy povyshenija urozhajnosti semjan kozljatnika vostochnogo v usloviyah Primorskogo kraja : dis. ... kand. s.-h. nauk [Agrotechnical methods for increasing the yield of Eastern goat seeds in the conditions of the Primorsky Territory: dis. ... cand. S.-kh. Sciences: 06.01.09] / Lyuty Aleksey Vyacheslavovich. - Ussuriysk, 2003. – 111 p. [in Russian]
  16. Pavlova N.S. Itogi izuchenija dikorastushhih kormovykh bobovykh Sovetskogo Dal'nego Vostoka [The results of the study of wild fodder legumes of the Soviet Far East] / N.S. Pavlova // Results and prospects of using the world collection of VIR in the development of agricultural production in the Far East and Siberia. Tez. doc. – Vladivostok, 1987. – P. 27-28. [in Russian]
  17. Pavlova N.S. K izucheniju himicheskogo sostava dikorastushhih kormovykh bobovykh Rossijskogo Dal'nego Vostoka [To the study of the chemical composition of wild fodder legumes of the Russian Far East / N.S. Pavlova // Biological research at the Gorno-Taiga station. – Vladivostok, 2001. – No. 7. – P. 78-97. [in Russian]
  18. Polyakova A.I. Dikorastushhie kormovye rastenija Altajskogo kraja kak ishodnyj material dlja selekcii [Wild fodder plants of the Altai Territory as a source material for selection] / A.I. Polyakova // Nauchn-tehn. bull. – Novosibirsk: Sib. Department. VASKHNIL, 1978. – V. 5,6. – P. 29-39. [in Russian]
  19. Primor'e v cifrah: Kratkij statisticheskij sbornik [Primorye in numbers: A Brief Statistical Digest] / Primorskstat, 2020. – 66 p. [in Russian]
  20. Skalozub O.M. Vozdeleyvanie donnika belogo, kak kul'tury mnogoplanovogo ispol'zovaniya: rekomendacii [The cultivation of white melilot, as a culture of multifaceted use: recommendations] / O.M. Skalozub, A.N. Emelyanov. – Vladivostok: Dalnauka, 2012. – 27 p. [in Russian]
  21. Sosudistye rastenija sovetetskogo Dal'nego Vostoka. [Vascular plants of the Soviet Far East]. (Ed. By S.S. Kharkevich). L.: Nauka, 1985.Vol. 1, 398 e.; 1987.Vol. 2, 446 e.; 1988.Vol. 3, 421 e.; 1989. T. 4, 380 e.; 1991.Vol. 5, 390 e.; St. Petersburg: Nauka, 1992.V. 6, 428 e.; 1995.V. 7, 395 e.; 1996.Vol. 8, 383 p. [in Russian]
  22. Telichko O.N. O selekcii viki jarovoj (Vicia sativa Breeding) [About selection of Vika spring (Vicia sativa Breeding)] / O.N. Telichko, O.V. Mokhon // Bulletin of the Altai State Agrarian University. – 2017. – No. 7 (153). – P. 44-48. [in Russian]
  23. Chernyshev V.D. K terminologii i biologicheskoy sushhnosti introdukcii / V.D. Chernyshev [To the terminology and biological essence of the introduction] / V.D. Chernyshev // Biological studies at the Gorno-Taiga station. – 2001. – No. 7. – P. 6-16. [in Russian]
  24. Schukis E.R. Itogi rabot po sovershenstvovaniju vidovogo i sortovo-go sostava kormovykh kul'tur v Altajskom krae i zadachi na perspektivu [The results of work to improve the species and varietal composition of forage crops in the Altai Territory and tasks for the future] / E.R. Schukis // Modern problems and achievements of agrarian science in agriculture, breeding and animal husbandry. – Barnaul, 2005. – P. 227-238. [in Russian]
  25. Yaroshenko P.D. Uluchshenie senokosov i pastbishh Primorskogo kraja [Improvement of hayfields and pastures of Primorsky Krai] / P.D. Yaroshenko. – Vladivostok, 1956. – 64 p. [in Russian]
  26. Yaroshenko P.D. Senokosy i pastbishha Primorskogo kraja [Hayfields and pastures of the Primorsky Territory] / P.D. Yaroshenko. – M.-L.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1962. – 188 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.025>**РОЛЬ МНОГОЛЕТНИХ БОБОВЫХ ТРАВ В КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ ПРИМОРСКОГО КРАЯ**

Обзорная статья

**Ивлева О.Е.<sup>1,\*</sup>, Берсенева С.А.<sup>2</sup>, Митрополова Л.В.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9109-8063;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9109-8063;<sup>1, 2, 3</sup> Приморская ГСХА, г. Уссурийск, Россия;

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

**Аннотация**

Для развития животноводства необходимо создать прочную кормовую базу. В Дальневосточном регионе особенно выражена проблема нехватки кормов, которая усугубляется несбалансированностью их по белку, что приводит к их перерасходу, понижению продуктивности животноводства и повышению себестоимости животноводческой продукции. Решением данной проблемы является увеличение производства растительного белка, важным источником которого являются бобовые растения.

В статье представлен обзор состояния, тенденций и проблемы производства кормов на территории Приморского края. Рассмотрена роль многолетних бобовых трав, как основного источника производства растительного белка.

**Ключевые слова:** кормопроизводство, многолетние бобовые травы, клевер, люцерна, растительный белок.

**THE ROLE OF PERENNIAL LEGUMINOUS GRASSES IN THE FORRAGE PRODUCTION OF PRIMORSKY KRAI**

Review article

**Ivleva O. E.<sup>1,\*</sup>, Berseneva S. A.<sup>2</sup>, Mitropolova L. V.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9109-8063;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9109-8063;<sup>1, 2, 3</sup> Primorskaya State Academy of Agriculture, Ussuriysk, Russia;

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

**Abstract**

For the development of animal husbandry, it is necessary to create a stable forrage. The problem of lacking forrage is particularly severe in the Far East region. The imbalance in proteins exacerbates it, and that leads to forrage over-expenditure, decreasing productivity of livestock farming, and increasing livestock production prime cost. To solve the problem, it is necessary to increase in the production of plant protein, an essential source of which are leguminous plants.

The article presents the review on the state, trends, and problems of forage production in Primorsky Krai. The paper looks into the role of perennial leguminous grasses as the primary source of plant protein production..

**Keywords:** forage production, perennial leguminous grasses, clover, medick, plant protein.

В основе кормовой базы животноводства в современных условиях дефицита материальных и финансовых ресурсов, важнейшая роль отводится многолетним травам и лугопастбищным угодьям, так как это удешевляет стоимость кормов и возможность использования угодий без перезалужения более 10 лет [13].

Многолетние травы и растительность природных кормовых угодий предотвращает эрозию, способствует повышению плодородия почв [21], занимая большие площади. Они являются частью экологического каркаса агроландшафта, обеспечивая его устойчивость и почвозащитные функции [19].

Многолетние бобовые травы являются основным компонентом различных видов кормов, повышение в рационе крупного рогатого скота удельного веса бобовых позволяет получить корма с наибольшей концентрацией сырого протеина [17]. Так, например, на получение 1 кг животного белка затрачивается в среднем 7,5 кг растительного. По зоотехническим нормам в 1 корм. ед. должно содержаться не менее 105-110 г перевариваемого протеина [6].

В составе кормовых бобовых растений, белок в фазе цветения, составляет в среднем 18,4 %. Питательную ценность растений определяют также безазотистые экстрактивные вещества, которых в фазе цветения – плодоношения содержится около 42 %. Содержание жира незначительно – 3,2 %, клетчатки – 28 %. Бобовые богаты каротином, витамином С, хорошо перевариваются и усваиваются. Коэффициенты перевариваемости высокие: белка и безазотистых экстрактивных веществ 60-80, клетчатки – менее 40. В 100 кг сена бобовых трав, убранного в начале плодоношения, содержится переваримого белка 9-10 кг и 50-60 кормовых единиц. Бобовые поедаются всеми видами скота [16].

Согласно данным П.П. Вавилова [2], в фазе укосной спелости бобовые травы содержат сырого протеина в 1,5, перевариваемого протеина – в 1,7 раза больше в сравнении со злаковыми травами. Перевариваемость белка бобовых культур значительно выше, чем злаковых трав. Перевариваемого протеина содержится: в 100 кг сухой массы люцерны 16,7 кг, клевера – 11,5, эспарцета – 13, донника – 14,7, костреца безостого – 8,7, тимофеевки – 7,2, овсяницы – 8,6, пырея – 5,3 кг. Таким образом, белковая питательность бобовых многолетних трав в 2-3 раза выше, чем злаковых трав. Кроме того, по содержанию незаменимых аминокислот бобовые травы в 1,5 раза превосходят злаковые.

Белок злаковых трав в качественном отношении недостаточно полноценен из-за низкого содержания отдельных незаменимых аминокислот. Введение бобовых трав в рацион животных способствует также повышению усвояемости белков из других несбалансированных кормов [1].

Природные кормовые угодья Приморского края характеризуются низким флористическим разнообразием. Потенциальная продуктивность кормовых угодий в условиях муссонного климата характеризуется низкими показателями. В 1970 году отмечается увеличение площади под кормовыми культурами до 130 тыс. га. При этом увеличение производства кормов незначительное [4], [11].



В 1965 году площади под многолетними кормовыми травами в Приморье составили 28,7 тыс. га и до 1980 года наблюдалось их увеличение до 80,0 тыс. га [22].

По данным В.М. Конечного [12] в 1980 году на Дальнем Востоке было занято свыше 120 тыс. га под многолетними травами. Ежегодный посев трав, включая создание и обновление культурных пастбищ, составлял около 100 тыс. га. Именно в этот период в Приморском крае под кормовыми и зернофуражными культурами было занято более 500 тыс. га пашни, однако, использовалась она неэффективно, и собираемых с этой площади кормов недостаточно было для удовлетворения потребности животноводства. Кормовые и зернофуражные культуры имели низкое качество и содержали мало белка [28].

Длительное время в Приморском крае основным источником белка в кормах и главным компонентом кормовой базы животноводства являлись виды рода клевер (*Trifolium sp.*)

Род клевер в дикой флоре Приморского края представлен 15 видами, среди которых большая часть культивируется, используется как кормовые виды и играют важную роль в формировании растительного покрова сенокосов и пастбищ [15], [26]. Именно на этой культуре длительный период времени развития кормопроизводства Дальнего Востока, в т.ч. и Приморского края, строилась система ведения сельского хозяйства. В отдельные годы площади под клевером доходили до 80 тыс. га, в том числе, семенные посевы достигали 20 тыс. га, но, несмотря на множество положительных качеств, которыми обладает клевер, в отдельные годы, из-за отсутствия снежного покрова он вымерзал, и по этой причине невозможно было получать семена клевера [7], [8].

По данным О.М. Скалозуб и А.Н. Емельянова [23], [24], [25] на базе ФГБНУ «Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки» длительный исторический период продолжают агроэкологические исследования сортов клевера лугового (*Trifolium pratense L.*) В условиях Приморского края Клевер луговой держится в посевах не более двух лет и поэтому лучше его использовать для создания краткосрочных травостоев в севооборотах. Именно эта культура успешно решает задачи по получению кормов высокого качества, являясь хорошим предшественником для полевых культур, обогащая почву азотом и органическим веществом за счет корневых остатков [30].

Из полевых культур, выращиваемых на корм, максимальный сбор белка с единицы площади (2300-2500 кг с 1 га) дает люцерна (род *Medicago L.*) [2]. На территории Приморского края произрастает 4 вида люцерны, из них: *Medicago lupula L.* (люцерна хмелевидная), *M. falcata L.* (л. серповидная) и *M. sativa L.* (л. посевная) являются составной частью кормовой базы края. Люцерна является долголетней культурой, на территории России возделывается люцерна изменчивая (*Medicago x vario Mart.*). Этот гибридный вид введен в культуру в XX веке и на территории СНГ возделывается в соответствии с сортовым районированием на больших площадях в 112 регионах в степной, лесостепной и лесной зонах. Районировано 60 староместных и селекционных сортов. Для люцерны изменчивой характерна высокая экологическая пластичность. Зимостойкость данного гибрида выше, чем у родительских форм, поэтому люцерна изменчивая более перспективна для регионов с экстремальными условиями среды.

В 1980 году люцерна изменчивая была внедрена в агроценозы юга Дальнего Востока, но особенности агроклиматических условий не позволили получить ожидаемого результата, так как эта культура оказалась более требовательной к агрохимическим и механическим характеристикам почв сельскохозяйственных угодий, а площади посевов во многом зависели от поставок семян. Дефицит семян люцерны изменчивой сдерживает ее широкое использование в кормопроизводстве Дальневосточного региона.

Семенные травостой люцерны изменчивой предъявляют более высокие требования, чем клевер, например, к температурным условиям, так как недостаток тепла, влажный климат в период цветения и плодообразования в условиях Приморского края не позволяет получать устойчивые урожаи семян и вести рентабельное семеноводство этой культуры. Невозможность наладить семеноводство люцерны изменчивой связано с несоответствием биологии культуры местному муссонному климату [7], [14]. Люцерна имеет и ряд отрицательных характеристик: она может вызывать тимпанию, требует проведения защитных мер против вредителей и почв высокого плодородия. Однако, не смотря на это, исследования интродукции люцерны изменчивой в кормопроизводстве в условиях Приморского края продолжают и сегодня [9].

Проблема производства белковых кормов осуществлялось в Приморском крае, в основном, за счет видов рода соя (*Glycine Willd.*). С 1999 года объем производства сои в крае снизился до 54,5 тыс. т, что составляло 42,4 % к уровню 1986-1990 годов [29]. Это напрямую связано с сокращением поголовья скота и его продуктивности. В 2012 году зафиксировано резкое снижение площадей под кормовыми культурами, в т.ч. и сою почти в три раза, что составило 133 тыс. га. Количество и качество заготавливаемых кормов в этот период осталось на низком уровне [5].

На сегодняшний день в Приморском крае под кормовыми культурами занято около 37 тыс. га. При этом, стоит отметить, что площадь под этими культурами ежегодно сокращается: в 2014 году было 51,8 тыс. га, в 2015 – 49 тыс. га, 2016 – 43,2 тыс. га [27].

В решении проблемы производства высокобелковых кормов в Приморском крае и в России, в целом, существенную роль играют бобовые культуры, среди которых выделяется козлятник восточный или галега (*Galega orientalis Lam.*) – интродукционная многолетняя ценная культура [10].

Обладая биологическими особенностями (долголетие, высокая и устойчивая урожайность корма, семян, семенной и побегообразующий тип размножения, высокая адаптивность к климатическим стрессам и нетребовательность к плодородию почвы), козлятник восточный стал приоритетной кормовой культурой для изучения и широкого внедрения в производство [3].

Исследования по изучению продуктивности козлятника восточного, проводимые в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Приморская государственная сельскохозяйственная академия (ФГБОУ ВО Приморская ГСХА) показали, что урожайность его находится в тесной связи с почвенно-гидрологическими условиями [18], [20].

Необходимым условием создания прочной кормовой базы животноводства является разработка и реализация региональной научно-обоснованной системы семеноводства кормовых культур [28], [29], [5].

Потребность в семенах многолетних трав ежегодно возрастает и составляет около 3 тыс. т. Приморский край и Дальний Восток, в целом, нуждается в собственных семенах многолетних трав для дальнейшего развития кормопроизводства. Сейчас производство их ниже потребностей. Особенно остро ощущается недостаток семян бобовых трав.

В связи с развитием животноводческой отрасли кормопроизводство Приморского края нуждается в расширении ассортимента кормовых культур и в первую очередь бобовых культур, позволяющих при минимальных затратах получать как высокие урожаи качественных кормов, так и семенной материал для возобновления кормовых угодий. Решить эту задачу можно за счет интродукции новых культур семейства бобовые местной дикорастущей флоры, обладающих высокой продуктивностью и кормовой ценностью, а так же расширением посевов высокопродуктивных бобовых трав и их смесей, например, со злаковыми культурами.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Азоркин Ф.В. Укрепление кормовой базы животноводства на основе возделывания бобовых и бобово-злаковых травостоев / Ф.В. Азоркин // Кормопроизводство. – 2001. – № 4. – С. 13-15.
2. Вавилов П.П. Бобовые культуры и проблемы растительного белка / П.П. Вавилов, Г.С. Посыпанов. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 256 с.
3. Дроздов С.П. Перспективы выращивания козлятника восточного в Карелии / С.П. Дроздов, Е.С. Холопцева, К.Е. Яковлева, О.А. Голубева, В.В. Коломейченко // Кормопроизводство. – 2009. – № 3. – С. 12–14.
4. Дрыганов В.Н. Кормопроизводство в Приморском крае / В.Н. Дрыганов. – Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1972. – 280 с.
5. Емельянов А.Н. Новые кормовые культуры и их семеноводство в Приморском крае / А.Н. Емельянов // Проблемы и перспективы кормопроизводства в Дальневосточном регионе: к 75-летию образования аграрной науки на Сахалине / Россельхозакадемия, ДВ РНЦ, Сахалинский НИИСХ. – Владивосток: Дальнаука. – 2010. – С. 25-31.
6. Жеруков Б.Х. Бобовые травы – источник кормового белка / Б.Х. Жеруков, К.Г. Магомедов // Кормопроизводство. – 2003. – № 10. – С. 9-11.
7. Живчиков А.И. Некоторые особенности биологии и зимостойкости *Trifolium pratense* L. в Приморском крае при неустойчивом снежном покрове / А.И. Живчиков, Н.И. Бакуменко // Ботанические исследования на Дальнем Востоке. – Владивосток: ДВГУ. – 1980. – С. 25-27.
8. Живчиков А.И. Продуктивность клевера лугового различного экологического происхождения в степной зоне приморского края / А.И. Живчиков // Пути повышения продуктивности растениеводства, кормопроизводства и садоводства на Дальнем Востоке. – Владивосток: БПИ. – 1987. – С. 256-264.
9. Иванова Е.П. Возделывание люцерны как фактор повышения эффективности животноводства Приморского края / Е.П. Иванова // Аграрная наука – сельскому хозяйству. Алтайский государственный аграрный университет. – 2017. – С. 123-125.
10. Иванов Д.А. Продуктивность козлятника восточного в разных ландшафтных условиях / Д.А. Иванов, В.А. Тюлин, Н.Н. Иванова, А.И. Гришина // Кормопроизводство. – 2013. – № 2. – С. 14-15.
11. Казьмин Т.Г. Развитие кормопроизводства на Дальнем Востоке / Т.Г. Казьмин, В.И. Сафонов // Кормопроизводство сб. науч. раб. В. 17. – М.: НИИК им. В.Р. Вильямса. – 1977. – С. 42-48.
12. Конечный В.М. Селекция и семеноводство многолетних трав на Дальнем Востоке / В.М. Конечный // Селекция и возделывание кормовых трав на Дальнем Востоке. – Новосибирск: Сиб. отд. ВАСХНИЛ. – 1982. – С. 3-10.
13. Косолапов В.М. Кормопроизводство – определяющий фактор сельского хозяйства России / В.М. Косолапов, И.А. Трофимов, Л.С. Трофимова, С.П. Яковлева // Вестник Орловского ГАУ. – 2012. – № 1. – С. 29-32.
14. Кошкарёва В.И. Агробиологическое изучение люцерны в Приморском крае / В.И. Кошкарёва, В.А. Кожевников // Актуальные проблемы кормопроизводства в Приморском крае. – Уссурийск: ПСХИ, 1984. – С. 34-38.
15. Кузина В.П. Дикорастущие бобовые Приморья и их кормовое значение / В.П. Кузина // Флора и растительность Дальнего Востока. – Владивосток. – 1970. – №1. – С. 15-17.
16. Ларин И.В. Семейство бобовые / И.В. Ларин // Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР. Т 2. – М.-Л.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, 1951. – С. 518-888.
17. Лукашов В.Н. Роль многолетних бобовых трав в системе кормопроизводства / В.Н. Лукашов // Кормопроизводство. – 2001. – № 6. – С. 18-22.
18. Павлова О.В. Кормовая и семенная продуктивность лядвенца рогатого Приморском крае / О.В. Павлова // Молодые ученые – агропромышленному комплексу Дальнего Востока Материалы межвузовской научно-практической конференции аспирантов, молодых ученых и специалистов. – 2008. – С. 66-69.
19. Парахин Н.В. Кормопроизводство / Н.В. Парахин, И.В. Кобозев, И.В. Горбачев и др. – М.: КолосС, 2006. – 431 с.
20. Рыженко В.Х. Семеноводство кормовых культур на Дальнем Востоке / В.Х. Рыженко. – Уссурийск: ПГСХА, 2004. – 188 с.
21. Савченко И.В. Природные кормовые угодья России и их ресурсы / И.В. Савченко // Кормопроизводство. – 1997. – № 11. – С. 6-9.
22. Сидоренко П.К. Пути интенсификации кормопроизводства в Приморском крае / П.К. Сидоренко // Актуальные проблемы кормопроизводства в Приморском крае. – Уссурийск: ПСХИ. – 1984. – С. 3-7.

23. Скалозуб О.М. Продуктивность и питательность сортов клевера лугового в условиях Приморского края / О.М. Скалозуб // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 6 (104). – С. 62-65.
24. Скалозуб О.М. Урожайность и посевные качества семян сортов клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) и гибридного (*Trifolium hybridum* L.) в условиях степной зоны Приморского края / О.М. Скалозуб, А.Н. Емельянов // Дальневосточный аграрный вестник. – 2015. – № 4 (36). – С. 21-27.
25. Скалозуб О.М. Урожайность семян клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) в зависимости от сроков подсева под покров / О.М. Скалозуб, А.Н. Емельянов // Аграрный вестник Приморья. – 2018. – № 4 (12). – С. 5-8.
26. Сосудистые растения советского Дальнего Востока: Плауновидные, Хвощевидные, Папоротниковидные, Голосеменные, Покрытосеменные (Цветковые) : в 8 т. / отв. ред. С.С. Харкевич. – Л.: Наука, 1989. – Т. 4 / ред. тома А. Е. Кожевников. – 380 с.
27. Усанов С.Н. Анализ состояния, тенденций и проблем развития молочного скотоводства Приморского края / С.Н. Усанов // Дальневосточный аграрный вестник. – 2017. – №4 (44). – С. 219-228.
28. Чайка А.К. Пути интенсификации кормопроизводства в условиях Приморского края / А.К. Чайка // Пути повышения продуктивности растениеводства, кормопроизводства и садоводства на Дальнем Востоке. – Владивосток: БПИ. – 1987. – С. 233-242.
29. Чайка А.К. Состояние и пути развития кормопроизводства на Дальнем Востоке / А.К. Чайка, А.Н. Емельянов // Кормопроизводство. – 2002. – № 8. – С. 4-6.
30. Шпаков А.С. Состояние кормопроизводства в России / А.С. Шпаков, И.В. Савченко, Д.В. Якушев // Кормопроизводство. – 2001. – № 3. – С. 2-5.

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

1. Azorkin F.V. Ukreplenie kormovoj bazy zhivotnovodstva na osnove vzdelyvaniya bobovyh i bobovo-zlakovyh travostoev [Strengthening the forage base of animal husbandry based on the cultivation of legumes and legumes and cereal grass stands] / F.V. Azorkin // Kormoproizvodstvo [Feed production]. – 2001. – № 4. – P. 13-15. [in Russian]
2. Vavilov P.P. Bobovye kul'tury i problemy rastitel'nogo belka [Legumes and problems of vegetable protein] / P.P. Vavilov, G.S. Sprinkled – M.: Rosselkhozizdat, 1983. – 256 p. [in Russian]
3. Drozdov S.P. Perspektivy vyrashchivaniya kozlyatnika vostochnogo v Karelii [Prospects for the cultivation of Eastern goatskin in Karelia] / S.P. Drozdov, E.S. Kholoptseva, K.E. Yakovleva, O.A. Golubeva, V.V. Kolomeychenko // Kormoproizvodstvo [Feed production]. – 2009. – № 3. – P. 12-14. [in Russian]
4. Dryganov V.N. Kormoproizvodstvo v Primorskom krae [Feed production in the Primorsky Territory] / V.N. Dryganov. – Vladivostok: Dal'nevost. kn. izd-vo, 1972. – 280 p. [in Russian]
5. Emelyanov A.N. Novye kormovye kul'tury i ih semenovodstvo v Primorskom krae [New fodder crops and their seed production in the Primorsky Territory] / A.N. Emelyanov // Problemy i perspektivy kormoproizvodstva v Dal'nevostochnom regione: k 75-letiyu obrazovaniya agrarnoy nauki na Sahaline [Problems and prospects of feed production in the Far East region: on the 75th anniversary of the formation of agricultural science in Sakhalin] / [Rossel'hozakademiya, DV RNC, Sahalinskij NIISKH] Russian Agricultural Academy, Far East Scientific Center, Sakhalin Research Institute of Agriculture. – Vladivostok: Dalnauka. – 2010. – P. 25-31. [in Russian]
6. Zherukov B.Kh. Bobovye travy – istochnik kormovogo belka [Legumes – a source of feed protein] / B.Kh. Zherukov, K.G. Magomedov // Kormoproizvodstvo [Feed production]. – 2003. – № 10. – P. 9-11. [in Russian]
7. Zhivchikov A.I. Nekotorye osobennosti biologii i zimostojkosti *Trifolium pratense* L. v Primorskom krae pri neustojchivom snezhnom pokrove [Some features of the biology and winter hardiness of *Trifolium pratense* L. in the Primorsky Territory with unstable snow cover] / A.I. Zhivchikov, N.I. Bakumenko // Botanicheskie issledovaniya na Dal'nem Vostoke. [Botanical research in the Far East]. – Vladivostok: FENU. – 1980. – P. 25-27. [in Russian]
8. Zhivchikov A.I. Produktivnost' klevera lugovogo razlichnogo ekologicheskogo proiskhozhdeniya v stepnoj zone Primorskogo kraja [The productivity of meadow clover of various ecological origin in the steppe zone of the Primorsky Territory] / A.I. Zhivchikov // Puti povysheniya produktivnosti rastenievodstva, kormoproizvodstva i sadovodstva na Dal'nem Vostoke [Ways to increase the productivity of crop production, fodder production and gardening in the Far East]. – Vladivostok: BPI. – 1987. – P. 256-264. [in Russian]
9. Ivanova E.P. Vozdelyvanie lyucerny kak faktor povysheniya effektivnosti zhivotnovodstva Primorskogo kraja [Alfalfa cultivation as a factor in increasing the efficiency of animal husbandry in the Primorsky Territory] / E.P. Ivanova // Agrarnaya nauka – sel'skomu hozyajstvu [Agricultural science - to agriculture]. Altajskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet [Altai State Agrarian University]. – 2017. – P. 123-125. [in Russian]
10. Ivanov D.A. Produktivnost' kozlyatnika vostochnogo v raznyh landshaftnyh usloviyah [The productivity of Eastern goatskin in different landscape conditions] / D.A. Ivanov, V.A. Tyulin, N.N. Ivanova, A.I. Grishina // Kormoproizvodstvo [Feed production]. – 2013. – № 2. – P. 14-15. [in Russian]
11. Kazmin T.G. Razvitie kormoproizvodstva na Dal'nem Vostoke [Development of feed production in the Far East] T.G. Kazmin, V.I. Safonov // Kormoproizvodstvo sb. nauch. rab. [Feed production sb. scientific slave] B. 17. – M.: NIIK im. V.R. Williams. – 1977. – P. 42-48. [in Russian]
12. Finite V.M. Selekcija i semenovodstvo mnogoletnih trav na Dal'nem Vostoke [Selection and seed production of perennial grasses in the Far East] / V.M. Finite // Selekcija i vzdelyvanie kormovyh trav na Dal'nem Vostoke [Selection and cultivation of forage grasses in the Far East]. – Novosibirsk: Sib. Dep. UPPER. – 1982. – P. 3-10. [in Russian]
13. Kosolapov V.M. Kormoproizvodstvo – opredelyayushchij faktor sel'skogo hozyajstva Rossii [Feed production – a determining factor in agriculture in Russia] / V.M. Kosolapov, I.A. Trofimov, L.S. Trofimova, S.P. Yakovleva // Vestnik Orlovskogo GAU [Bulletin of the Oryol State Agrarian University]. – 2012. – № 1. – P. 29-32. [in Russian]
14. Koshkareva V.I. Agrobiologicheskoe izuchenie lyucerny v Primorskom krae [Agrobiological study of alfalfa in the Primorsky Territory] / V.I. Koshkareva, V.A. Kozhevnikov // Aktual'nye problemy kormoproizvodstva v Primorskom krae [Actual problems of feed production in the Primorsky Territory]. – Ussuriysk: PSHI, 1984. – P. 34-38. [in Russian]

15. Kuzina V.P. Dikorastushchie bobovye Primor'ya i ih kormovoe znachenie [Wild bean of Primorye and their feed value / V.P. Cousin] // Flora i rastitel'nost' Dal'nego Vostoka [Flora and vegetation of the Far East]. – Vladivostok. – 1970. – №1. – P. 15-17. [in Russian]
16. Larin I.V. Semejstvo bobovye [The bean family] / I.V. Larin // Kormovye rasteniya senokosov i pastbishch SSSR [Feed plants of hayfields and pastures of the USSR]. T 2. – M.-L.: Izd-vo sel'skohozyajstvennoj literatury [Publishing house of agricultural literature], 1951. – P. 518-888. [in Russian]
17. Lukashov V.N. Rol' mnogoletnih bobovyh trav v sisteme kormoproizvodstva [The role of perennial legumes in the feed production system] / V.N. Lukashov // Kormoproizvodstvo [Feed production]. – 2001. – No. 6. – P. 18-22. [in Russian]
18. Pavlova O.V. Kormovaya i semennaya produktivnost' lyadvenca rogatogo Primorskogo krae [Fodder and seed productivity of juvenile horned Primorsky Krai] / O.V. Pavlova // Molodye uchenye – agropromyshlennomu kompleksu Dal'nego Vostoka Materialy mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, molodyh uchenykh i specialistov [Young scientists – the agricultural sector of the Far East Materials of the inter-university scientific and practical conference of graduate students, young scientists and specialists]. – 2008. – P. 66-69. [in Russian]
19. Parakhin N.V. Kormoproizvodstvo [Feed production] / N.V. Parakhin, I.V. Kobozev, I.V. Gorbachev et al. – M.: KolosS, 2006. – 431 p. [in Russian]
20. Ryzhenko V.Kh. Semenovodstvo kormovykh kul'tur na Dal'nem Vostoke [Seed farming of feed crops in the Far East / V.Kh. Ryzhenko]. – Ussuriysk: PSAA, 2004. – 188 p. [in Russian]
21. Savchenko I.V. Prirodnye kormovye ugod'ya Rossii i ih resursy [Natural fodder lands of Russia and their resources] / I.V. Savchenko // Kormoproizvodstvo [Feed production]. – 1997. – № 11. – P. 6-9. [in Russian]
22. Sidorenko P.K. Puti intensifikatsii kormoproizvodstva v Primorskogo krae [Ways of intensification of feed production in the Primorsky Territory] / P.K. Sidorenko // Aktual'nye problemy kormoproizvodstva v Primorskogo krae [Actual problems of feed production in the Primorsky Territory]. – Ussuriysk: PSHI. – 1984. – P. 3-7. [in Russian]
23. Skalozub O.M. Produktivnost' i pitatel'nost' sortov klevra lugovogo v usloviyakh Primorskogo kraja [Productivity and nutritional value of varieties of clover meadow in the Primorsky Territory] / O.M. Skalozub // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]. – 2013. – No. 6 (104). – P. 62-65. [in Russian]
24. Skalozub O.M. Urozhajnost' i posevnye kachestva semyan sortov klevra lugovogo (*Trifolium pratense* L.) i gibridnogo (*Trifolium hybridum* L.) v usloviyakh stepnoj zony Primorskogo kraja [Productivity and sowing quality of seeds of varieties of clover meadow (*Trifolium pratense* L.) and hybrid (*Trifolium hybridum* L.) in the conditions of the steppe zone of the Primorsky Territory] / O.M. Skalozub, A.N. Emelyanov // Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik [Far Eastern Agrarian Bulletin]. – 2015. – № 4 (36). – P. 21-27. [in Russian]
25. Skalozub O.M. Urozhajnost' semyan klevra lugovogo (*Trifolium pratense* L.) v zavisimosti ot srokov podseva pod pokrov [The yield of seeds of meadow clover (*Trifolium pratense* L.) depending on the timing of replanting under cover] / O.M. Skalozub, A.N. Emelyanov // Agrarnyj vestnik Primor'ya [Agrarian Bulletin of Primorye]. – 2018. – № 4 (12). – P. 5-8. [in Russian]
26. Sosudistye rasteniya sovet'skogo Dal'nego Vostoka: Plaunovidnye, Hvoshchevidnye, Paprotnikovidnye, Golosemennye, Pokrytosemennye (Cvetkovye) v 8 t. / otv. red. S.S. Harkevich [Vascular plants of the Soviet Far East: Plavoid, Horsetail, Fern-shaped, Gymnosperms, Angiosperms (Flowering): in 8 tons / hole. ed. S.S. Kharkevich]. – L.: Nauka, 1989. – T. 4 / ed. volumes A.E. Kozhevnikov. – 380 p. [in Russian]
27. Usanov S.N. Analiz sostoyaniya, tendentsiy i problem razvitiya molochnogo skotovodstva Primorskogo kraja [Analysis of the state, trends and problems of the development of dairy cattle breeding in the Primorsky Territory] / S.N. Usanov // Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik [Far Eastern Agrarian Bulletin]. – 2017. – № 4 (44). – P. 219-228. [in Russian]
28. Seagull A.K. Puti intensifikatsii kormoproizvodstva v usloviyakh Primorskogo kraja [Ways of intensification of feed production in the Primorsky Territory] / A.K. Seagull // Puti povysheniya produktivnosti rastenievodstva, kormoproizvodstva i sadovodstva na Dal'nem Vostoke [Ways to increase the productivity of crop production, fodder production and gardening in the Far East]. – Vladivostok: BPI. – 1987. – P. 233-242. [in Russian]
29. Seagull A.K. Sostoyanie i puti razvitiya kormoproizvodstva na Dal'nem Vostoke [The state and development of forage production in the Far East] / A.K. Chaika, A.N. Emelyanov // Kormoproizvodstvo [Feed production]. – 2002. – № 8. – P. 4-6. [in Russian]
30. Shpakov A.S. Sostoyanie kormoproizvodstva v Rossii [The state of feed production in Russia] / A.S. Shpakov, I.V. Savchenko, D.V. Yakushev // Kormoproizvodstvo [Feed production] – 2001. – № 3. – P. 2-5. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.026>**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПЫТА ДАННЫХ ПРИ АНАЛИЗЕ ВЫСОТ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ**

Научная статья

**Вайс А.А.<sup>1,\*</sup>, Пономаренко Д.В.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4965-3670;<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, Россия;<sup>2</sup> Таежинское лесничество Красноярского края, с. Новобирилюссы, Россия

\* Корреспондирующий автор (vais6365[at]mail.ru)

**Аннотация**

Цель работы – выявление достоверности средних показателей высот (точности опыта) деревьев в сосновых древостоях по средним величинам и изменчивости высот. Общая методика исследования основывается на измерении ряда таксационных показателей в насаждениях, основным элементом которых являются древостои сосны обыкновенной. В каждом лесотаксационном выделе были измерены диаметры и высоты четырех модельных деревьев для каждой ступени толщины. Всего указанные морфологические показатели замеры у 1350 деревьев.

По результатам исследований установлено следующее. В молодняках, имеющих значительную разницу высот по ступеням толщины, можно рекомендовать увеличить число измеряемых высот до 5 учетных деревьев для каждой ступени толщины. В остальных группах возраста следует рекомендовать считать достаточным измерение 4-х учетных деревьев в каждой ступени толщины.

**Ключевые слова:** сосна, высота, связь, диаметр, точность опыта.

**THE EVALUATION OF THE DATA ACCURACY OF THE PINE TREE HEIGHTS ANALYSIS**

Research article

**Weis A. A.<sup>1,\*</sup>, Ponomarenko D. V.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4965-3670;<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia;<sup>2</sup> Tazhinsky forestry of Krasnoyarsk territory, Novobirilyussy, Russia

\* Corresponding author (vais6365@mail.ru)

**Abstract**

The purpose of the work is to identify the reliability of average height indicators (experiment accuracy) of the trees in the pine stocks judging by the average values and variability of heights. The general research methodology is based on the measurement of taxational specifications of the growing stock, the main elements of which are the stocks of ordinary pine. The diameters and heights of four control trees for each level of thickness were measured in each forest taxing section. In total, 1350 trees were measured according to these morphological indicators.

According to the research results, for young pines that have a significant height difference in thickness level, it is recommended to increase the number of measured heights to 5 measured trees for each level of thickness. In other pine stock ratios, it is recommended to consider the measurement of 4 control trees for each level of thickness sufficient enough.

**Keywords:** pine, height, connection, diameter, experiment accuracy

**Введение**

Высота деревьев в любом насаждении различна [1]. Значение высоты обуславливает целый комплекс процессов и оценочных показателей [2]. Это формирование ярусности, определение качества условий местопроизрастания, оценка роста деревьев, характеристика развития насаждений, установление разряда высоты и т.д. [3], [4], [5].

Средняя высота насаждений зависит от древесной породы, условий местопроизрастания, возраста и осуществляемых в лесу хозяйственных мероприятий [6], [7], [8]. В пределах насаждения различия в высоте обуславливаются разным положением деревьев в отношении света, смежных деревьев, микроповышений и почвенных разностей [9], [10]. При одном и том же диаметре деревьев в пределах насаждения высоты оказываются разными [11], [12].

**Методика исследований**

Исследования проведены на территории Караульного и Таежинского лесничеств Красноярского края. Общая методика исследования основывается на измерении ряда таксационных показателей в насаждениях, основным элементом которых являются древостои сосны обыкновенной. В каждом лесотаксационном выделе были измерены диаметры и высоты четырех модельных деревьев для каждой ступени толщины. Ступени толщины приняты в зависимости от среднего диаметра насаждений: при среднем диаметре более 16 см – 4 см; при среднем диаметре от 6 до 16 см – 2 см; при среднем диаметре менее 6 см – 1 см. Измерения диаметров производились при помощи мерной вилки на высоте 1,3 м, в насаждениях, где измерение диаметра на высоте 1,3 м невозможно, замеры производились у основания корневой шейки. Измерения высот производились при помощи высотомера, в молодняках – при помощи мерного шеста. Всего указанные таксационные показатели замеры у 1350 деревьев.

**Результаты исследований**

На следующем этапе был выполнен статистический анализ высот деревьев для оценки их изменчивости и средних значений. Оценка изменчивости производилась по шкале М.Л. Дворецкого, согласно которой, по величине коэффициента вариации, устанавливают меру изменчивости признака: при величине коэффициента вариации до 5 % -

изменчивость слабая; 6-10 % - умеренная; 11-20 % - значительная; 21-50 % - большая; 51 % и более – очень большая. Статистические показатели высот деревьев представлены в таблице 1.

На участках № 11, 12, 17, 22 изменчивость высот умеренная (в пределах от 6 до 10 %), на этих же выделах наблюдаются максимальные значения средних высот, что соответствует площадям, занятым перестойными насаждениями. На участках № 6-9, 12 наблюдается значительная изменчивость высот (в пределах от 11 до 20 %). Для выделов № 1-5, 10, 13-16, 18-20, 23, 25, 27 коэффициент вариации находится в пределах от 21 до 50 %, что указывает на большую изменчивость высот. Такая изменчивость высот характерна для молодняков, а также насаждений, в которых представлено значительное число ступеней толщины.

Точность опыта для большей части лесных участков находится в пределах от 1,4 до 4,9 %, что позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов и достаточности числа измерений в соответствии с принятой методикой проведения исследования. Однако на нескольких выделах (№ 1-5, 25, 28-30) точность опыта превышает 5 % и находится в пределах от 5,1 до 8,2 %, что указывает на недостаточность числа измерений. Насаждения на указанных участках представлены древостоями, находящимися в фазе активного роста, то есть молодняками, для указанных участков также характерна значительная или большая изменчивость высот.

На основании данных таблицы 1 построены диаграммы связи точности опыта со средней высотой и изменчивостью высот. Обе зависимости имеют линейный характер. При увеличении средней высоты точность опыта уменьшается, а при росте изменчивости точность опыта возрастает (рисунок 1).

Линейная форма связи позволила использовать множественное уравнение для определения точности опыта по средней величине и изменчивости высот.

Таблица 1 – Статистические показатели высот деревьев сосны

| Таджикское лесничество    |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Описательная статистика   | Номер участка   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|                           | 1               | 2               | 3               | 4               | 5               | 6               | 7               | 8               | 9               | 10              |
| Среднее ( $\bar{x} \pm$ ) | 1,5 $\pm$ 0,60  | 2,1 $\pm$ 0,78  | 3,0 $\pm$ 1,03  | 2,5 $\pm$ 1,03  | 3,0 $\pm$ 1,22  | 13,6 $\pm$ 2,65 | 11,6 $\pm$ 2,04 | 12,9 $\pm$ 1,79 | 13,1 $\pm$ 1,99 | 23,4 $\pm$ 5,05 |
| Минимум                   | 0,5             | 0,8             | 1,1             | 0,7             | 1,2             | 8,5             | 8,0             | 10,0            | 10,0            | 8,5             |
| Максимум                  | 2,5             | 3,7             | 4,3             | 4,1             | 5,6             | 18,5            | 16,0            | 16,0            | 17,0            | 31,0            |
| V, %                      | 40,3            | 37,1            | 34,2            | 40,7            | 40,3            | 19,4            | 17,6            | 13,9            | 15,3            | 21,6            |
| P, %                      | 8,2             | 6,3             | 6,6             | 7,2             | 7,1             | 3,7             | 3,6             | 2,7             | 2,9             | 3,1             |
| Описательная статистика   | Номер участка   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|                           | 11              | 12              | 13              | 14              | 15              | 16              | 17              | 18              | 19              | 20              |
| Среднее ( $\bar{x} \pm$ ) | 24,7 $\pm$ 2,42 | 23,9 $\pm$ 2,52 | 20,9 $\pm$ 5,32 | 19,5 $\pm$ 4,44 | 20,3 $\pm$ 5,06 | 20,0 $\pm$ 4,94 | 26,0 $\pm$ 2,23 | 19,8 $\pm$ 5,39 | 23,4 $\pm$ 1,85 | 17,2 $\pm$ 3,71 |
| Минимум                   | 18,5            | 18,0            | 9,0             | 12,0            | 13,0            | 13,0            | 22,5            | 10,0            | 19,0            | 11,0            |
| Максимум                  | 29,0            | 28,5            | 30,5            | 27,0            | 30,5            | 30,5            | 31,0            | 29,0            | 27,5            | 22,5            |
| V, %                      | 9,8             | 10,5            | 25,4            | 22,8            | 24,9            | 24,7            | 8,6             | 27,2            | 7,9             | 21,6            |
| P, %                      | 1,4             | 1,5             | 3,7             | 3,5             | 3,6             | 3,6             | 1,7             | 4,3             | 1,9             | 4,1             |
| Описательная статистика   | Номер участка   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|                           | 21              | 22              | 23              | 24              | 25              | 26              | 27              | 28              | 29              | 30              |
| Среднее ( $\bar{x} \pm$ ) | 19,0 $\pm$ 5,71 | 28,6 $\pm$ 2,42 | 17,9 $\pm$ 4,55 | 17,7 $\pm$ 3,66 | 8,3 $\pm$ 2,84  | 7,3 $\pm$ 1,61  | 8,6 $\pm$ 2,19  | 15,2 $\pm$ 4,56 | 13,8 $\pm$ 3,78 | 13,6 $\pm$ 3,31 |
| Минимум                   | 7,5             | 25,0            | 10,0            | 11,5            | 2,5             | 4,0             | 4,5             | 8,5             | 9,0             | 9,0             |
| Максимум                  | 26,0            | 32,5            | 25,0            | 23,5            | 12,5            | 9,5             | 11,5            | 22,5            | 20,5            | 20,0            |
| V, %                      | 30,0            | 8,5             | 25,5            | 20,6            | 34,3            | 22,0            | 25,3            | 30,0            | 27,4            | 24,4            |
| P, %                      | 4,3             | 1,6             | 4,6             | 3,8             | 5,3             | 4,9             | 4,5             | 5,5             | 5,3             | 5,1             |
| Караульное лесничество    |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| Описательная статистика   | Номер участка   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|                           | 31              | 32              | 33              | 34              | 35              | 36              | 37              | 38              | 39              |                 |
| Среднее ( $\bar{x} \pm$ ) | 22 $\pm$ 3,94   | 17,4 $\pm$ 6,11 | 17,0 $\pm$ 5,96 | 23,6 $\pm$ 4,08 | 22,1 $\pm$ 3,46 | 21,4 $\pm$ 5,40 | 18,6 $\pm$ 6,12 | 18,8 $\pm$ 6,1  | 18,8 $\pm$ 5,63 |                 |
| Минимум                   | 13              | 6               | 5               | 11              | 14              | 9               | 7               | 7               | 7               |                 |
| Максимум                  | 27              | 26              | 26              | 30              | 26              | 27              | 27              | 26              | 27              |                 |
| V, %                      | 17,8            | 35,2            | 35              | 17,3            | 15,6            | 25,2            | 32,9            | 32,5            | 30              |                 |
| P, %                      | 2,9             | 5               | 4,8             | 3,0             | 3,0             | 3,3             | 6,0             | 5,9             | 5,2             |                 |

Примечание: все статистические оценки получены при уровне доверительной вероятности  $p=0,954$ .

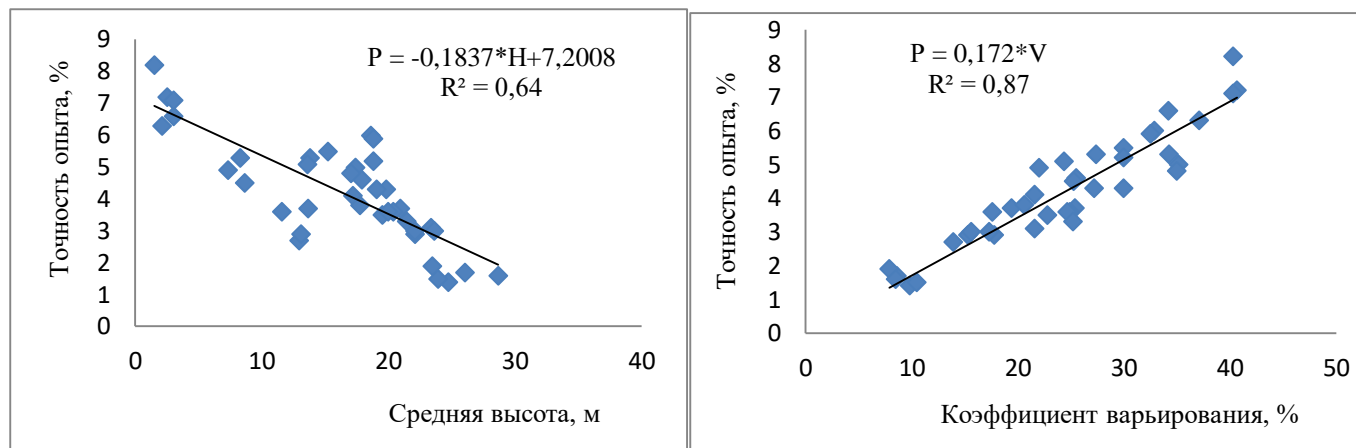


Рис.1 – Связь точности опыта со средними высотами и их изменчивостью

$P(\%) = 2,2198 + 0,1292 \cdot V - 0,0712 \cdot X_{\text{ср}}$ ,  $R=0,96$ ;  $m=0,46\%$ ;  $F=221$ .

Все коэффициенты уравнения значимы так, как  $p < 0,05$ .

На основании уравнения построена таблица 2 определения допустимых параметров сосновых древостоев для получения достоверных оценок высот деревьев. Показатели точности опыта определены для средних высот от 2 до 28 м изменчивости высот от 5 до 45%. При изменчивости высот 40-45% точность опыта не достигает 5% (критическая точность опыта различия оценки выборки и генеральной совокупности). Это указывает на то, что при такой изменчивости высот число учетных деревьев необходимо увеличить.

### Заключение

Таким образом, при проведении измерительных работ можно рекомендовать следующее.

- В молодняках, имеющих значительную разницу высот по ступеням толщины, можно рекомендовать увеличить число измеряемых высот до 5 учетных деревьев для каждой ступени толщины.
- В остальных группах возраста следует считать достаточным измерение 4 учетных дерева в каждой ступени толщины.



Таблица 2 – Достоверные параметры высот деревьев (точность опыта) с учетом средней арифметической высоты и изменчивости высот

| V, %              | Средняя арифметическая высота, м |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                   | 2                                | 4   | 6   | 8   | 10  | 12  | 14  | 16  | 18  | 20  | 22  | 24  | 26  | 28  |
| точность опыта, % |                                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 5                 | 2,7                              | 2,6 | 2,4 | 2,3 | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 1,7 | 1,6 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 0,9 |
| 10                | 3,4                              | 3,2 | 3,1 | 2,9 | 2,8 | 2,7 | 2,5 | 2,4 | 2,2 | 2,1 | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,5 |
| 15                | 4,0                              | 3,9 | 3,7 | 3,6 | 3,4 | 3,3 | 3,2 | 3,0 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,4 | 2,3 | 2,2 |
| 20                | 4,7                              | 4,5 | 4,4 | 4,2 | 4,1 | 3,9 | 3,8 | 3,7 | 3,5 | 3,4 | 3,2 | 3,1 | 3,0 | 2,8 |
| 25                | 5,3                              | 5,2 | 5,0 | 4,9 | 4,7 | 4,6 | 4,5 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 3,9 | 3,7 | 3,6 | 3,5 |
| 30                | 6,0                              | 5,8 | 5,7 | 5,5 | 5,4 | 5,2 | 5,1 | 5,0 | 4,8 | 4,7 | 4,5 | 4,4 | 4,2 | 4,1 |
| 35                | 6,6                              | 6,5 | 6,3 | 6,2 | 6,0 | 5,9 | 5,7 | 5,6 | 5,5 | 5,3 | 5,2 | 5,0 | 4,9 | 4,7 |
| 40                | 7,2                              | 7,1 | 7,0 | 6,8 | 6,7 | 6,5 | 6,4 | 6,2 | 6,1 | 6,0 | 5,8 | 5,7 | 5,5 | 5,4 |
| 45                | 7,9                              | 7,7 | 7,6 | 7,5 | 7,3 | 7,2 | 7,0 | 6,9 | 6,8 | 6,6 | 6,5 | 6,3 | 6,2 | 6,0 |

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Анучин Н.П. Лесная таксация: учебник для вузов. – 5-е изд., доп. / Н.П. Анучин. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 552 с.
2. Алексенков Ю.М. Соотношение высот и диаметров основных лесообразующих пород под воздействием ветровала в Висимском заповеднике / Ю.М. Алексенков, Г.В. Андреев, Е.Г. Поздеев и др. // Аграрный вестник Урала. – 2009. – № 2. – с. 75-77.
3. Кузьмичев В.В. Зависимость высот деревьев от их толщины в сосновых древостоях / В.В. Кузьмичев, В.В. Гончарук // Лесная таксация и лесоустройство: межвуз. сб. науч. тр. – 1993. – с. 9-16.
4. Кузьмичев В.В. Обобщенная зависимость высот от диаметров в сосновых древостоях / В.В. Кузьмичев, А.Г. Неповинных // Научный журнал КубГАУ. – 2008. – № 41 (7).
5. Кузьмичев В.В. Анализ отклонений от кривых роста в высоту деревьев сосны в Минусинских борах / В.В. Кузьмичев, В.Г. Руссков // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 76 (02).
6. Справочник таксатора: учебно-справочное пособие / С.Л. Шевелев, В.В. Кузьмичев, Н.В. Павлов и др. – Красноярск: СибГТУ, 2004. – 172 с.
7. Шевелев С.Л. Таксация лиственничников: учебное пособие / С.Л. Шевелев. – Красноярск: КГТА, 1994. – 128 с.
8. Кулик К.Н. Исследование взаимосвязи между основными таксационными показателями древостоя в защитных лесных насаждениях на юге Приволжской возвышенности в пределах Волгоградской области / К.Н. Кулик, А.В. Кошелев, Н.А. Ткаченко // Лесное хозяйство и зеленое строительство в Западной Сибири. – 2016. – с. 78-83.
9. Мазуркин П.М. Оценка компонентного неравновесия древостоя по кривым высот и диаметров растущих деревьев / П.М. Мазуркин, Э.Н. Бедергдинов, Н.В. Русинова // Успехи современного естествознания: научно-теоретический журнал. – 2009. – №8.
10. Нагимов З.Я. Особенности роста и формирования фитомассы древостоев ели в высокогорьях Южного Урала (на примере г. Малый Иремель) / З.Я. Нагимов и др. // Хвойные бореальной зоны – 2007. – XXIV. – № 4 – 5. – с. 427-430.
11. Скоробогатко Н.Д. Зависимость среднего диаметра на высоте 1,3 метра от средней высоты, качества условий произрастания, полноты и сомкнутости полога в березовых насаждениях для таксационных районов равнинной части Прикамья / Н.Д. Скоробогатко, Л.Е. Дробаха // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2005. – № 10. – с. 58-60.
12. Хлюстов В.К. Моделирование роста смешанных древостоев пойменных лесов Урала / В.К. Хлюстов, М.М. Елекшеева, Ж.Н. Токтасынов // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 6. – с. 41-45.

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

1. Anuchin N.P. Lesnaja taksacija: uchebnik dlja vuzov [Forest taxation: textbook for universities] / N.P. Anuchin. – 5<sup>th</sup> edition. – М.: Lesn. prom-st', 1982. – 552 p. [in Russian]
2. Aleksenkov Ju. M. Sootnoshenie vysot i diametrov osnovnyh lesoobrazujushhih porod pod vozdejstviem vetrovala v Visimskom zapovednike [The ratio of heights and diameters of the main forest-forming trees under the influence of wind in the Visimsky reserve] / Ju. M. Aleksenkov, G. V. Andreev, E. G. Pozdeev et al. // Agrarnyj vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]. – 2009. – № 2. – p. 75–77. [in Russian]
3. Kuz'michev V. V. Zavisimost' vysot derev'ev ot ih tolshhiny v sosnovykh drevostojah [The dependence of the heights of trees on their thickness in a pine forest stands] / V. V. Kuz'michev, V. V. Goncharuk // Lesnaja taksacija i lesoustrojstvo: mezhvuz. sb. nauch. Tr [Forest taxation and forest management: the collection of scientific works as a result of several universities' collaboration]. – 1993. – p. 9–16. [in Russian]
4. Kuz'michev V. V. Obobshhennaja zavisimost' vysot ot diametrov v sosnovykh drevostojah [Generalized dependence of the heights on the diameters in pine forest stands] / V. V. Kuz'michev, A. G. Nepovinnyh // Nauchnyj zhurnal KubGAU [The scientific journal of the Kuban State Agrarian University]. – 2008. – № 41 (7). [in Russian]
5. Kuz'michev V. V. Analiz otklonenij ot krivyh rosta v vysotu derev'ev sosny v Minusinskih borah [The analysis of certain deviations from the growth curves in the height of pine trees in Minusinsk forests] / V. V. Kuz'michev, V. G. Russkov // Nauchnyj zhurnal KubGAU [The scientific journal of the Kuban State Agrarian University]. – 2012. – № 76 (02). [in Russian]
6. Shevelev S. L. Spravochnik taksatora: uchebno-spravochnoe posobie [Taxiator's Handbook: educational reference guide] / S. L. Shevelev, V. V. Kuz'michev, N. V. Pavlov et al. – Krasnojarsk: SibGTU, 2004. – 172 p. [in Russian]
7. Shevelev S. L. Taksacija listvennichnikov: uchebnoe posobie [The taxation of larch trees: textbook] / S. L. Shevelev. – Krasnojarsk: KGTA, 1994. – 128 p. [in Russian]
8. Kulik K. N. Issledovanie vzaimosvjazi mezhdu osnovnymi taksacionnymi pokazateljami drevostoja v zashhitnyh lesnyh nasazhdenijah na juge Privolzhskoj vozvysennosti v predelakh Volgogradskoj oblasti [The research of the relationship between the main taxational indicators of the forest stands in the protective forest stands in the South of the Volga upland within the Volgograd region] / K. N. Kulik, A. V. Koshelev, N. A. Tkachenko // Lesnoe hozjajstvo i zelenoe stroitel'stvo v Zapadnoj Sibiri [Forestry and green construction in Western Siberia]. – 2016. – p. 78–83. [in Russian]
9. Mazurkin P. M. Ocenka komponentnogo neravnovesija drevostoja po krivyim vysot i diametrov rastushhih derev'ev [Estimation of the component disequilibrium of the forest stand according to the curves of heights and diameters of growing trees] / P. M. Mazurkin, Je. N. Bederdjinov, N. V. Rusinova // Uspеhi sovremennogo estestvoznanija: nauchno-teoreticheskij zhurnal [The success of modern natural science: scientific and theoretical journal]. – 2009. – №8. [in Russian]
10. Nagimov Z. Ja. Osobennosti rosta i formirovaniya fitomassy drevostoev eli v vysokogor'jah Juzhnogo Urala (na primere g. Malyj Iremel') [The features of growth and formation of phytomass of spruce stands in the highlands of the southern Urals (on the example of Malyj Iremel')] / Z. Ja. Nagimov et al. // Hvojnye boreal'noj zony [Coniferous boreal areas]. – 2007. – XXIV. – № 4 – 5. – p. 427–430. [in Russian]
11. Skorobogat'ko N. D. Zavisimost' srednego diametra na vysote 1,3 metra ot srednej vysoty, kachestva uslovij proizrastanija, polnoty i somknutosti pologa v berezovykh nasazhdenijah dlja taksacionnyh rajonov ravninnoj chasti Prikam'ja [The dependency of the average diameter at a height of 1.3 meters on the average height, quality of growing conditions, closeness of the canopy in the birch plantations for taxational areas of the flat part of the Kama river] / N. D. Skorobogat'ko, L. E. Drobaha // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Topical problems of the forest complex]. – 2005. – № 10. – p. 58–60. [in Russian]
12. Hljustov V. K. Modelirovanie rosta smeshannyh drevostoev pojmennyh lesov Urala [The modeling of the growth of mixed stands of floodplain forests in the Urals] / V. K. Hljustov, M. M. Eleksheeva, Zh. N. Toktasynov // Agrarnyj nauchnyj zhurnal [Agrarian scientific journal]. – 2017. – № 6. – p. 41–45. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.027>

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ИЗУЧАЕМЫХ СОРТОВ КАРТОФЕЛЯ В УСЛОВИЯХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Научная статья

Жигадо Т.Э. \*

ORCID: 0000-0001-8605-0196,

Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова, Полярная опытная станция – филиал ВИР, г. Апатиты, Россия

\* Корреспондирующий автор (hibinytanya[at]rambler.ru)

### Аннотация

Целью исследования было изучение в экстремальных условиях Севера селекционных сортов картофеля, и выделение источников ценных признаков для селекции. Данные исследования проведены в 2017-2019 гг. на опытном поле Полярной опытной станции филиала ВИР. По основным хозяйственно-ценным признакам (скороспелость, товарность, урожайность, содержание крахмала, устойчивость к различным заболеваниям) было изучено 23 образца картофеля из Коллекции генетических ресурсов растений ВИР. Выделенные источники ценных признаков могут быть использованы для получения новых сортов, пригодных для возделывания в районах Крайнего Севера.

**Ключевые слова:** сорта картофеля, крахмал, раннеспелость, продуктивность, вкусовые качества, устойчивость к болезням.

## THE COMPREHENSIVE ESTIMATION OF THE STUDIED POTATO VARIETIES IN THE MURMANSK REGION

Research article

Zhigadlo T. E. \*

ORCID: 0000-0001-8605-0196,

Vavilov all-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Polar experimental station - VIR branch, Apatity, Russia

\* Corresponding author (hibinytanya[at]rambler.ru)

### Abstract

The purpose of the research was to study the selection of potato varieties in the extreme conditions of the North, and to identify the sources of valuable selection traits. These studies were conducted in 2017-2019 at the testing field of the Polar experimental station of the VIR branch. 23 potato samples from the VIR collection of plant genetic resources were studied according to the main economic and valuable characteristics (early-maturing, marketability, harvesting capacity, starch content, resistance to various diseases). The selected sources of good selection traits can be used to produce new varieties suitable for cultivation in the conditions of the Far North.

**Keywords:** potato varieties, starch, early maturity, fruitfulness, taste, disease resistance.

### Введение

Полярная опытная станция ВИР является ведущим учреждением в Мурманской области по исследованию сельскохозяйственных культур в экстремальных условиях Севера. Изучение картофеля началось практически сразу с момента основания станции в 1923 году, и по настоящее время работа успешно продолжается. На станции хранится и поддерживается дублетная Мировая коллекция картофеля в количестве более 3000 образцов из разных стран мира. Ежегодно коллекция изучения пополняется новыми сортами и гибридами. Сорта изучаются по основным биологическим и хозяйственно ценным качествам. Лучшие из них рекомендуются для использования в селекционных программах для создания новых сортов для Мурманской области [1, С. 32].

Мурманская область представляет собой северную границу возделываемых культурных растений в европейской части Российской Федерации. Почвенно-климатические характеристики данной территории имеют экстремальный характер и предъявляют жесткие требования к биологическим особенностям выращиваемых сельскохозяйственных культур [2, С. 3].

Климат Мурманской области отличается от климата других северных регионов страны тем, что она целиком расположена за Полярным кругом, и характеризуется большим дефицитом тепла и коротким вегетационным периодом. Нестабильность климата сильно влияет на накопление урожая картофеля, на его вкусовые качества и сохранность клубней. Одним из путей решения проблемы является изучение сортимента новых сортов картофеля для их адаптации в районах Крайнего Севера [3, С. 31]. Поэтому целью исследования стало изучение образцов мировой коллекции картофеля для выявления источников ценных признаков, которые могут быть использованы для создания новых сортов картофеля для Мурманской области.

### Методы и принципы исследования

Размер участка, занятого под коллекцией изучения, составил 0,05 га; площадь питания 70х30 см. Образцы высаживались в один ряд по 10 растений каждого сорта. Через каждые 10 образцов располагался сорт-стандарт – Хибинский ранний (к-6928). Соблюдена агротехника, принятая для выращивания картофеля в условиях Мурманской области [4, С. 93-99].

Перед посадкой клубни проращивали на свету в течение 39-40 дней [5, С. 11]. В течение вегетативного периода проводились фенологические наблюдения за растениями (всходы, массовые всходы, бутонизация, цветение, массовое цветение, ягодообразование). В период цветения картофеля провели визуальную оценку поражения растений вирусными и грибными заболеваниями [6, С. 14-16; 7, С. 20-26]. Хозяйственно-ценные признаки картофеля

(скороспелость, продуктивность, урожайность, товарность, содержание крахмала в клубнях) определяли согласно методическим рекомендациям ВИР [7, С. 6-9]. Скороспелость определяли путем выкапывания кустов на 60 день от посадки. Продуктивность учитывали после окончательной уборки, оценивая вес клубней с одного куста, число товарных клубней, среднюю массу товарного клубня, товарность клубней. Данные по урожайности сортов картофеля сравнивали со стандартным сортом Хибинский ранний. Содержание крахмала в клубнях определяли по удельному весу путём их взвешивания в воде, с применением номограмм Эдгара и Назаренко [7, С.9]. Дегустационную оценку провели согласно методическим рекомендациям [8, С.89]. Во время хранения проводили оценку поражения коллекционных образцов болезнями: ризоктониозом, фомозом, ооспорозом, паршой обыкновенной, фитофторозом. Также в период хранения определяли продолжительность биологического покоя клубней. Оценивают период покоя клубней по 9-балльной шкале [7, С.8].

Для характеристики климатических условий применён Гидротермический коэффициент (ГТК) по Г.Т. Селянинову [9].

В годы исследований метеорологические условия были различными. В 2017 году сумма активных температур за период июнь-август составила 912,9°C, сумма выпавших осадков – 281,2 мм. Средняя температура воздуха за период вегетации 11,5°C. Вегетационный период характеризовался как прохладный и дождливый (ГТК = 2,0). В 2018 году сумма активных температур за период июнь-август составила 1171,8°C, сумма выпавших осадков – 134,8 мм. Средняя температура воздуха за период вегетации 14,2°C. Вегетационный период характеризовался как тёплый и слабо засушливый (ГТК = 1,2). В 2019 году сумма активных температур за период июнь-август составила 1081,0°C, сумма выпавших осадков – 132,8 мм. Средняя температура воздуха за период вегетации 13,7°C. Вегетационный период характеризовался как тёплый и сухой (ГТК = 1,1).

### Основные результаты

**Фенология.** В среднем по коллекции всходы наблюдали на 15 день от посадки, появление массовых всходов – на 21 день от посадки, фазу бутонизации – на 41 день, цветение и массовое цветение было зарегистрировано на 53 и 59 день соответственно. Самые сжатые сроки прохождения всех фенологических фаз отметили у образца Местный из Грузии (к-25298) и у сорта Северное сияние (к-25344). В течение трёх лет не было цветения у сорта Actrice (к-25242). В данной коллекции, у изучаемых образцов картофеля в течение трёх лет стабильного ягодообразования не наблюдали. Единичные ягоды образовались только в 2018 году у сортов: Репанка (к-25299), Мирас (к-25304), Амур (к-25310), Арамис (к-25337), Фрителла (к-25345), Arsenal (к-25316), Gui Valley (к-25319), Red Fantasy (к-25324). Это объясняется тем, что метеоусловия вегетационного периода 2018 года были более благоприятны для ягодообразования [10, С. 113].

**Хозяйственно-ценные признаки.** По результатам многолетних исследований по раннему накоплению урожая выделен сорт Шаруа (к-25261) (119 % к стандарту или 7 баллов) – 561,7 г с куста. Урожайность Хибинского раннего в пробной копке в среднем за три года составила 473,3 г с куста. По продуктивности (103-126 % к стандарту или 7 баллов) за годы изучения выделились 6 образцов: Тяньшанский (к-25308), Тамыз (к-5307), Репанка, Арамис, Амур, Кортни (к-25341). Урожайность этих сортов составила: от 723,9 до 883,5 г с куста. Средняя продуктивность сорта стандарта в окончательной уборке – 703,1 г с куста. Самым высоким содержанием крахмала характеризовался образец из Южной Кореи – Gui Valley (15,7 %). В клубнях Хибинского раннего содержание крахмала составило 11,1 %.

Образец Шаруа выделен, как продуктивный сорт (145 % к стандарту или 7 баллов) в сочетании с раннеспелостью. Продуктивность сорта – 1018,1 г с куста. Сорт Мирас выделен как продуктивный (101 % к стандарту) и крахмалистый (15,4 % или 5 баллов). Фрителла отмечен как продуктивный (105 % к стандарту), крупноклубнёвый сорт (средняя масса товарного клубня – 108,2 г) с высокой товарностью клубней (89,9 %).

12 образцов коллекции характеризовались в течение трёх лет ровными без дефектов клубнями: Actrice, София (к-25256), Шаруа, Местный из Грузии, Gui Valley, Jelly (к-25320), Red Fantasy, Местный из Грузии (к-25326), Арамис, Башкирский (к-25338), Кортни и Северное сияние.

**Дегустационная оценка.** Анализ вкусовых качеств мякоти клубней картофеля у изучаемых сортов показал, что в основном оценка вкуса удовлетворительная (3,1-3,6 балла). Хороший вкус мякоти (3,8-4,1 балла) имели сорта: Люкс (к-25457), Урал-1 (к-25333), Гулливер (к-25455), Gui Valley, Red Fantasy.

**Устойчивость к болезням.** За годы исследований клубни всех образцов поражались болезнями хранения. Из 23 образцов коллекции 4 сорта за три года изучения не поражались болезнями хранения (ооспорозом, фомозом, паршой, ризоктониозом): Местный из Грузии, Тамыз, Арамис и Кортни. Свободными от вирусов в поле были сорта: Пегий (к-25254), Тяньшанский, Лекарь (к-25344) и Фрителла.

**Период биологического покоя.** В основном образцы характеризовались длинным периодом биологического покоя клубней (прорастание через 7 месяцев после уборки).

### Заключение

В результате комплексного изучения хозяйственно ценных признаков сортов картофеля в условиях Мурманской области в 2017-2019 гг. выделены следующие сорта: по быстрому прохождению фенофаз – Местный из Грузии (к-25298) и Северное Сияние (к-25344); по урожайности – Шаруа (к-25261), Тяньшанский (к-25308), Тамыз (к-25307), Репанка (к-25299), Арамис (к-25337), Амур (к-25310), Кортни (к-25341); по содержанию крахмала – Gui Valley (к-25319); по устойчивости к грибным заболеваниям – Местный из Грузии (к-25298), Тамыз (к-25307), Арамис (к-25337), Кортни (к-25341); по устойчивости к вирусам – Пегий (к-25254), Тяньшанский (к-25308), Лекарь (к-25344), Фрителла (к-25345).

Выделенные источники ценных признаков из коллекции изучения на Полярной опытной станции ВИР могут использоваться в селекционных программах для создания новых сортов картофеля, пригодных для возделывания в северных условиях.

**Финансирование**

Работа выполнена в соответствии с государственным бюджетным проектом ВИР № 0662-2019-0004.

**Funding**

The work was carried out in accordance with the VIR state budget project No. 0662-2019-0004.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Жигадло Т.Э. Характеристика образцов картофеля по биологическим и хозяйственно важным признакам в условиях Мурманской области / Т.Э. Жигадло, С.Н. Травина // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019;180(3):32-35. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-3-32-35
2. Костюк В.И. Экология культурных растений на Кольском Севере / В.И. Костюк. Апатиты: Кольский научный центр РАН. – 2012. – 169 с.
3. Жигадло Т.Э. Ранний картофель для Севера / Т.Э. Жигадло // Картофель и овощи, 2016. № 2. – С. 31-32
4. Система ведения сельского хозяйства в Мурманской области / Аникина С. А., Арчакова Л. И., Бишов Э. А. и др. под ред. Чемисова И. А.; Мурманск. - 1983. - 232 с.
5. Мельничук Г.Д. Физиология и биохимия картофеля на Кольском Севере / Г.Д. Мельничук, В.И. Костюк, Н.Т. Куликова. Апатиты: Кольский научный центр РАН. – 1997. – 162 с.
6. Международный классификатор СЭВ видов картофеля секции Tuberarium (Dun.) Buk. рода Solanum L. / сост.: Задина Н., Виднер И., Майор М., Бареш И., Одегнал В., Баранек Н., Букасов С., Будин К., Камераз А., Лехнович В., Костина Л., Бавыко Н., Корнейчук В.; Ленинград: ВИР. - 1984. - 43 с.
7. Методические указания по поддержанию и изучению мировой коллекции картофеля / сост. Киру С.Д., Костина Л.И., Трускинов Э.В., Зотеева Н.М., Рогозина Е.В., Королева Л.В., Фомина В.Е., Палеха С.В., Косарева О.С., Кирилов Д.А. - Санкт-Петербург: ВИР; 2010. – 27 с.
8. Методические указания – изучение технологических свойств картофеля / под ред. Комарова В.И.; Ленинград. - 1988. – 133 с.
9. Коровин А.И. Растения и экстремальные температуры / А.И. Коровин. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 271 с.
10. Травина С.Н. Репродукционный потенциал образцов картофеля из коллекции ВИР в условиях Мурманской области / С.Н. Травина, Т.Э. Жигадло // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019;180(3):110-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-3-110-115

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

1. Zhigadlo T.E. Kharakteristika obraztsov kartofelya po biologicheskim i khozyaystvtanno vazhnym priznakam v usloviyakh Murmanskoy oblasti [Characterization of potato accessions according to their biological and economically useful traits in the environments of Murmansk Province] / Zhigadlo T.E., Travina S.N. // Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2019;180(3):32-35. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-3-32-35[in Russian]
2. Kostyuk V.I. Ekoogiya kul'turnykh rasteniy na Kol'skom Severe [Ecology of cultivated plants in the Kola North] / Kostyuk V.I. – Apatity: Cola Science Center of RAS. 2012. – 169 p. [in Russian]
3. Zhigadlo T.E. Ranniy kartofel' dlya Severa [Early potato for North] / Zhigadlo T.E // Potato and Vegetables, 2016, number 2. – P. 31-32 [in Russian]
4. Sistema vedeniya sel'skogo khozyaystva v Murmanskoy oblasti [The agricultural system in the Murmansk region] / Anikina S. A., Archakova L. I., Bishov E. A. et al. Ed. Chemisova I. A.; Murmansk: 1983. – 232 p. [in Russian]
5. Melnichuk G.D. Fiziologiya i biochimiya kartofelua na Kol'skom Severe [Physiology and biochemistry of potato in the Kola North] / Melnichuk G.D., Kostyuk V.I., Kulikova N.T. - Apatity: Cola Science Center of RAS. 1997. – 162 p. [in Russian]
6. Mezhdunarodnyy klassifikator SEV vidov kartofelya seksii Tuberarium (Dun.) Buk. Roda Solanum L., [CMEA International Classifier of Potato species of the Tuberarium (Dun.) Buk. Section. genus Solanum L.] / compiled by: Zadina J., Vidner I., Major M., Bareš I., Odehnal V., Baranek N., Bukasov S., Budin K., Kameraz A., Lekhnovitch V., Kostina L., Bavyko N., Korneychuk V. – Leningrad: VIR. 1984. – 43 p. [in Russian]
7. Metodicheskiye ukazaniya po podderzhaniyu i izucheniyu mirovoy kollektsii kartofelya [Guidelines for the maintenance and study of the global potato collection]. Kiru S.D., Kostina L.I., Truskinov E.V., Zoteeva N.M., Rogozina E.V., Koroleva L.V., Fomina V.E., Palekha S.V., Kosareva O.S., Kirilov D.A. St. Petersburg: VIR; 2010. [in Russian]
8. Metodicheskiye ukazaniya: izucheniye tekhnologicheskikh svoystv kartofelya [Guidelines: a study of the technological properties of potatoes] ed. Komarova V. I.; Leningrad: 1988. – 133 p. [in Russian]
9. Korovin A.I. Rasteniya i ekstremal'nyye temperatury [Plants and extreme temperatures] / Korovin A.I. – Leningrad: Gidrometeoizdat; 1984. - 271 p. [in Russian]
10. Travina S.N. Reproduktsionnyy potentsial obraztsov kartofelya iz kollektsii VIR v usloviyakh Murmanskoy oblasti [Reproductive potential of potato accessions from the VIR collection in Murmansk Province] / Travina S.N., Zhigadlo T.E. // Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2019;180(3):110-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-3-110-115[in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.028>**ЛЕСОВОДСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ СОСНЯКА ЗЕЛЕНОМОШНО-ЯГОДНИКОВОГО ПОДЗОНЫ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ**

Научная статья

**Башагуров К.А.<sup>1</sup>, Белов Л.А.<sup>2</sup>, Залесова Е.С.<sup>3</sup>, Залесов С.В.<sup>4</sup>\***<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-9050-8902;<sup>2</sup>ORCID: 0000-0002-6397-3681;<sup>3</sup>ORCID: 0000-0003-4403-8118;<sup>4</sup>ORCID: 0000-0003-3779-410x;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

\* Корреспондирующий авторы (Zalesovsv[at]m.usfeu.ru)

**Аннотация**

Проанализированы количественные и качественные показатели подроста при проведении минерализации почвы на вырубке после рубки спелых и перестойных насаждений с последующим лесовозобновлением. Установлено, что минерализация почвы бульдозером в условиях сосняка зеленомошно-ягодникового подзоны северной тайги Ханты-Мансийского автономного округа - Югры обеспечивает формирование сосновых молодняков без создания лесных культур.

**Ключевые слова:** сплошнолесосечная рубка, подзона северной тайги, лесовозобновление, минерализация почвы, подрост, сосна обыкновенная.

**FORESTRY EFFICIENCY OF SOIL MINERALIZATION UNDER CONDITIONS OF PLEUROCARPOUS MOSS BLUEBERRY PINE FOREST IN NORTHERN TAIGA SUBZONE**

Research article

**Bashagurov K.A.<sup>1</sup>, Belov L.A.<sup>2</sup>, Zalesova E.S.<sup>3</sup>, Zalesov S.V.<sup>4</sup>\***<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-9050-8902;<sup>2</sup>ORCID: 0000-0002-6397-3681;<sup>3</sup>ORCID: 0000-0003-4403-8118;<sup>4</sup>ORCID: 0000-0003-3779-410x;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

\* Corresponding authors (Zalesovsv[at]m.usfeu.ru)

**Abstract**

The authors analyzed quantitative and qualitative indicators of new growth during the mineralization of soil in the felling after logging of ripe and overripe plantings with subsequent reforestation. It was established that mineralization of the soil with a bulldozer under the conditions of pleurocarpous moss blueberry pine forests in the northern taiga subzone of the Khanty-Mansiysk Autonomous District – Yugra ensures the formation of young pine trees without creating forest crops.

**Keywords:** clear-felling, northern taiga subzone, reforestation, soil mineralization, undergrowth, Scots pine.

Одним из основных антропогенных факторов оказывающих влияние на лесные насаждения являются рубки. При этом в практике лесопользования уже более 100 лет абсолютно доминируют сплошнолесосечные рубки. Последние, в свою очередь, в соответствии с действующими нормативными документами, делятся на рубки с предварительным и последующим лесовосстановлением. В первом случае для успешного лесовосстановления вырубок достаточно сохранить в процессе проведения лесосечных работ имеющийся подрост предварительной генерации. Многочисленные исследования, выполненные в различных регионах страны, наглядно показали наличие подроста предварительной генерации под пологом спелых и перестойных насаждений различных формаций [1], [4], [5].

Именно подрост предварительной генерации создает условия для переформирования производных мягколиственных насаждений в коренные хвойные [6], [7], [8] и позволяет сформировать высокопроизводительные хозяйственно-ценные молодняки на вырубках, не прибегая к искусственному лесовосстановлению [9], [10].

В насаждениях, где подрост отсутствует, сплошнолесосечные рубки планируются с последующим лесовосстановлением. При этом в качестве способа лесовосстановления планируется либо создание лесных культур, либо проведение мер содействия естественному лесовозобновлению. В различных литературных источниках отмечается как преимущество искусственных насаждений над естественными, так и обратная картина [11], [12].

Особо следует отметить, что создание лесных культур требует значительно больших трудовых и финансовых затрат по сравнению с мерами содействия естественному лесовосстановлению, в частности с минерализацией почвы. Не случайно правильный выбор способа лесовосстановления является одним из направлений повышения продуктивности лесов [13], [14].

В то же время в научной литературе до настоящего времени недостаточно данных о лесоводственной эффективности различных мер содействия естественному лесовозобновлению. Не является исключением в этом плане и подзона северной тайги. Последнее определило направление наших исследований.

Цель работы - установление лесоводственной эффективности минерализации почвы в условиях сосняка зеленомошно-ягодникового подзоны северной тайги Ханты-Мансийского автономного округа - Югры.

**Объекты и методика исследований**

Объектом исследований служили рубки, сформировавшиеся после сплошнолесосечных рубок с последующим лесовосстановлением в сосняках зеленомошно-ягодникового типа леса Хуранского участкового лесничества



Няксимвольского лесничества Ханты-Мансийского автономного округа - Югры (ХМАО-Югры). В соответствии с действующим лесохозяйственным районированием [15] территория района исследований относится к Западно-Сибирскому северо-таежному равнинному лесному району.

В 2019 г. были обследованы вырубki, на которых в 2013 и 2014 гг. производилась минерализация почвы отвалом бульдозера. В процессе выполнения работ по минерализации порубочные остатки сгребались бульдозером в центр трелевочного волока с обеих его сторон. При этом ширина вала перемешанных с почвой порубочных остатков составляла 3-4 м при высоте 1,5-2,0 м и ширине минерализованных полос 2,1-2,2 м (рис. 1). Общая площадь минерализованной поверхности вырубки при этом составляла 30-35%.

Особо следует отметить, что все вырубки характеризовались близкими лесорастительными условиями и ровным рельефом. Последнее особенно важно, поскольку использование бульдозера при минерализации почвы на склонах может вызвать эрозию почвы. Рубка древостоев производилась в зимний период, что создало возможность сохранения на пасеках между волоками тонкомера и подроста. К сожалению, количества последнего было недостаточно для проектирования рубок с предварительным лесовозобновлением. Ширина вырубok составляла 200 м, что обеспечивало налет семян от стен примыкающих древостоев.

Учет естественного лесовосстановления проводился методом учетных площадок размером  $2 \times 2$  м на минерализованных полосах [16], [17], [19]. На каждой из четырех обследованных вырубok закладывалось по 50 учетных площадок через равные расстояния. В пределах каждой учетной площадки выполнен сплошной пересчет подроста, с подразделением его по породам, высоте и жизненному состоянию.



Рис. 1 – Внешний вид вырубok с минерализацией почвы, выполненной бульдозером

В лабораторных условиях установлены количественные показатели подроста и выполнен перерасчет его на крупный. При этом для мелкого подроста использовался коэффициент 0,5, среднего - 0,8 и крупного 1 [17].

### Результаты и обсуждение

Обработка собранных материалов позволила установить основные таксационные показатели подроста, сформировавшегося на минерализованной части вырубки (табл. 1).



Таблица 1 – Характеристика подроста на минерализованной части вырубki

| № ПП | Порода      | Количество и встречаемость жизнеспособного подростa |                  |                   |                  | Количество подростa в пересчете на крупный, шт/га | Состав подростa в пересчете на крупный | Давность минерализации, лет |
|------|-------------|---|------------------|-------------------|------------------|---|--|-----------------------------|
|      |             | Мелкий  |                  | Средний           |                  |   |  |                             |
|      |             | количество, шт/га                                   | встречаемость, % | количество, шт/га | встречаемость, % |   |  |                             |
| 1    | Сосна       | 25833   | 93               | 1667              | 67               | 14250   | 7СЗБ+Л                                 | 5                           |
|      | Береза      | 9167  | 73               | 2333              | 60               | 6450  |  |                             |
|      | Лиственница | 667   | 27               | 500               | 20               | 733   |  |                             |
|      | Итого       | 35667   |                  | 4500              |                  | 21433   |  |                             |
| 2    | Сосна       | 40250   | 70               | 2250              | 60               | 21925   | 8С1Б1Л                                 | 5                           |
|      | Береза      | 3250  | 60               | 1500              | 40               | 2825  |  |                             |
|      | Лиственница | 1250  | 40               | 1500              | 50               | 1825  |  |                             |
|      | Итого       | 44750   |                  | 5250              |                  | 26575   |  |                             |
| 3    | Сосна       | 31500   | 100              | 1167              | 27               | 16683   | 7СЗБ                                   | 4                           |
|      | Береза      | 3667  | 87               | 3333              | 60               | 4500  |  |                             |
|      | Итого       | 35167   |                  | 4500              |                  | 21183   |  |                             |
| 4    | Сосна       | 20333   | 100              | 1500              | 33               | 11367   | 8С2БедЛ                                | 4                           |
|      | Береза      | 2667  | 53               | 1167              | 20               | 2267  |  |                             |
|      | Лиственница | 167   | 7                | 0                 | 0                | 83  |  |                             |
|      | Итого       | 23167   |                  | 2667              |                  | 13717   |  |                             |

Материалы таблицы наглядно свидетельствуют о высокой эффективности минерализации почвы в условиях сосняка зеленомошно-ягодникового. Спустя 4-5 лет после проведения работ по минерализации количество жизнеспособного подростa сосны варьируется от 21833 до 42500 шт/га. Поскольку период между минерализацией почвы и проведением исследований составлял всего 4 и 5 лет на участках минерализации имеют место лишь всходы, а также мелкий и средний подрост. Другими словами, отсутствует подрост высотой более 1,5 м. При этом средняя высота мелкого и среднего подростa спустя 5 лет после минерализации составляет  $34 \pm 0,5$  и  $101 \pm 3,7$  см, соответственно. В то время как спустя 4 года после минерализации средние высоты мелкого и среднего подростa составляют  $28 \pm 0,3$  и  $76 \pm 1,5$  см. Помимо жизнеспособного подростa сосны на вырубках имеет место подрост лиственницы в количестве до 2750 шт/га. Другими словами, на минерализованных участках вырубok наблюдается интенсивное накопление подростa (рис. 2 и 3).



Рис. 2 – Внешний вид участка минерализации на ПП-1





Рис. 3 – Внешний вид участка минерализации вырубki (ПП-2)

Успешность минерализации почвы во многом объясняется правильностью ее проведения. При проведении работ было обеспечено сплошное удаление порубочных остатков и живого напочвенного покрова, что исключило зависание семян и выпадение их на минеральный слой и почвы.

Особо следует отметить, что перемешивание порубочных остатков на трелевочных волоках с почвой привело к их интенсивной деструкции и появлению всходов хвойных пород на трелевочном волоке.

Известно, что максимальное количество подроста предварительной генерации, если таковой имеется, сохраняется в середине пазух между трелевочными волоками. Выполненная минерализация почвы, напротив, приурочена к трелевочным волокам, что позволяет надеяться на сохранение подроста предварительной генерации.

Для района исследований Правилами лесовосстановления [17] установлены следующие требования для перевода их в категорию молодняков, т.е. в покрытую лесной растительностью площадь: возраста подроста 10 лет, количество деревьев главных пород не менее 1,7 тыс. шт/га и средняя высота и менее 0,8 м. Выполненные нами исследования показали, что количество подроста сосны в пересчете на крупный через 5 лет после проведения работ по минерализации составляет от 14,3 до 21,9 тыс. шт/га, а спустя 4 года 11,4-16,7 тыс. шт/га. Даже с учетом того, что площадь минерализации составляет 30-35% от общей площади вырубki количество жизнеспособного подроста хвойных пород в пересчете на крупный спустя 4 года после проведения работ по минерализации составляет 3,5-5,1 тыс. шт/га, а спустя 5 лет после минерализации 4,5-7,2 тыс. шт/га. Таким образом, спустя 4-5 лет после проведения минерализации бульдозером в условиях подзоны северной тайги ХМАО-Югры количества жизнеспособного подроста сосны и лиственницы вполне достаточно для перевода вырубki в покрытую лесной растительностью площадь.

Анализ искусственных насаждений показал, что густота создания лесных культур в районе проведения исследований составляет 4,0 тыс. шт/га. При этом средняя приживаемость по Хуранскому участковому лесничеству равняется 30%. Другими словами, уже через год после посадки густота лесных культур не превышает в среднем 1,1 тыс. шт/га, что значительно ниже показателей густоты подроста сосны и лиственницы спустя 4-5 лет после проведения работ по минерализации почвы.

Особо следует отметить, что сдирание в процессе минерализации живого напочвенного покрова в полосах шириной 2,1-2,2 м создает условия для появления самосева в течение длительного периода. Появление всходов сосны и лиственницы продолжается, что обеспечивает накопление подроста и повышение показателей его встречаемости.

В первые 5 лет после проведения работ по минерализации почвы бульдозером мягколиственные породы не оказывают отрицательного влияния на подрост хвойных пород, поскольку практически не обгоняют их в росте по причине семенного происхождения и относительно невысокой доле в составе подроста. В то же время в будущем следует запланировать рубки ухода в молодняках с целью снижения доли лиственных пород в составе формирующихся насаждений.

**Выводы**

1. В условиях сосняка зеленомошно-ягодникового минерализация почвы бульдозером на вырубках обеспечивает накопление подроста сосны и лиственницы.
2. При минерализации 30-35% площади вырубки уже через 5 лет количество подроста хвойных пород достаточно для перевода ее в покрытую лесной растительностью площадь.
3. Подрост сосны характеризуется высокими показателями встречаемости, что также свидетельствует о высокой лесоводственной эффективности минерализации почвы.
4. Доля березы в составе подроста в первые 5 лет после минерализации почвы не превышает 30% по густоте. Однако в будущем следует планировать рубки ухода для снижения ее доли в составе формирующихся насаждений.
5. Стребание живого напочвенного покрова, верхнего горизонта почвы и порубочных остатков на трелевочные волокна способствует ускорению процессов деструкции древесины и биологического круговорота питательных элементов.
6. Создание лесных культур в условиях сосняка зеленомошно-ягодникового подзоны северной тайги нецелесообразно, поскольку значительно эффективнее заменить их минерализацией почвы с использованием бульдозера.

**Конфликт интересов**

Не указан

**Conflict of interest**

Non declared

**Список литературы / References**

1. Дебков Н.М. Обеспеченность осинников средней тайги подростом предварительной генерации (на примере Томской области) / Н.М. Дебков, С.В. Залесов, А.С. Оплетев // Аграрный вестник Урала, 2015. № 12 (142). С. 48-53.
2. Ведерников Е.А. Обеспеченность подростом спелых и перестойных темнохвойных насаждений Пермского края / Е.А. Ведерников, С.В. Залесов, Е.С. Залесова, А.Г. Магасумова, О.В. Толкач // Лесн. журн. 2019. № 3. С. 32-42 (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn. 0536-1036. 2019. 3.32.
3. Залесова Е.С. Обеспеченность спелых и перестойных светлохвойных насаждений Западно-Уральского таежного лесного района подростом предварительной генерации / Е.С. Залесова, С.В. Залесов, Г.Г. Терехов, О.В. Толкач, Н.А. Луганский, Д.А. Шубин // Успехи современного естествознания, 2019. № 1. С. 39-44.
4. Калачев А.А. Качество подроста пихты сибирской под пологом пихтовых и березовых насаждений Рудного Алтая / А.А. Калачев, С.В. Залесов // Аграрный вестник Урала, 2014. № 4 (122). С. 64-67.
5. Данчева А.В. Динамика естественного возобновления под пологом сосновых насаждений Казахского мелкосопочника / А.В. Данчева, С.В. Залесов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета, 2013. № 3 (27). С. 126-128.
6. Оплетев А.С. Переформирование производных мягколиственных насаждений в лиственничники на Южном Урале / А.С. Оплетев, С.В. Залесов. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. 178 с.
7. Казанцев С.Г. Оптимизация лесопользования в производных березняках Среднего Урала / С.Г. Казанцев, С.В. Залесов, А.С. Залесов. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. 156 с.
8. Абрамова Л.П. Рубки обновления и переформирования в лесах Урала / Л.П. Абрамова, С.В. Залесов, С.Г. Казанцев, Н.А. Луганский, А.Г. Магасумова. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. 264 с.
9. Залесов С.В. Естественное лесовосстановление на вырубках Тюменского севера / С.В. Залесов, Е.П. Платонов, К.И. Лопатин, Г.А. Годовалов // ИВУЗ «Лесной журнал», 1996. № 4-5. С. 51-58.
10. Калачев А.А. Лесоводственная эффективность сплошнолесосечных рубок в пихтовых лесах Рудного Алтая / А.А. Калачев, Т.А. Архангельская, С.В. Залесов // Аграрный вестник Урала, 2014. № 4 (122). С. 60-63.
11. Залесов С.В. Рост и продуктивность сосняков искусственного и естественного происхождения. / С.В. Залесов, А.Н. Лобанов, Н.А. Луганский. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. 112 с.
12. Залесов С.В. Опыт создания лесных культур на солонцах хорошей лесопригодности / С.В. Залесов, О.В. Толкач, И.А. Фрейберг, Н.Ф. Черноусова // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 9. С. 42-47.
13. Залесов С.В. Научное обоснование системы лесоводственных мероприятий по повышению продуктивности сосновых лесов Урала: Дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2000. 380 с.
14. Луганский Н.А. Повышение продуктивности лесов / Н.А. Луганский, С.В. Залесов, В.А. Щавровский. - Екатеринбург: УЛТИ, 1995. 297 с.
15. Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации: Утв. Приказом Минприроды России от 18.08.2014 г. № 367. [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru)
16. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов / А.В. Побединский. - М.: Наука, 1966. 64 с.
17. Правила лесовосстановления: Утв. Приказом Минприроды России от 25.03.2019 г. № 188. [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru).
18. Фомин В.В. Методика оценки густоты подроста и древостоев при зарастании сельскохозяйственных земель древесной растительностью с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения / В.В. Фомин, С.В. Залесов, А.Г. Магасумова // Аграрный вестник Урала, 2015. № 1 (191). С. 25-29.
19. Бунькова Н.П. Основы фитомониторинга / Н.Б. Бунькова, С.В. Залесов, Е.С. Залесова, А.Г. Магасумова, Р.А. Осипенко. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2020. 90 с.

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

1. Debkov N.M. Obespechennost' osinnikov sredney taygi podrostom predvaritel'noy generatsii (na primere Tomskoy oblasti) [Provision of aspen forests in the middle taiga with undergrowth of preliminary generation (on the example of Tomsk Oblast)] / N.M. Debkov, S.V. Zalesov, A.S. Opletaev // Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]. – 2015. – No. 12 (142). – P. 48-53. [in Russian]
2. Vedernikov E.A. Obespechennost' podrostom spelykh i perestoynykh temnokhvoynykh nasazhdeniy Permskogo kraya [Provision of undergrowth of ripe and overripe dark coniferous plantings of the Perm Territory] / E.A. Vedernikov, S.V. Zalesov, E.S. Zalesova, A.G. Magasumova, O.V. Pusher // Lesnoy zhurnal [Forestry Journal] – 2019. – No. 3. – P. 32-42 (Bul. of Higher educational institutions). DOI: 10.17238 / issn. 0536-1036. 2019.3.32. [in Russian]
3. Zalesova E.S. Obespechennost' spelykh i perestoynykh svetlokhvoynykh nasazhdeniy Zapadno-Ural'skogo tayezhnogo lesnogo rayona podrostom predva-ritel'noy generatsii [Provision of ripe and overripe light coniferous plantings of the West Ural taiga forest region with undergrowth of preliminary generation] / E.S. Zalesova, S.V. Zalesov, G.G. Terekhov, O.V. Pusher, N.A. Lugansk, D.A. Shubin // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Successes in the modern natural sciences], 2019. – No. 1. – P. 39-44. [in Russian]
4. Kalachev A.A. Kachestvo podrosta pikhty sibirskoy pod pologom pikh-tovykh i berezovykh nasazhdeniy Rudnogo Altaya [Quality of Siberian fir undergrowth under the canopy of fir and birch plantations of the Rudny Altai] / A.A. Kalachev, S.V. Zalesov // Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], 2014. – No. 4 (122). – P. 64-67. [in Russian]
5. Dancheva A.V. Dinamika yestestvennogo vozobnovleniya pod pologom sosnovykh nasazhdeniy Kazakhskogo melkosopochnika [Dynamics of natural regeneration under the canopy of pine plantations of the Kazakh small hills] / A.V. Dancheva, S.V. Zale-sov // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University], 2013. – No. 3 (27). – P. 126-128. [in Russian]
6. Opletaev A.S. Pereformirovaniye proizvodnykh myagkolistvennykh nasazhdeniy v listvennichniki na Yuzhnom Urale [Reformation of derivatives of deciduous plantings into larch trees in the Southern Urals] / A.S. Opletaev S.V. Zalesov. – Yekaterinburg: Ural. state forest engineering univ., 2014. 178 p. [in Russian]
7. Kazantsev S.G. Optimizatsiya lesopol'zovaniya v proizvodnykh bereznaya-kakh Srednego Urala [Optimization of forest use in derivatives of birch trees of the Middle Urals] / S.G. Kazantsev, S.V. Zalesov, A.S. Zalesov. – Yekaterinburg: Ural. state forest engineering univ., 2006. 156 p. [in Russian]
8. Abramova L.P. Rubki obnovleniya i pereformirovaniya v lesakh Urala [Cutting renovation and reformation in the forests of the Urals] / L.P. Abramova, S.V. Zalesov, S.G. Kazantsev, N.A. Lugansk, A.G. Magasu Mova. – Yekaterinburg: Ural. state forest engineering univ. – 2007. – 264 p. [in Russian]
9. Zalesov S.V. Yestestvennoye lesovosstanovleniye na vyrubkakh Tyumenskogo severa [Natural reforestation in felling of Tyumen North] / S.V. Zalesov, E.P. Platonov, K.I. Lopatin, G.A. Godovalov // Lesnoy zhurnal [Forestry Journal], 1996. – No. 4-5. – P. 51-58. [in Russian]
10. Kalachev A.A. Lesovodstvennaya effektivnost' sploshnolesosechnykh rubok v pikhtovykh lesakh Rudnogo Altaya [Silvicultural efficiency of clear-cutting operations in fir forests of the Rudny Altai] / A.A. Kalachev, T.A. Arkhangelskaya, S.V. Zalesov // Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], 2014. – No. 4 (122). – P. 60-63. [in Russian]
11. Zalesov S.V. Rost i produktivnost' sosnyakov iskusstvennogo i yestestvennogo proiskhozhdeniya [Growth and productivity of artificial and natural pine forests] / S.V. Zalesov, A.N. Lobanov, N.A. Luganskiy. – Yekaterinburg: Ural. state forest engineering univ., 2002. 112 p. [in Russian]
12. Zalesov S.V. Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur na solontsakh khoroshey lesoprigodnosti [Experience in creating forest crops on solonchaks of good forest suitability] / S.V. Zalesov, O.V. Tolkach, I.A. Freiberg, N.F. Chernousova // Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]. – 2017. – V. 21. – No. 9. – P. 42-47. [in Russian]
13. Zalesov S.V. Nauchnoye obosnovaniye sistemy lesovodstvennykh mero-priyatiy po povysheniyu produktivnosti sosnovykh lesov Urala [Scientific substantiation of forestry system measures to increase the productivity of pine forests of the Urals]: Thesis of PhD in Agriculture. Yekaterinburg, 2000. – 380 p. [in Russian]
14. Lugansky N.A. Povysheniye produktivnosti lesov [Increasing forest productivity] / N.A. Lugansk, S.V. Zalesov, V.A. Schavrovsky. – Yekaterinburg: USFEU, – 1995. – 297 p. [in Russian]
15. Ob utverzhdenii Perechnya lesorastitel'nykh zon Rossiyskoy Fede-ratsii i Perechnya lesnykh rayonov Rossiyskoy Federatsii [On approval of the List of forest growing zones of the Russian Federation and the List of forest regions of the Russian Federation]: Approved by order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated August 18, 2014 – No. 367. www.consultant.ru [in Russian]
16. Pobedinsky A.V. Izucheniye lesovosstanovitel'nykh protsessov [Study of reforestation processes] / A.V. Pobedinsky. – M.: Nauka, – 1966. – 64 p. [in Russian]
17. Pravila lesovosstanovleniya [Rules of reforestation]: Approved by order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated March 25, 2019 – No. 188. www.consultant.ru. [in Russian]
18. Fomin V.V. Metodika otsenki gustoty podrosta i drevostoyev pri zarastanii sel'skokhozyaystvennykh zemel' drevesnoy rastitel'nost'yu s is-pol'zovaniyem kosmicheskikh snimkov vysokogo prostranstvennogo razresheniya [Methodology for assessing density of undergrowth and forest stands when agricultural lands are overgrown with woody vegetation using space images of high spatial resolution] / V.V. Fomin, S.V. Zalesov, A.G. Magasumova // Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], – 2015. – No. 1 (191). – P. 25-29. [in Russian]
19. Bunkova N.P. Osnovy fitomonitoringa [Fundamentals of Phytomonitoring] / N.B. Bunkova, S.V. Hall-owls, E.S. Zalesova, A.G. Magasumova, R.A. Osipenko. – Yekaterinburg: Ural. state forest engineering univ., – 2020. – 90 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.029>

# ГУМУСОВОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАЦИОНАРНОГО ОПЫТА В РЕСПУБЛИКЕ МАРИЙ ЭЛ

Научная статья

Замятин С.А.<sup>1,\*</sup>, Максимова Р.Б.<sup>2</sup>, Ефимова А.Ю.<sup>3</sup>, Максуткин С.А.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3999-9179;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Марийский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», п. Руэм, Россия

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

## Аннотация

Цель работы – изучить влияние длительного применения удобрений на динамику содержания гумуса в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве Республики Марий Эл; определить взаимосвязь между содержанием гумуса в почве со среднегодовой продуктивностью севооборотов. Работа выполнена в 2009-2019 гг. на стационарном участке в двухфакторном опыте. Исследования показали, что в контрольном севообороте на варианте без внесения минеральных удобрений за 24 года идет постепенное снижение содержания гумуса. Содержание гумуса в почве I плодосменного севооборота уменьшалось еще более интенсивно, чем на контроле. Самое низкое содержание гумуса за все время исследований – 1,55 % было в почве I плодосменного севооборота в 2019 году на варианте без применения минеральных удобрений. Самое высокое содержание гумуса в почве отмечено во II плодосменном севообороте, где под картофель вносили навоз 80 т/га. На фоне без удобрений содержание гумуса всегда было выше, чем при применении N60P60K60. Самое стабильное содержание гумуса было в почве III плодосменного севооборота. Коэффициент корреляции между среднегодовой продуктивностью полевых севооборотов и содержанием в почве гумуса на варианте без применения минеральных удобрений, в зернотравяном севообороте составил 0,60 ед. При ежегодном применении минеральных удобрений он возрос до 0,75 ед. Положительная связь между продуктивностью культур и содержанием гумуса в почве наблюдается и в I плодосменном севообороте, чего нельзя сказать о II и III плодосменных севооборотах. На этих вариантах II и III плодосменных севооборотов при уменьшении содержания гумуса в почве среднегодовая продуктивность сельскохозяйственных культур увеличивается. Это происходит за счет продуктивности бобовых многолетних трав, которые не зависят от содержания гумуса в почве.

**Ключевые слова:** гумус, севооборот, длительное применение минеральных удобрений, плодородие почвы, продуктивность сельскохозяйственных культур.

## HUMUS STATE OF DERNO-PODZOLIC SOIL DURING THE LONG-TERM EXPERIMENT IN THE REPUBLIC OF MARI EL

Research article

Zamyatin S. A.<sup>1,\*</sup>, Maksimova, R. B.<sup>2</sup>, Efimova A. Yu.<sup>3</sup>, Maksutkin S. A.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3999-9179,<sup>1, 2, 3, 4</sup> The Research Institute of Agriculture, Federal Agricultural North Eastern Research Center named after N. V. Rudnitsky, Ruem, Russia

\* Corresponding author (zamyatin.ser@mail.ru)

## Abstract

The purpose of the work is to study the effect of long-term use of fertilizers on the dynamics of humus content in the derno-podzolic middle loamy soils of the Mari El Republic and to determine the interconnection between the humus content in the soil and the average annual productivity of crop rotations. The task was performed in 2009-2019 at the stationary site during a two-factor experiment. The research has shown that in the control crop rotation (the option without applying mineral fertilizers for 24 years), there is a gradual decrease in the humus content. The content of humus in the soil of the first fruit-bearing crop rotation decreased even more intensively than in the control crop rotation. The lowest humus content for all the time of research is 1.55 %, it was indicated in the soil of the first crop rotation in 2019 (the option without the use of mineral fertilizers). The highest content of humus in the soil was indicated in the second crop rotation, where 80 t/ha of manure was used as a potatoes' fertilizer. If there were no fertilizers used, the humus content was always higher than when using N60P60K60. The most stable humus content was in the soil of the third crop rotation. The correlation coefficient between the average annual productivity of field crop rotations and the content of humus in the soil (the option without the use of mineral fertilizers), in the grain-grass crop rotation was 0.60 units. With the annual use of mineral fertilizers, it increased to 0.75 units. A positive interconnection between crop productivity and humus content in the soil is indicated in the first crop rotation, which cannot be said about the II and III crop rotations. In variants II and III of the fruit-bearing crop rotations, the average annual productivity of agricultural crops increases while the humus content in the soil decreases. This is due to the productivity of perennial legumes herbs, which do not depend on the content of humus in the soil.

**Keywords:** humus, crop rotation, long-term use of mineral fertilizers, soil fertility, crop productivity.

Плодородие почв в основном зависит от количества, состава гумуса и основных питательных элементов питания (NPK). На землях, находящихся в сельскохозяйственном обороте, вследствие уменьшения запасов корнеплодных остатков в почве постепенно образуется дефицит гумуса. Оптимальное содержание гумуса в дерново-подзолистых почвах, обеспечивающее получение высокого планируемого урожая всех культур севооборота и соответствующее биологическим требованиям культурных растений, находится на уровне 2,5 % с запасом в 75 т/га. [1], [2], [3].

Для каждой культуры существует свой оптимальный уровень содержания гумуса в почве, обеспечивающий ее максимальную продуктивность.

В настоящее время в научной литературе имеется огромное количество данных, говорящих о том, что одним из основных показателей, определяющих потенциальное плодородие почвы, является содержание в ней гумуса. Не случайно между гумусированностью почвы и урожайностью сельскохозяйственных культур существует тесная взаимосвязь. В интервале гумусированности дерново-подзолистой почвы от 1,35 % до 3,08 % увеличение содержания гумуса на 0,5 % сопровождается ростом урожайности зерна ячменя на 5–6 ц/га. [4] [5].

Содержание органического вещества в почве должно не уменьшаться, а наоборот увеличиваться, т.е. плодородие должно улучшаться. Всего этого можно добиться при правильном соблюдении чередования сельскохозяйственных культур по полям севооборота и проведением комплексного агрохимического окультуривания [6], [7].

Гумус почвы, сформированный из органических веществ и соединений растительного, животного и микробного происхождения, прошедших гумификационные и негумификационные стадии стабилизации, формирует и поддерживает основные функции почвы и придает ей уникальное свойство – создание и сохранение плодородия [8, с. 17].

Учеными Белорусской государственной сельскохозяйственной академии установлено, что при содержании гумуса в почве менее 2,00 % наибольшую урожайность зерна ячменя (от 4,65 до 7,15 т/га), обеспечивает доза азотного удобрения 140 кг д.в./га (80 кг/га в основную заправку и 60 кг/га – в подкормку в конце фазы кушения – начало выхода в трубку). При содержании гумуса в почве от 2,00 до 2,50 % дозы азотного удобрения N80+60 и N80+40 обеспечивают равновеликую урожайность зерна (от 6,98 до 5,15 и от 6,93 до 5,00 т/га соответственно) [9].

### Материал и методы

Стационарный опыт по изучению эффективности применения удобрений в полевых севооборотах, развернутых во времени, заложен в 1996 г. на опытном поле Марийского НИИСХ. Почва опытного участка дерново-подзолистая среднесуглинистая имеющая перед закладкой севооборотов следующие агрохимические показатели: содержание гумуса – 1,72 %,  $pH_{\text{сол}}$  – 5,67, Нг – 1,41 мг.экв на 100 г почвы, сумма поглощенных оснований – 8,9 мг. экв. на 100 г почвы, содержание  $P_2O_5$  – 270 и  $K_2O$  – 130 мг на 1 кг почвы (по Кирсанову). Технология возделывания культур общепринятая для Республики Марий Эл. Повторность вариантов в опыте трехкратная, расположение делянок в них систематическое. Общая площадь делянок первого порядка 330 м<sup>2</sup>, второго – 165 м<sup>2</sup>. Учетная площадь – 165 м<sup>2</sup>.

### Схема опыта

Фактор А – виды севооборотов

1. Зернотравяной – (овес + клевер, клевер 1 г.п., озимые, вика/овес на зерно, яровая пшеница, ячмень) – 83 % зерновых – контроль.
2. I плодосменный – (вика/овес на зеленую массу, озимые, ячмень, картофель, вика/овес на зерно, яровая пшеница) – 67 % зерновых.
3. II плодосменный – (вика/овес на зерно, яровая пшеница, картофель, ячмень + клевер, клевер 1 г.п., озимые) – 67 % зерновых.
4. III плодосменный (ячмень + клевер, клевер 1 г.п., клевер 2 г.п., озимые, картофель, овес) – 50 % зерновых.

Фактор В – минеральные удобрения:

- Контроль (без удобрений)
- $N_{60}P_{60}K_{60}$ .

Под картофель во II плодосменном севообороте вносили навоз 80 т/га. Минеральные удобрения вносили в сбалансированном соотношении основных элементов по  $N_{60}P_{60}K_{60}$  в виде аммиачной селитры, двойного суперфосфата и хлористого калия. Под многолетние бобовые травы и их предшественники азотные удобрения не вносили.

### Результаты и обсуждение

В 2019 году закончилась четвертая ротация севооборотов. Это позволило проанализировать динамику гумуса в почве за 24 года исследований. Они показали, что в контрольном зернотравяном севообороте на варианте без внесения минеральных удобрений за 24 года идет постепенное снижение содержания гумуса (таблица 1). Так в 2007 году, после первой ротации, в сравнении с исходным содержанием оно уменьшилось на 0,03 %, в 2013, после второй ротации еще на 0,08 %, в 2019, после третьей ротации на 0,02 %. На фоне внесения минеральных удобрений в этом севообороте так же наблюдается уменьшение содержания гумуса в почве, когда более интенсивно, когда менее.

Содержание гумуса в почве I плодосменного севооборота уменьшалось еще более интенсивно, чем на контроле. Так в 2001 году на естественном плодородии почвы содержание гумуса понизилось по сравнению с исходным состоянием на 0,03 %, а на фоне внесения минеральных удобрений, содержание гумуса почвы уменьшилось еще больше и составило 1,67 %. Это ниже исходного состояния на 0,05 %. В 2007 году, по окончании второй ротации гумус в I плодосменном севообороте снизился на 0,09...0,10 % по сравнению с исходным состоянием. За 18 лет исследований содержание гумуса уменьшилось в этом севообороте еще на 0,16...0,17 %. Самое низкое содержание гумуса за все время исследований – 1,55 % было в почве I плодосменного севооборота в 2019 году на варианте без применения минеральных удобрений. Разница по сравнению с исходным состоянием на этом варианте составила -0,17 %.



Таблица 1 – Влияние видов севооборота и использования минеральных удобрений на динамику содержания гумуса в пахотном слое почвы

| Севооборот / Crop rotation            | Удобрения / Fertilizers                | Содержание гумуса, % / Humus content, % |         |         |         |
|---------------------------------------|--|---|---------|---------|---------|
|                                       |  | 2001 г.                                 | 2007 г. | 2013 г. | 2019 г. |
| Зернотравяной / Grassgrain            | Без удобрений / No fertilizer          | 1,70                                    | 1,67    | 1,59    | 1,57    |
|                                       | NPK                                    | 1,70                                    | 1,64    | 1,60    | 1,56    |
| I плодосменный / I fruitful           | Без удобрений / No fertilizer          | 1,69                                    | 1,63    | 1,56    | 1,55    |
|                                       | NPK                                    | 1,67                                    | 1,62    | 1,55    | 1,58    |
| II плодосменный / II fruitful         | Без удобрений / No fertilizer          | 1,76                                    | 1,87    | 1,99    | 2,20    |
|                                       | NPK                                    | 1,75                                    | 1,86    | 1,96    | 2,16    |
| III плодосменный / III fruitful       | Без удобрений / No fertilizer          | 1,73                                    | 1,74    | 1,72    | 1,70    |
|                                       | NPK                                    | 1,72                                    | 1,73    | 1,74    | 1,73    |
| HCP <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | частные различия / private differences | 0,06                                    | 0,05    | 0,04    | 0,05    |
|                                       | A                                      | 0,05                                    | 0,04    | 0,03    | 0,04    |
|                                       | B                                      | 0,03                                    | 0,02    | 0,02    | 0,03    |

Самое высокое содержание гумуса в почве отмечено во II плодосменном севообороте, где под картофель вносили перепревший навоз 80 т/га. В 2001 году содержание гумуса в почве данного севооборота увеличилось на 0,03...0,04 %, в 2007 – на 0,11 %, в 2013 – 0,10...0,12 %, в 2019 – 0,20...0,21 %. Причем характерно, что на фоне без удобрений содержание гумуса всегда было выше, чем при применении N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>.

Самое стабильное содержание гумуса было в почве III плодосменного севооборота. В этом севообороте из шести полей два были под многолетними бобовыми травами. В течение трех ротаций содержание гумуса в почве находилось в пределах 1,72...1,74 %. Только после четвертой ротации севооборотов содержание гумуса снизилось до 1,70...1,73 %.

Что касается математической обработки, то в 2001 году увеличение содержания гумуса была в пределах ошибки опыта как по фактору А, так и по фактору В. В 2007 и 2013 годах прибавка была достоверной только по севооборотам, а по минеральным удобрениям они лежали в пределах ошибки опыта. В 2019 году прибавка по содержанию гумуса достоверно превышала как по фактору А (севооборот), так и по фактору В (минеральные удобрения).

Таким образом, отрицательный баланс гумуса сложился в контрольном (зернотравяном) и I плодосменном севооборотах. Причем снижение гумуса в пределах ошибки опыта относительно III плодосменного севооборота было в зернотравяном севообороте только в первой ротации. В последующих ротациях данное снижение гумуса было математически доказуемым. Бездефицитный баланс гумуса, в наших опытах зарегистрирован в III плодосменном севообороте, положительный – во II плодосменном.

Полевые севообороты повлияли на продуктивность сельскохозяйственных культур (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние видов севооборота и использования минеральных удобрений на продуктивность культур за ротацию

| Севооборот / Crop rotation            | Удобрения / Fertilizers                | Среднегодовая продуктивность культур за ротацию севооборота, тыс.к.ед./га / Average annual crop productivity for crop rotation, th.f.un./ha |               |               |               |
|---------------------------------------|--|---|---------------|---------------|---------------|
|                                       |  | 1996-2001 гг.   | 2002-2007 гг. | 2008-2013 гг. | 2014-2019 гг. |
| Зернотравяной / Grassgrain            | Без удобрений / No fertilizer          | 2,97  | 2,17          | 2,29          | 2,30          |
|                                       | NPK                                    | 3,40  | 3,11          | 2,65          | 2,98          |
| I плодосменный / I fruitful           | Без удобрений / No fertilizer          | 2,65  | 1,72          | 2,18          | 1,74          |
|                                       | NPK                                    | 3,30  | 2,04          | 2,75          | 2,39          |
| II плодосменный / II fruitful         | Без удобрений / No fertilizer          | 3,30  | 3,30          | 2,87          | 2,89          |
|                                       | NPK                                    | 4,13  | 3,56          | 3,36          | 3,94          |
| III плодосменный / III fruitful       | Без удобрений / No fertilizer          | 3,76  | 3,73          | 3,02          | 3,86          |
|                                       | NPK                                    | 3,95  | 4,99          | 3,64          | 4,98          |
| HCP <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | частные различия / private differences | 0,90  | 0,79          | 0,29          | 0,21          |
|                                       | A                                      | 0,77  | 0,67          | 0,25          | 0,18          |
|                                       | B                                      | 0,46  | 0,40          | 0,15          | 0,11          |

Так в контрольном зернотравяном севообороте на варианте без применения минеральных удобрений среднегодовая продуктивность за первую ротацию составила 2,97 тыс. к.ед./га, за вторую – 2,17 тыс. к.ед./га, за третью 2,29, за четвертую 2,30 тыс. к.ед./га. То есть с уменьшением содержания гумуса в этом севообороте идет уменьшение среднегодовой продуктивности сельскохозяйственных культур. На фоне ежегодного внесения минеральных удобрений в данном севообороте подобная тенденция проявляется еще больше.

Такая динамика прослеживается и по I плодосменному севообороту. Этого не скажешь, анализируя среднегодовую продуктивность II плодосменного севооборота. Так наибольшая среднегодовая продуктивность во II плодосменном севообороте наблюдается в первой и второй ротациях, в то время когда наибольшее содержание гумуса в почве в нем было в четвертой ротации. В III плодосменном севообороте среднегодовая продуктивность за четыре ротации изменилась. Если на варианте без применения минеральных удобрений в 1, 2, и 4 ротации она была примерно на одном уровне 3,76, 3,73 и 3,86 тыс. к.ед./га, то в 3 ротации она уменьшилась до 3,02 тыс. к.ед./га. Очевидно, здесь сказался засушливый 2010 год, который значительно снизил среднегодовую продуктивность в эту ротацию. На фоне внесения минеральных удобрений низкая среднегодовая продуктивность на этом севообороте была в 1 и 3 ротации, а высокая – во 2 и 4.

Нами проведена анализ корреляционной зависимости между среднегодовой продуктивностью сельскохозяйственных культур полевых севооборотов и содержанием гумуса в почве в конце ротаций (таблица 3).

Таблица 3 – Коэффициент корреляции между среднегодовой продуктивностью полевых севооборотов и содержанием в почве гумуса

| Удобрения /<br>Fertilizers       | Севооборот / Crop rotation    |                                |                                  |                                    |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|                                  | Зернотравяной /<br>Grassgrain | I плодосменный / I<br>fruitful | II плодосменный / II<br>fruitful | III плодосменный /<br>III fruitful |
| Без удобрений /<br>No fertilizer | 0,60                          | 0,62                           | -0,84                            | -0,05                              |
| NPK                              | 0,75                          | 0,41                           | -0,13                            | -0,18                              |

Так коэффициент корреляции на варианте без применения минеральных удобрений, в зернотравяном (контрольном) севообороте составил 0,60 ед. При ежегодном применении минеральных удобрений он возрос до 0,75 ед. Положительная связь между продуктивностью культур и содержанием гумуса в почве наблюдается и в I плодосменном севообороте, чего нельзя сказать о II и III плодосменных севооборотах. На этих вариантах при уменьшении содержания гумуса в почве среднегодовая продуктивность сельскохозяйственных культур увеличивается. Это происходит за счет продуктивности бобовых многолетних трав, которые не зависят от содержания гумуса в почве.

### Заключение

Таким образом, оценивая гумусовое состояние почвы, следует отметить, что с насыщением севооборотов зерновыми культурами идет постепенное уменьшение содержания гумуса в почве. Введение в севооборот бобовых многолетних трав замедляет уменьшение гумуса в почве. При двухлетнем использовании клевера на фоне ежегодного внесения минеральных удобрений содержание гумуса в почве стабилизируется. Внесение перепревшего навоза 80 т/га один раз за ротацию севооборотов повышает содержание гумуса. Наблюдается положительная корреляционная зависимость между содержанием гумуса в почве и среднегодовой продуктивностью сельскохозяйственных культур за ротацию в зернотравяном и I плодосменном севооборотах, отрицательная – во II и III плодосменном севооборотах.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (тема № 0528-2019-0091).

### Funding

The work was carried out as part of the State assignment of the Federal State Budgetary Institution of Economics of the North East (topic No. 0528-2019-0091).

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Дергачева М.И. Учение о гумусе почв: взгляд в прошлое и настоящее / М.И. Дергачева // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: мат. конф. – Томск. 2010. – С. 63-67.
2. Козлова Л.М. Совершенствование севооборотов для сохранения плодородия почвы и увеличения их продуктивности в условиях биологической интенсификации / Л.М. Козлова, Е.Н. Носкова, Ф.А. Попов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. – 20(5): 467-477. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.5.467-477>
3. Kuzminykh A.N. Effect of green manuring on the phytosanitary condition of agrocenosis and the yield of winter rye during the development of fallow land / A.N. Kuzminykh, S.I. Novoselov, G.I. Pashkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. – 2, 7 V. 421
4. Жученко А. А. Биологизация, экологизация, энергосбережение, экономика современных систем земледелия / А. А. Жученко // Вестник АПК Ставрополя. – Ставрополь, 2015. – №2. – С. 9-13.
5. Замятин С.А. Влияние длительного применения удобрений на агрохимические показатели в условиях дерново-подзолистых среднесуглинистых почв Республики Марий Эл / С.А. Замятин, А.Ю. Ефимова // Разработка и внедрение почвозащитных энергосберегающих технологий – основной путь повышения рентабельности и экологической безопасности растениеводства на современном этапе: материалы Всерос. науч.-практ.конф. с международным участием, 7-8 июля 2016 г. / ФГБНУ Удмуртский НИИСХ. – Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2016. С. 60-65.

6. Романова А.С. Динамика гумуса как основного компонента плодородия почв Адамовского района / А.С. Романова, Н.В. Меркулов, Е.Ю. Гревцев // Вопросы степеведения. 2014. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-gumusa-kak-osnovnogo-komponenta-plodorodiya-pochv-adamovskogo-rayona> (дата обращения: 10.04.2020).

7. Кузьминых А.Н. Микробиологическая активность почвы паровых полей / А.Н. Кузьминых, С.Г. Манишкин, В.Р. Габдуллин // Вестник КрасГАУ, 2011. № 6. С. 49-51

8. Семенов В.М. Почвенное органическое вещество / В.М. Семенов, Б.М. Когут – М.: ГЕОС, 2015. – 233 с.

9. Воробьев В.Б., Грищенко И.Ю., Ласточкина С.И. Влияние содержания гумуса и различных доз азотного удобрения на урожайность ячменя и баланс азота в почве / В.Б. Воробьев, И.Ю. Грищенко С.И. Ласточкина // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии 2018. № 2 С. 98-101

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

1. Dergacheva M.I. Uchenie o gumuse pochvy: vzgljad v proshloe i nastojashhee [The doctrine of soil humus: a look into the past and present] / M.I. Dergacheva // Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernyh vzaimodejstvij v pochvah i pochvennom pokrove: mat. konf. [Reflection of bio-, geo-, anthropospheric interactions in soils and soil cover: mat. Conf]. - Tomsk. 2010.- p. 63-67. [in Russian]

2. Kozlova L.M. Sovershenstvovanie sevooborotov dlja sohraneniya plodorodija pochvy i uvelicheniya ih produktivnosti v usloviyah biologicheskoy intensivizatsii [Improvement of crop rotation to maintain soil fertility and increase their productivity in conditions of biological intensification] / L.M. Kozlova, E.N. Noskova, F.A. Popov // Agrarnaja nauka Evro-Severo-Vostoka [Agricultural science of the Euro-North-East]. 2019 – 20 (5): 467-477. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.5.467-477>[in Russian]

3. Kuzminykh A.N. Effect of green manuring on the phytosanitary condition of agrocenosis and the yield of winter rye during the development of fallow land [Effect of green manuring on the phytosanitary condition of agrocenosis and the yield of winter rye during the development of fallow land] / A.N. Kuzminykh, S.I. Novoselov, G.I. Pashkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. – 2, 7 V. 421[in Russian]

4. Zhuchenko A. A. Biologizatsiya, jekologizatsiya, jenergosberezhenie, jekonomika sovremennyh sistem zemledelija [Biologization, ecologization, energy saving, economics of modern farming systems] / A. A. Zhuchenko // Vestnik APK Stavropol'ja [Bulletin of the agricultural industry of Stavropol]. - Stavropol, 2015. - No. 2 – P. 9-13. [in Russian]

5. Zamyatin S.A. Vlijanie dlitel'nogo primeneniya udobrenij na agrohimicheskie pokazateli v usloviyah dervno-podzolistykh srednesuglinistykh pochv Respubliki Marij Jel [The effect of prolonged use of fertilizers on agrochemical indicators in the conditions of sod-podzolic medium loamy soils of the Republic of Mari El] / S.A. Zamyatin, A.Yu. Efimova // Razrabotka i vnedrenie pochvozashhitnyh jenergosberegajushhih tehnologij – osnovnoj put' povysheniya rentabel'nosti i jekologicheskoy bezopasnosti rastenievodstva na sovremennom jetape: materialy Vseros. nauch.-prakt.konf. s mezhdunarodnym uchastiem, 7-8 ijulja 2016 g. [Development and implementation of energy-saving soil-saving technologies - the main way to improve the profitability and environmental safety of crop production at the present stage: Vseros materials. scientific-practical conference with international participation, July 7-8, 2016] / FGBNU Udmur Scientific Research Institute of Agricultural Sciences. - Izhevsk: FSBEI of HE Izhevsk State Agricultural Academy, 2016.P. 60-65. [in Russian]

6. Romanova A.S. Dinamika gumusa kak osnovnogo komponenta plodorodija pochv Adamovskogo rajona [Humus Dynamics as the Main Component of Soil Fertility in the Adamovsky District] / A.S. Romanova, N.V. Merkulov, E.Yu. Grevtsev // Voprosy stepavedeniya [Issues of history studies]. 2014. no. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-gumusa-kak-osnovnogo-komponenta-plodorodiya-pochv-adamovskogo-rayona> (accessed: 04/10/2020). [in Russian]

7. Kuzminykh A.N. Mikrobiologicheskaja aktivnost' pochvy parovyh polej [Microbiological activity of the soil of steam fields] / A.N. Kuzminykh, S.G. Manishkin, V.R. Gabdullin // [Bulletin of KrasGAU], 2011. No. 6. P. 49-51[in Russian]

8. Semenov V.M. Pochvennoe organicheskoe veshchestvo [Soil organic matter] / V.M. Semenov, B.M. Kogut - M.: GEOS, 2015. -- 233 p. [in Russian]

9. Vorobyov V.B. Vlijanie soderzhaniya gumusa i razlichnykh doz azotnogo udobreniya na urozhajnost' jachmenja i balans azota v pochve [The effect of humus content and various doses of nitrogen fertilizer on barley yield and nitrogen balance in the soil] / V. B. Vorobiev, I. Yu. Grishchenko S. And Lastochkina // Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skhozjajstvennoj akademii 2018 [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy 2018]. No. 2 P. 98-101[in Russian]



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.030>**ПРОДУКТИВНЫЕ КАЧЕСТВА СОХРАНЯЕМОЙ ГЕНОФОНДНОЙ ГРУППЫ ВОЛЖСКИХ БЕЛЫХ ЦЕСАРОК В УСЛОВИЯХ КРЕСТЬЯНСКОГО ФЕРМЕРСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Научная статья

**Забиякин В.А.<sup>1,\*</sup>, Титова С.В.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4246-8472;<sup>1</sup> Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия;<sup>1,2</sup> Марийский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», п. Руэм, Россия

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

**Аннотация**

Оценено современное состояние популяции цесарок волжской белой породы после ликвидации генофондного хозяйства по ее разведению в ЗАО «Марийское». Изучены продуктивные качества сохраняемой генофондной группы волжских белых цесарок в условиях крестьянского фермерского хозяйства. Установлено снижение основных продуктивных и воспроизводительных качеств цесарок по сравнению с регистрируемыми ранее показателями в генофондном хозяйстве. Снижение коснулось показателей яйценоскости, выхода инкубационных яиц, оплодотворенности яиц, их выводимости и вывода молодняка, что привело к уменьшению выхода цесарят на одну несушку родительского стада за продуктивный период на 10 - 15%. Для сохранения на высоком уровне всех хозяйственно-важных показателей генофондного стада цесарок необходимо продолжить проведение селекционного отбора с организацией индивидуального и семейного учета продуктивности. В среднем, от сохраняемого поголовья цесарок за племенной сезон от одной несушки родительского стада можно получить не более 65,0 голов суточных цесарят. Полученные показатели обеспечивают возможность формирования товарного стада и возможный объем продаж племенной продукции не менее 20 тыс. шт. инкубационного яйца или 15 тыс. голов молодняка.

**Ключевые слова:** цесарки, порода, генофонд, родительское стадо, продуктивные качества, воспроизводство.**THE PRODUCTIVE QUALITIES OF THE PRESERVED GENE POOL GROUP OF VOLGA WHITE GUINEA FOWL IN THE CONDITIONS OF A FARM HOUSEHOLD**

Research article

**Zabiyakin V. A.<sup>1,\*</sup>, Titova S. V.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4246-8472;<sup>1</sup> Mari State University, Yoshkar Ola, Russia;<sup>1,2</sup> The Mari Research Institute of Agriculture, Federal Agricultural North Eastern Research Center named after N. V. Rudnitsky, Ruem, Russia

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

**Abstract**

The current state of the population of the Volga white Guinea fowl's breed after the liquidation of the gene pool for its breeding in ZAO "Mariyskoye" is estimated during the research. In this article, the authors study the productive qualities of the preserved gene pool group of Volga white Guinea fowl in the conditions of a farm household. A decrease in the main productive and reproductive qualities of Guinea fowls in comparison with the previously recorded indicators in the gene pool farm was found. The decrease affected the indicators of egg production, hatchable eggs, fertilization of eggs, their hatching capacity and a growing flock, which led to a decrease of the output of Guinea fowls per one hen of the parent flock for the productive period. This decrease is estimated 10-15%. In order to maintain at a high level all the economically important indicators of the gene pool of Guinea fowl flock, it is necessary to continue the selection process with the organization of individual and collective productivity accounting. On average, judging by the number of the preserved population of the Guinea fowls, you can get no more than 65.0 heads of day-old Guinea fowls from one hen of the parent flock during the breeding season. The obtained data provide the possibility of forming a commercial flock and its possible sales of at least 20 thousand pieces of hatchable eggs or 15 thousand birds of the growing stock.

**Keywords:** Guinea fowls, breed, gene pool, parent flock, productive qualities, reproduction.**Введение**

В Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия особое внимание уделяется развитию животноводства, в том числе и птицеводства, которое считается одной из ключевых отраслей для получения белка животного происхождения [10, С.15]. Перспектива развития этой отрасли, безусловно, связана с расширением ассортимента и улучшением качества получаемой от птиц продукции [6, С.45]. Одним из резервов увеличения продуктов птицеводства давно стали цесарки, мясо и яйца которых обладают высокими вкусовыми и пищевыми свойствами [3, С.24].

Началом товарного разведения цесарок на территории Республики Марий Эл можно считать 1988 год, именно тогда под руководством профессора Вейцмана Льва Наттановича в Марийском государственном университете была создана волжская белая порода цесарок (А. с. № 4645.). Исходным материалом для создания этой породы послужили цесарки сибирской белой породной группы [2, С.133]. В 1994 г. по инициативе ВАСХНИЛ и ВНИТИП в Республике на Акашевской птицефабрике была создана первая генофондно-племенная ферма волжских белых цесарок. С 2004 года на базе ЗАО «Марийское» был открыт селекционно-генетический центр по работе с цесарками [3, С.26]. Генофондное стадо на фабрике состояло из 4 чистых линий цесарок селекционируемых по скорости прироста живой массы и воспроизводительным признакам [4, С.77]. Голубая и серо-крапчатые популяции птицы содержались в качестве

резервного генофонда. С 1994 года начала проводиться целенаправленная научная работа по созданию специализированных аутосексных линий волжских белых цесарок, а на их основе – высокопродуктивного кросса [9, С.18].

За этот период учеными было опубликовано более 100 научных работ в ведущих научных журналах. Разработаны приемы оценки, отбора и подбора производителей в родительское стадо [1, С.47]. Начала действовать селекционная программа, внедрение которой в практику позволило создать на базе волжской белой породы цесарок экспериментальные аутосексные линии птицы: отцовскую (ВБА-1) и материнскую (ВБА-2), а на их основе кросс ВБА-12 [1, Р. 1540], [6, С.46]. Выведенные марийскими учеными цесарки регулярно выставлялись на Международных выставках-ярмарках «Золотая осень» и «Агрорусь», получали золотые медали, что подтверждало высокий уровень селекционной работы с цесарками, ее значимость для птицеводства России [4, С.80], [8, С.30].

Однако в 2016 году генофондное хозяйство по разведению цесарок ЗАО «Марийское» стало испытывать определенные трудности с республиканским финансированием и получением субсидий на селекционную работу с птицей. Также, по мнению дирекции, появились проблемы с местоположением помещения, в котором содержались цесарки. Родительское стадо кур и поголовье цесарок содержалось на одной территории, создавая угрозу эпизоотическому благополучию по инфекционным заболеваниям на производственной площадке. Переговоры, вмешательство Минсельхоза России, Республики Марий Эл результатов не дали и генофондное поголовье первой отечественной породы цесарок в количестве 2000 голов было отправлено в убойный цех. После ликвидации цесариной фермы на ЗАО «Марийское» удалось сохранить по 200 голов цесарок исходной линии Волжские белые (ВБ-4) и чистой аутосексной линии – волжские белые аутосексные (ВБА-1). Сохраненная птица была передана в крестьянское фермерское хозяйство КФХ Жданова К.А. расположенное в Воронежской области. В 2017, сразу после переезда, в хозяйстве началась селекционная работа возрождению и воспроизводству уникального генофонда волжских белых цесарок. Сохраненное племенное стадо цесарок этой породы было крайне малочисленно и недостаточно для полноценной селекционной работы, промышленное стадо этих цесарок вообще не существовало. Такое положение могло привести к полному их исчезновению с территории Российской Федерации, что явилось бы невосполнимой утратой для российского птицеводства [8, С.30]. Для спасения птиц этой породы, проведения качественного отбора животных пришлось все работы начинать на ограниченной популяции птицы. Главной задачей исследования стало проведение оценки сохраняемых групп цесарок по основным продуктивным качествам птицы, оценка выхода молодняка от одной несушки для комплектования товарного и племенного стада сохраняемых цесарок силами фермерского хозяйства [7, С.7]. Работу начали с проверки в хозяйстве эффективности проводимого массового отбора и подбора цесарок. Продолжению селекционной работы способствовал тот факт, что продукция хозяйства, (диетические мясо и яйца, племенное инкубационное яйцо, суточный молодняк цесарок) были очень востребованы индивидуальным потребителем и владельцами фермерских хозяйств со всей территории России [4, С.77].

### Методы и принципы исследования

Работа проводилась на сохраняемых цесарках волжской белой породы исходной линии ВБ-4 селекционируемой по скорости прироста живой массы и воспроизводительным признакам и чистой аутосексной линии ВБА-1 селекционируемой по окраске пуха, пера и продуктивным признакам на второй год содержания (племенной сезон 2017-2018 гг.) в крестьянском фермерском хозяйстве КФХ Жданова Кирилла Александровича Воронежской области, Рамонский район, деревня Новоподретное. Целью настоящего исследования явилась оценка продуктивных качеств и воспроизводство генофондного стада волжской белой породы содержащейся в малочисленной группе в новых для породы условиях. Воспроизводство цесарок осуществлялось по схеме, по которой в каждой линии было сформировано 60 гнезд состоящих из 60 самцов и 420 самок [8, С.28].

В течение племенного периода сохранено и размножено генофондное стадо волжских белых цесарок в малочисленной группе, проведена семейная и массовая селекция 2 линий цесарок волжской белой породы. Птица содержалась в следующих условиях: селекционное ядро линейной птицы в индивидуальных клетках с применением искусственного осеменения, и группы множителей при напольном способе естественном спаривании в вольерах по 200-300 голов. В период выращивания и содержания взрослой птицы учитывались живая масса молодняка и взрослой птицы, определяемая методом персонального взвешивания всего поголовья в 12 - , 20 и 52 - недельном возрасте; сохранность молодняка и взрослых цесарок – методом учета павшей и выбракованной птицы; половая зрелость цесарок вычислялась по возрасту снесения первого яйца каждой особью; Яйценоскость – персонально по несушкам за продуктивный период путем ежедневного учета всех снесенных яиц; инкубационные характеристики (оплодотворенность, выводимость яиц, вывод молодняка) по общепринятым методикам: качество и количество спермопродукции, сперму от цесарей получали способом массажа [5, С.13]. При этом определяли объем эякулята, концентрацию спермиев и их активность. Воспроизводство птицы осуществлялось с помощью естественного и искусственного осеменения, при половом соотношении птицы селекционного ядра 1:4. Испытание птицы проводилось до 66 - недельного возраста. Уровень отбора самцов во всех линиях по указанным признакам составил 0,5  $\sigma$  не более, самок - не ниже средних показателей по линии. Птицу группы множителей отбирали по признакам экстерьера, воспроизводительным признакам, с учетом живой массы молодняка в возрасте 12 и 20 недель [5, С.19]. Кормление и содержание цесарок было максимально приближено к рекомендациям ВНИТИП (1993 г.) [5, С.15].

### Основные результаты

Нами была проведена оценка продуктивных и воспроизводительных качеств сохраняемых групп птицы содержащихся в условиях КФХ. Учитывались все хозяйственно-важные показатели за племенной сезон, от инкубации яиц до половой зрелости полученных потомков.

Из данных, представленных в таблице 1 видно, что результаты вывода линейной птицы находились в пределах породных требований. Однако следует отметить, что у птицы наметилась тенденция к снижению основных

воспроизводительных показателей, сравнению с отмеченными ранее в условиях птицефабрики ЗАО «Марийское» на 10-15% [4, С.79].

Таблица 1 – Результаты вывода яиц полученных от опытных линий птицы.

| ЛИНИЯ                            | За 1, 2 вывод |      |      | Заложено<br>яиц, шт. | Оплодотворенность<br>яиц, % |      | Выводимость<br>яиц, % |      | Вывод<br>молодняка, % |      |
|----------------------------------|---------------|------|------|----------------------|-----------------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|                                  | н/о           | э/о  | г/ц  |                      | шт.                         | %    | шт.                   | %    | шт.                   | %    |
| Волжские белые<br>аутосексные -1 | 441           | 595  | 2267 | 3303                 | 2862                        | 86,6 | 2267                  | 79,2 | 2267                  | 68,6 |
| Волжские белые<br>-4             | 362           | 594  | 2119 | 3075                 | 2713                        | 88,2 | 2119                  | 78,1 | 2119                  | 68,9 |
| Итого по стаду                   | 803           | 1189 | 4386 | 6378                 | 5575                        | 87,4 | 4386                  | 78,7 | 4386                  | 68,8 |

Примечание: н/о - неоплодотворенные яйца, э/о –эмбриональный отход, г/ц – голов цесарят

Средние показатели оплодотворенности инкубационных яиц в стаде при искусственном осеменении, без учета линий составили 87,4 %, выводимости яиц – 78,7 %, вывода молодняка – 68,8%. От селекционируемой птицы было отведено и посажено на выращивание 4386 голов цесарят, что обеспечило потребности хозяйства для получения товарной продукции на 90%.

В процессе дальнейшей работы нами были оценены воспроизводительные показатели птицы опытных групп имеющих общее происхождение. В зависимости от технологии содержания (клеточное с применением искусственного осеменения у селекционного ядра и напольного при естественном спаривании у группы множителей). Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты инкубации яиц полученных от птицы опытных групп

| ЛИНИЯ                               | ГРУППА               | Оплодотворенность яиц, % | Выводимость яиц, % | Вывод молодняка, % |
|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Волжские<br>белые<br>аутосексные -1 | Селекционное<br>ядро | 87,16 ± 1,13             | 79,88 ± 1,34       | 69,62 ± 1,58       |
|                                     | Множители            | 87,36 ± 1,11             | 78,57 ± 1,49       | 68,64 ± 1,61       |
| Волжские<br>белые<br>аутосексные -1 | Селекционное<br>ядро | 90,11 ± 0,99             | 77,74 ± 1,37       | 70,05 ± 1,53       |
|                                     | Множители            | 83,68 ± 1,95             | 74,81 ± 2,20       | 62,60 ± 2,37       |

Из представленных в таблице 2 данных следует, что в целом инкубационные показатели птицы селекционного ядра 1 и 4 линий находились на одном уровне ( $P>0,05$ ). Отсутствие достоверной разницы в показателях селекционной птицы говорит о выравнивании стада по этому показателю. Однако между группами селекционного ядра линии ВБА-1 и множителями этой группы обнаружена статистически достоверная разница по показателям выводимости яиц и вывода молодняка ( $t=2,88$  при  $P<0,005$  и  $t=3,45$  при  $P<0,001$  соответственно). По тем же самым показателям выявлена разница между группами птиц ВБ-4. Показатели выводимости яиц и вывода молодняка птицы селекционного ядра статистически были выше таковых группы множителей ( $t=2,09$  при  $P<0,05$  и  $t=2,68$  при  $P<0,01$ ).

Показатели живой массы цесарят, полученных от линейной птицы, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Живая масса цесарят, кг

| Показатель                    | Линия ВБА-1          |             | Линия ВБ-4           |             |
|-------------------------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
|                               | Селекционн<br>е ядро | Множители   | Селекционн<br>е ядро | Множители   |
| Живая масса цесарят в 12 нед. | 1,17 ± 0,01          | 1,21 ± 0,01 | 1,33 ± 0,01          | 1,19 ± 0,01 |
| в т.ч. самцы                  | 1,18 ± 0,01          | 1,22 ± 0,01 | 1,35 ± 0,01          | 1,16 ± 0,01 |
| самки                         | 1,16 ± 0,01          | 1,20 ± 0,01 | 1,32 ± 0,01          | 1,15 ± 0,01 |
| Живая масса цесарят в 20 нед. | 1,63 ± 0,01          | 1,66 ± 0,01 | 1,71 ± 0,01          | 1,60 ± 0,01 |
| в т.ч. самцы                  | 1,68 ± 0,01          | 1,69 ± 0,01 | 1,73 ± 0,01          | 1,62 ± 0,01 |
| самки                         | 1,59 ± 0,01          | 1,64 ± 0,01 | 1,70 ± 0,01          | 1,58 ± 0,01 |

Анализ живой массы цесарок и цесарей показал, что их мясная продуктивность в 12 недельном возрасте варьировала в зависимости от группы. Наименьшей она была в группе селекционного ядра линии ВБА-1 и статистически отличалась от массы птиц линии ВБ-4 ( $t=-9,573$ ,  $P<0,001$ ). Так же была обнаружена статистически достоверная разница показателей живой массы самцов и самок между некоторыми группами. Так, показатели живой массы самок различны у птиц селекционного ядра 1 и 4 линии ( $t=-8,501$ ,  $P<0,001$ ), между селекционным ядром 1 линии и группой множителей ( $t=-2,047$ ,  $P<0,05$ ). У самцов достоверно различаются показатели живой массы птицы селекционного ядра 1 и 4 линии ( $t=-6,965$ ,  $P<0,001$ ), селекционного ядра 1 линии и группы множителей ( $t=-2,017$ ,  $P<0,05$ ) и селекционного ядра 4 линии и группы множителей ( $t=8,571$ ,  $P<0,001$ ).

Средняя живая масса цесарок и цесарей в возрасте 20 недель также зависела от принадлежности птицы к группе. Наименьшей она была (аналогично показателям 12-недельного возраста) у птицы селекционного ядра аутосексной линии 1. Эти данные статистически отличались от показателей группы множителей и селекционного ядра чистой линии ВБ-4 ( $P<0,05$ ). Сравнительный анализ массы цесарей и цесарок выявил, что существует достоверная разница показателей живой массы внутри каждой опытной группы птицы ( $t=4,565$ ,  $P<0,001$  для селекционного ядра 1 линии,

$t=2,968$ ,  $P<0,005$  для группы множителей,  $t=2,317$ ,  $P<0,05$  для селекционного ядра 2 линии). Между некоторыми группами также наблюдалось отличие этих показателей между самками и самцами. Статистически отличалась живая масса самок аутосексной линии ВБА-1 и чистой линии ВБ-4 ( $t=-2,275$ ,  $P<0,05$ ), линии ВБ-4 и группы множителей ( $t=-2,608$ ,  $P<0,05$ ). Между теми же группами выявлена разница в показателях и у самцов ( $t=-3,629$ ,  $P<0,001$  и  $t=-2,200$ ,  $P<0,05$  соответственно). Анализ данных живой массы цесарят в 12- и 20-недельном возрасте показал, что наивысшая масса была у птицы чистой линии ВБ-4, что указывает на правильность методики подбора птицы в гнезда.

Средняя яйценоскость цесарок, при клеточном способе содержания стада (без учета линий) составила  $153,29 \pm 2,82$  яйца за 9 месяцев кладки. Показатели яйценоскости опытных групп цесарок составили по птице селекционного ядра линии ВБА-1 -  $160,14 \pm 2,53$  яиц, линии ВБ-4 -  $149,60 \pm 2,63$  яиц. Яичная продуктивность линейной птицы из группы множителей составила  $150,28 \pm 2,56$  и  $140,80 \pm 2,47$  штук яиц соответственно. Можно заключить, что яйценоскость птиц в линиях находилась на достаточно высоком для этого вида птицы уровне. Испытание на яичную продуктивность продолжалось практически 9 месяцев (с декабря 2017 г. по август 2018 года), что для цесарок с их явно выраженной сезонностью кладки является практически предельным и не выгодным для хозяйства. Показатели яйценоскости селекционного ядра линии ВБА-1 статистически превосходили таковые всех других опытных групп ( $P<0,05$ ). Необходимо и в дальнейшем вести отбор и подбор родительских пар на закрепление данного уровня яйценоскости у потомков [1, С.47].

Показатели массы яиц снесенных цесарками в 44 недели жизни по линиям составили у птицы селекционного ядра линии ВБА-1  $46,11 \pm 0,21$ , линии ВБ-4 -  $45,94 \pm 0,19$  грамм. Масса яиц снесенными птицами из группы множителей птицы в 44 недели жизни составила  $45,01 \pm 0,23$  и  $44,35 \pm 0,29$  грамма соответственно. Таким образом, масса яиц цесарок линии ВБА-1 превосходила аналогичный показатель у птиц из других групп на  $0,17 - 1,76$  г. Низкие ( $44,74 - 44,35$  г) показатели массы яйца птицы из группы множителей связаны на наш взгляд с кормовой конкуренцией, которая особенно проявляется при напольном способе содержания цесарок.

Цесарки линии ВБА-1 достигали стандартной для породы массы яйца  $38$  г в возрасте  $228$  дня, а цесарки линии ВБ-4 на  $231$  день. При этом число особей, снесивших яйца неправильной формы (продолговатые, округлые и с белой окраской скорлупы) при напольном способе содержания было на  $0,5-1,0$  % меньше, чем при клеточном содержании.

Перед воспроизводством стада у самцов цесарок опытных групп оценили показатели спермопродукции по качественным и количественным признакам. Проведенный анализ спермопродукции цесарей показал, что объем эякулята, активность спермиев их концентрация у цесарей находились примерно на одном уровне. В таблице 4 представлены результаты оценки эякулята цесарей в среднем по опытным группам птицы. Из представленных данных видно, что по всем качественным и количественным показателям спермопродукции самцы селекционного ядра линий ВБА-1 и ВБ-4 превосходили аналогичные показатели самцов из групп множителей.

Таблица 4 – Количественные и качественные показатели спермы цесарей в возрасте 38 недель

| Группы цесарей    | Объем эякулята, мл <sup>3</sup> |                   | Концент. спермиев, млрд/мл <sup>3</sup> |                 | Активность спермиев, баллы |                 |
|-------------------|---------------------------------|-------------------|---|-----------------|----------------------------|-----------------|
|                   | Линия ВБА-1                     | Линия ВБ-4        | Линия ВБА-1                             | Линия ВБ-4      | Линия ВБА-1                | Линия ВБ-4      |
| Селекционное ядро | $0,101 \pm 0,011$               | $0,105 \pm 0,011$ | $4,01 \pm 0,01$                         | $4,36 \pm 0,03$ | $9,32 \pm 0,31$            | $9,41 \pm 0,16$ |
| Группа множителей | $0,100 \pm 0,012$               | $0,092 \pm 0,020$ | $3,88 \pm 0,04$                         | $3,65 \pm 0,05$ | $9,22 \pm 0,19$            | $9,12 \pm 0,29$ |

Проведенные по линиям и группам птицы селекционные мероприятия и индивидуальный анализ продуктивности позволил сформировать родительское стадо для воспроизводства цесарок в новый племенной сезон. Всего в линиях ВБА-1 и ВБ-4 было отобрано и оставлено на племя более  $400$  высокопродуктивных самцов и самок, что позволит воспроизвести в новом племенном сезоне не менее  $3000$  голов ремонтного молодняка, что полностью обеспечит потребности КФХ и позволит сохранить генофонд цесарок волжской белой породы. [3, С.24], [4, С.76].

### Заключение

Изучение продуктивных качеств сохраняемой генофондной группы волжских белых цесарок в условиях крестьянского фермерского хозяйства показало, что произошло некоторое снижение основных продуктивных и воспроизводительных качеств цесарок по сравнению с регистрируемыми ранее показателями в генофондном хозяйстве ЗАО «Марийское» [2, С. 133], [4, С.79]. Особенно это проявилось при учете таких показателей птицы как яйценоскость, выход инкубационных яиц, оплодотворенность яиц, их выводимость и вывод молодняка. Проведенный теоретический расчет выхода цесарят на одну несушку родительского стада за продуктивный период, показал снижение этого показателя на  $10 - 15\%$ . В среднем, от сохраняемого поголовья цесарок за племенной сезон от одной несушки родительского стада можно получить не более  $65,0$  голов суточных цесарят. Полученные показатели обеспечивают возможность формирования в хозяйстве товарного стада и возможный объем продаж племенной продукции не менее  $20$  тыс. шт. инкубационного яйца или  $15$  тыс. голов молодняка.

Анализируя полученные данные, можно предположить, что условия содержания линейных цесарок в хозяйстве не соответствуют требованиям, предъявляемым к содержанию генофондного стада. Малочисленность содержащегося племенного поголовья цесарок привело к фактическому прекращению селекционной работы с этой породой цесарок. Для сохранения на высоком уровне всех хозяйственно-важных показателей генофондного стада цесарок необходимо продолжить ведение индивидуального и семейного учета продуктивности для селекционного отбора [1, С.45]. Четко определить оптимальную структуру племенного стада цесарок, определиться с технологией содержания, провести увязку циклов воспроизводства племенного и товарного стада птицы с расчетами выхода племенной и товарной

продукции для собственных нужд и для производства товарной продукции. Такой подход может создать благоприятные условия для размножения особей обладающих выдающимися качественными и количественными признаками.

#### Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (тема № 0528-2019-0089)

#### Funding

The work was carried out as part of the State assignment of the Federal State Budgetary Institution of Economics of the North East (topic No. 0528-2019-0089).

#### Благодарности

Авторы благодарят руководителя научного направления - генетика и селекция ФНЦ «ВНИТИП» РАН Ройтера Якова Соломоновича за огромное участие в спасении генофондного стада волжских белых цесарок.

#### Acknowledgement

The authors thank the head of research area: genetics and breeding FNTS "VNITIP" the wounds of Reuter Yakov Solomonovich huge part in saving the gene pool of the herd Guinea fowls.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared..

#### Список литературы / References

1. Забиякин В.А., Приемы комплектования селекционных гнезд и биоразнообразие цесарок в генофондном хозяйстве /В.А. Забиякин, М.Е. Вельдина, А.Л. Кропотова, Т.В.Забиякина // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2013. - № 1(32). – С.44-48
2. Забиякин, В.А. К 100-летию ученого цесарководы Вейцмана Льва Натановича (9.01.1920 – 26.07.2008) / В.А. Забиякин // Современные проблемы медицины и естественных наук: сборник статей Всероссийской научной конференции / Мар. гос. ун-т. - Йошкар-Ола, 2019. - Вып.8. - С. 133-134.
3. Забиякин, В.А. Разведение цесарок в России /В.А. Забиякин // Эффективное животноводство. – 2017. - № 3.(57) – С. 24-28.
4. Забиякин, В.А. Сохранение биоразнообразия цесарок в генофондном хозяйстве /В.А. Забиякин, Ю.В.Зайцева, А.Л. Кропотова, Т.В. Забиякина // Птахівництво: Міжвдомчий тематичний науковий збірник. – 2014. - № 71 –Харків, 2014.- С. 76-82.
5. Производство мяса и яиц цесарок: методические рекомендации / Я. С. Ройтер, Н. К. Гусева, В. И. Подтелков, В. М. Митюшников, В. А. Забиякин// под общ. ред. Я. С. Ройтера.- Сергиев Посад, 1993. – 22 с.
6. Ройтер Я. Использование генофонда сельскохозяйственной птицы в селекционной работе /Ройтер Я.С.// Птица и птицепродукты. 2016. № 3. С. 45-47.
7. Ройтер Я. Особенности селекционной работы с цесарками / Ройтер Я.С., Шашина Г.В., Дегтярёва Т.Н., Лесик О.П.// Птицеводство. 2016. № 3. С. 7-11.
8. Ройтер Я. Разведение цесарок в фермерских и приусадебных хозяйствах / Ройтер Я.С., Шашина Г.В., Дегтярева Т.Н., Лесик О.П.// Птица и птицепродукты. - 2017. № 2. С. 29-31.
9. Ройтер Я. Цесарки /Ройтер Я.С.// Руководство по содержанию и разведению / Москва, 2014.с. 218
10. Фисинин В. И. Генетические ресурсы сельскохозяйственных животных России / В. И. Фисинин// Достижения науки и техники АПК. - 2004. - № 8. - С. 15-19.

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

1. Zabyakin V. A., Methods of completing breeding nests and the biodiversity of Guinea fowl in the gene pool economy /V. A. Zabyakin, M. E. Veldina, A. L. Kropotova, T. V. Zabyakina // agrarian science of the Euro-North-East. – 2013. - № 1(32). – Pp. 44-48 [in Russian]
2. Zabyakin, V. A. To the 100th anniversary of the scientist tsesarkovod Weizman Lev Natanovich (9.01.1920-26.07.2008) / V. A. Zabyakin // Modern problems of medicine and natural Sciences: collection of articles of the all-Russian scientific conference / Mar. UN-T.-Yoshkar-Ola, 2019. - Issue 8. - P. 133-134. [in Russian]
3. Zabyakin, V. A. breeding of Guinea fowl in Russia / V. A. Zabyakin // Effective animal husbandry. – 2017. - № 3.(57) – Pp. 24-28. [in Russian]
4. Zabyakin, V. A. Conservation of Guinea fowl biodiversity in the gene pool economy /V. A. Zabyakin, Yu. V. Zaitseva, A. L. Kropotova, T. V. Zabyakina // Pтахivnitsvo: Mizhvdomchiy tematiczny naukovi y zbirnik. - 2014. - № 71-Harkiv, 2014. - Pp. 76-82. [in Russian]
5. Production of meat and eggs of Guinea fowls: methodological recommendations /Ya. S. Roiter, N. K. Guseva, V. I. Podtelkov, V. M. Mityushnikov, V. A. Zabyakin// under the General ed.Ya. S. Roiter. Sergiev Posad, 1993, 22 p. [in Russian]
6. Reuter Ya. Using the gene pool of agricultural poultry in breeding work / Reuter Ya. S. // Poultry and poultry products. 2016. no. 3. Pp. 45-47. [in Russian]
7. Reiter Ya. Features of breeding work with Guinea fowls / Roiter Ya. S., Shashina G. V., Degtyareva T. N., Lesik O. P. // poultry Farming. 2016. no. 3. P. 7-11. [in Russian]
8. Reuter Ya. Breeding Guinea fowl in farms and homesteads / Roiter Ya. S., Shashina G. V., Degtyareva T. N., Lesik O. P. // Poultry and poultry products. - 2017. no. 2. Pp. 29-31. [in Russian]
9. Roiter Ya. Guinea Fowl / Roiter Ya. S. // Guide to maintenance and breeding / Moscow, 2014. p. 218
10. Fisinin V. I. Genetic resources of agricultural animals of Russia / V. I. Fisinin// Achievements of science and technology of the agro-industrial complex, 2004, no. 8, Pp. 15-19. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.031>

# СЦЕПЛЕННОЕ С ГЕНАМИ ОКРАСКИ ПЕРИКАРПА РИСА НАСЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ

Научная статья

Костылев П.И.<sup>1,\*</sup>, Балукова Э.С.<sup>2</sup>, Серапионов Г.А.<sup>3</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4371-6848;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8976-2703;<sup>1,2</sup> Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия;<sup>3</sup> Азово-Черноморский инженерный институт Донской ГАУ, г. Зерноград, Россия

\* Корреспондирующий автор (p-kostylev[at]mail.ru)

## Аннотация

В статье представлены результаты изучения наследования ряда признаков у гибридов второго поколения от скрещивания белозерного сорта риса Кубояр с черnozерным сортом Гагат. Исследования были проведены в АНЦ «Донской» в 2018-2019 гг. Генетический анализ гибридов F<sub>2</sub> показал, что расщепление по окраске перикарпа проходило по тригибридной схеме в соотношении 27 черных: 21 коричневых: 16 белых. Наследование высоты растений у F<sub>2</sub> происходило по типу частичного доминирования больших значений признака и аллельных различий трех пар генов. По длине метелки – сверхдоминирование больших значений и положительная трансгрессия. По числу колосков на метелке – сверхдоминирование и взаимодействие трех пар генов. По массе 1000 зерен – отрицательное сверхдоминирование признака и дигенные различия родительских форм. По длине зерновки доминирование отсутствовало, родительские формы различались по двум парам генов. По ширине зерен доминировали меньшие значения признака, расщепление происходило по моногибридной схеме. Установлено сцепление локусов всех изученных признаков с генами окраски перикарпа. Проведен отбор выделившихся образцов с черной окраской перикарпа, сочетающих оптимальную высоту растения, длину метелки, озерненность и массу 1000 зерен для селекционной работы.

**Ключевые слова:** рис, гибрид, наследование, количественные признаки, высота растений, длина метелки, зерновка, окраска перикарпа.

## QUANTITATIVE INHERITANCE LINKED TO THE GENES OF THE PERICARP COLORATION OF RICE

Research article

Kostylev P. I.<sup>1,\*</sup>, Baliukova E. S.<sup>2</sup>, Serapionov G. A.<sup>3</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4371-6848;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8976-2703;<sup>1,2</sup> Agricultural research center "Donskoy", Zernograd, Russia;<sup>3</sup> Azov-Black Sea Engineering Institute - affiliate "Don State Agrarian University", Zernograd, Russia

\* Corresponding author (p-kostylev[at]mail.ru)

## Abstract

This article presents the results of the research on the inheritance of a number of attributes of the F<sub>2</sub>-hybrids of the white-grained Kuboyar rice and the black-grained Gagat rice. The study was conducted at the Agricultural research center "Donskoy" in 2018-2019. The genetic analysis of F<sub>2</sub>-hybrids revealed that pericarp coloration splitting goes according to the following trihybrid scheme: 27 black to 21 brown to 16 white. Height inheritance of the F<sub>2</sub> occurred in the form of incomplete dominance of large character values and allelomorphous differences of three gene pairings. On the panicle length, there was superdominance of significant values and positive transgression. On the number of spikelets on a panicle, there was superdominance and interaction of three gene pairings. On the mass of a thousand grains, there was negative superdominance of the character and the digenic differences of the seed parent. On the caryopsis length, there was no dominance, and the seed parents varied in the two gene pairings. On the grain width, there was the dominance of the lesser character values, and the splitting occurred in the monohybrid form. Loci linkage of all the studied characteristics to the pericarp coloration genes was established. The samples having black pericarp coloration with the optimum plant height, panicle length, grains and the weight of a thousand grains were selected for breeding.

**Keywords:** rice, hybrid, inheritance, quantitative characters, plant height, panicle length, caryopsis, pericarp coloration.

## Введение

Рис – это одна важная пищевая культура большинства народов Земли. Обычно используется белый рис, но бывают и сорта с черной, коричневой или красной окраской перикарпа зерна [1].

Эти природные красители (антоцианы и антоцианидины) обладают сильным антиоксидантным и антимутационным действием и очень полезны для здоровья человека [2]. Поэтому селекционеры стремятся создать сорта риса с окрашенным перикарпом и большой урожайностью. Для успеха этой работы нужно знать особенности наследования признаков окраски и продуктивности зерна.

Японские ученые установили, что доминантные аллели в трех локусах Kala1, Kala3 и Kala4 совместно дают черный цвет перикарпа зерна. Коричневые зерна были у растений с доминантным аллелем Kala4, а белые – у растений, несущих рецессивные аллели Kala4, независимо от других генов [3].

Высота растений риса влияет на урожайность за счет устойчивости к полеганию и индекса урожая. Она контролируется локусами количественных признаков (QTL), которые картированы на всех 12-ти хромосомах [4], [5].

Длина метелки риса влияет на такие компоненты урожайности, как количество зерен в метелке, ее плотность и качество зерна риса. Выявлено более 200 локусов количественных признаков длины метелки (QTL), но только небольшое их количество применяется в селекции риса [6].

Количество зерновок на метелке и их масса – это очень важные признаки, непосредственно определяющие урожайность зерна риса. В настоящее время идентифицировано 58 QTL, распределенных по всем 12 рисовым хромосомам, в том числе 22 – по количеству зерен на метелке, 17 – по количеству колосков на метелке и 19 – по фертильности колосков [7]. Susilowati et al. (2017) сообщили о четырех основных QTL для числа зерен на метелке, которые находились в хромосомах 1, 4, 6 и 7 [8].

Высокая урожайность риса в значительной степени зависит от размеров и массы зерновки. Xu F. et al. (2016) исследовали 416 образцов риса с помощью 143 маркеров и обнаружили 27 QTL, влияющих на размеры зерна. Широко распространенный локус *GS3* тесно связан с длиной, шириной зерновки и соотношением  $l/b$  [9]. Основной QTL для массы зерновки был идентифицирован возле центромеры хромосомы 3, другие QTL – в хромосомах 2, 5, 8 и 12 [10]. Селекция черnozерного риса ведется во ВНИИ риса (Краснодарский край). Выведение такого риса для Ростовской области также является актуальным, поэтому нужно знать особенности наследования признаков у гибридов от скрещивания белозерных и черnozерных сортов.

Цель работы: изучение наследования качественных и количественных признаков у межподвидового гибрида риса Кубояр × Гагат и их сцепления друг с другом.

### Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовали гибриды  $F_2$  из комбинации Кубояр × Гагат. Сорт Кубояр – селекции АНЦ «Донской» среднеспелый, вегетационный период – 125 дней. Высота растений средняя, 85-94 см. Метелка прямостоячая, длиной 15 см, несет 140-170 колосков. Зерна овальные, средней величины, длиной 8,5 мм, шириной 3,5 мм. Масса 1000 зерен – 28-29 г. Перикарп зерновки – белый.

Сорт Гагат – селекции ВНИИ риса, среднепоздний, вегетационный период – 130 дней. Растения высокорослые, 115-120 см. Метелка поникающая, длиной 17-23 см, несет 120-150 колосков в метелке. Сорт длиннозерный, длина зерновки 10,2 мм, ширина – 2,8. Масса 1000 зерен – 31-32 г. Перикарп зерновки – темно-фиолетовый, почти черный.

Исследования проводили в 2018-2019 гг. на полях ОП «Пролетарское» АНЦ «Донской» Ростовской области. Гибридизацию этих сортов провели в 2017 году. Математическую обработку данных проводили с помощью программ Statistica 8 и Excel. Для генетического анализа использовали программу Полиген А.

### Результаты исследований

При скрещивании белозерного сорта Кубояр с черnozерным сортом Гагат в  $F_1$  формировалось черное зерно, что свидетельствует о полном доминировании этого признака.

Второе поколение расщепилось на три типа окраски, среди которых появилась коричневая. Расщепление проходило по тригибридной схеме в соотношении 27 черные: 21 коричневые: 16 белые. Отклонения фактических частот от теоретических были незначительными. Различия между родительскими сортами заключались в аллельном состоянии трех генов: Kala 1, Kala 3 и Kala 4. У Кубояра они были рецессивными, генная формула –  $k1k1\ k3k3\ k4k4$ , у Гагата – доминантными  $K1K1\ K3K3\ K4K4$ , которые совместно определяли окраску перикарпа зерна. Черная окраска перикарпа формировалась при наличии трех доминантных генов.

Гибридная популяция второго поколения показала широкий спектр изменчивости по количественным признакам растений. Было проведено сравнение конфигураций кривых распределения частот количественных признаков (далее КРЧ) отдельно в каждой из трех групп окраски зерна: черной (ЧЗ), коричневой (КЗ) и белой (БЗ). При отсутствии сцепления с генами окраски эти кривые должны существенно совпадать друг с другом и наоборот, нахождение QTL в одной хромосоме с генами окраски зерна должно повлиять на характер распределения частот признаков по классам.

По признаку «высота растений» родительские формы значительно различались, в среднем на 24,1 см. У сорта Кубояр она составила 91,5 см, у сорта Гагат – 115,6 см, у гибрида в среднем 105,7 см при частичном доминировании больших значений признака ( $h_p = 0,32$ ).

КРЧ гибрида  $F_2$  выходили за пределы изменчивости родительских форм, наблюдалось выщепление трансгрессивных форм (рис. 1).

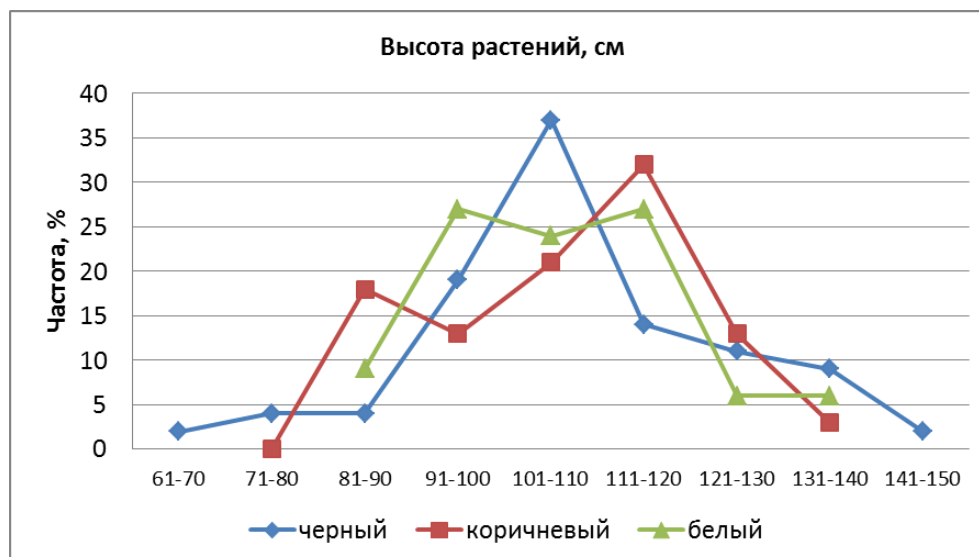


Рис. 1 – Распределение частот признака «высота растений» у гибрида риса

Средние значения высоты в каждой группе окраски различались незначительно, в пределах 105,2-106,8 см. При этом конфигурации их КРЧ были совершенно разными. У форм с коричневыми зернами КРЧ была с двумя вершинами, смещенными влево и вправо от вершины чернозерных форм, при этом правая вершина была больше, чем левая, что свидетельствует о частичном доминировании больших значений признака. КРЧ белозерных форм имела две одинаковые вершины, близко расположенные друг к другу. У чернозерных форм КРЧ была наиболее широкой, охватывая 9 классов, и формировала одну центральную вершину. Большинство растений этой группы имели высоту 101-110 см, однако встречались и карлики (61-70 см) и очень высокорослые (141-150 см). Таким образом, часть генов высоты были расположены в хромосомах 1, 3 и 4, так как показали сцепление с генами Kala.

Длина метелки составила в среднем у Кубояра 14,9 см, Гагата – 19,5 см, гибрида – 20,8 см. Средняя длина метелки составила в группе ЧЗ – 21,0, КЗ – 21,4, БЗ – 19,9 см. Степень доминирования составила  $h_r = 1,36$ , т.е. наблюдалось сверхдоминирование. КРЧ гибрида имели правостороннюю асимметрию и во всех трех группах окраски выходили вправо за пределы изменчивости большего родительского сорта Гагат, наблюдалась положительная трансгрессия, частота которой составила в среднем 11,7%. При этом КРЧ у форм КЗ была двухвершинной, а у ЧЗ и БЗ – одновершинной. Большая вершина КЗ и вершина БЗ находились в одном классе с величиной признака сорта Гагат (18,1-20 см), а у ЧЗ – смещена вправо (рис. 2).

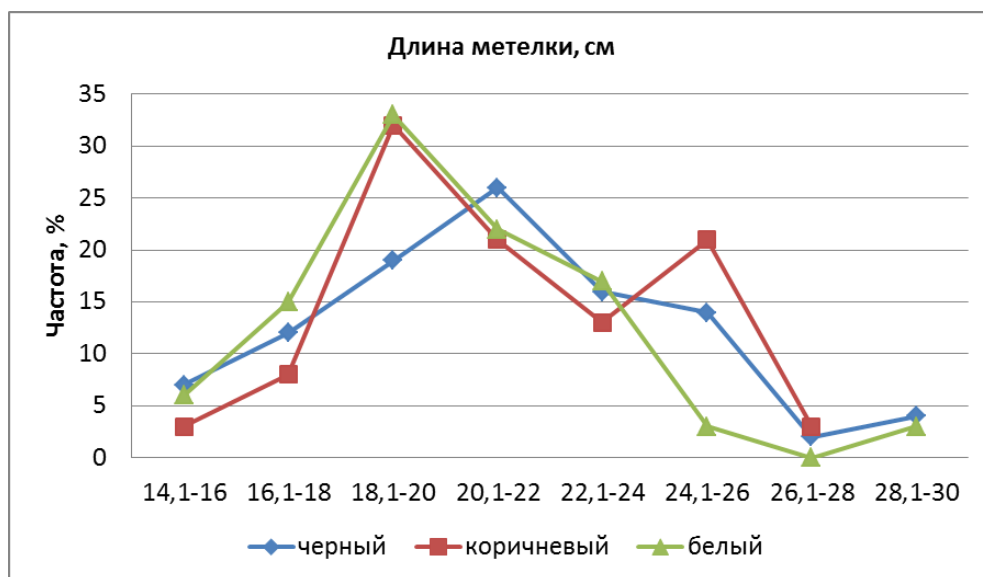


Рис. 2 – Распределение частот признака «длина метелки» у гибрида риса

Вторая вершина форм КЗ находится в классе 24-26 см, и указывает на то, что у форм с коричневым зерном было значительно больше длинных метелок, чем в других группах. Следовательно, гены, контролирующие этот признак, сцеплены с геном Kala 4 в четвертой хромосоме, который обуславливает коричневую окраску перикарпа.

По признаку «число колосков на метелке» исходная родительская форма Гагат (100,2 шт.) уступала сорту Кубояр (141,4 шт.) на 41,2 шт. Среднее количество колосков на метелке у гибрида составило 233,4, варьируя от 44 до 458 штук. Степень доминирования ( $h_r$ ) составила 5,47, что свидетельствует о сверхдоминировании большей величины признака. Установлено взаимодействие трех пар генов, причем у каждой родительской формы были и рецессивные, и доминантные аллели, но в разных локусах. Наблюдалось выщепление множества форм с большим количеством колосков, чем у родительских сортов, что указывает на трансгрессивное расщепление. Среднее число колосков на метелке в группе КЗ (254,3) было значительно больше, чем в ЧЗ (221,0) и БЗ (222,8). Конфигурации КРЧ гибридов в трех группах значительно различались, а их вершины находились в соседних классах (рис. 3).



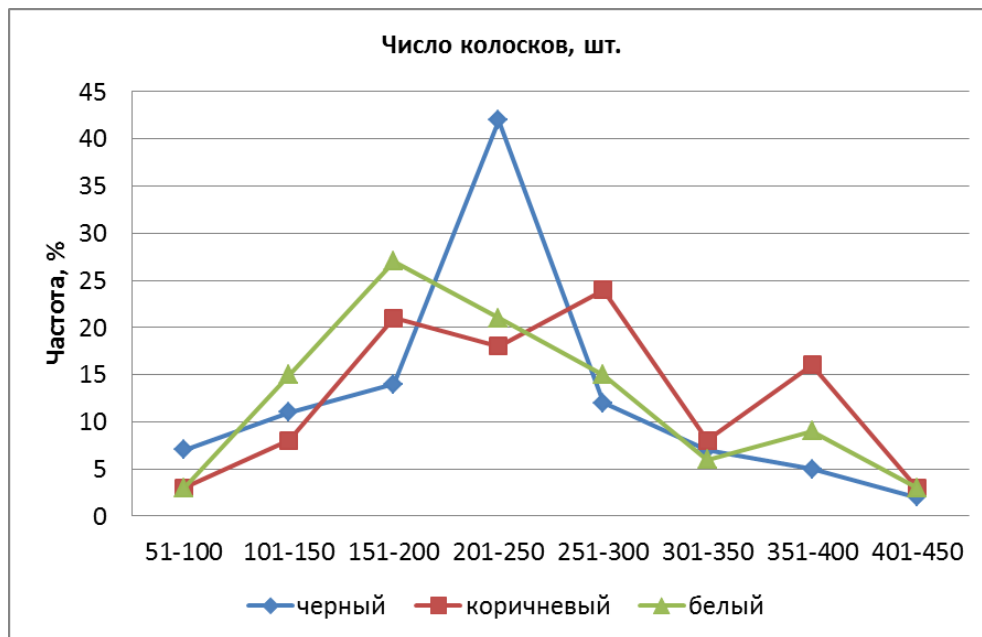


Рис. 3 – Распределение частот признака «число колосков на метелке» у гибрида риса

Левее всех находилась вершина КРЧ гибридных форм БЗ (класс 151-200 шт.), в центре была вершина КРЧ форм ЧЗ (201-250 шт.). У форм КЗ было 3 вершины, две из которых располагались значительно правее остальных. Это указывает на то, что в 4-й хромосоме вместе с геном Kala 4 находятся гены, увеличивающие число колосков на метелке. Для селекции очень значимы положительные трансгрессии, возникающие при рекомбинациях генов.

Общее количество колосков в метелке положительно коррелировало с числом зёрен на ней ( $r = 0,48 \pm 0,08$ ), числом пустых колосков ( $r = 0,72 \pm 0,08$ ) и плотностью метелки ( $r = 0,92 \pm 0,08$ ). Фертильность форм КЗ (48,2%) была значительно выше, чем у ЧЗ (38%) и БЗ (45,4%). Это повлияло и на различия по количеству завязавшихся зерен на метелке: у КЗ – 128,0, у ЧЗ – 83,5, у БЗ – 92,3 штук (в среднем у гибрида 101,3 шт.).

По признаку «масса 1000 зерен» исходные родительские формы различались на 2,8 г. У Кубояра она составляла 28,6 г, у Гагата – 31,4 г. Масса 1000 зерен в  $F_2$  варьировала в пределах от 17 до 37 г (в среднем 27,2 г). Расщепление было в соотношении 1:4:6:4:1, что можно объяснить наличием у родительских сортов в двух разных локусах доминантных аллелей с различной силой влияния на величину признака. КРЧ гибридов по группам значительно различались (рис. 4).

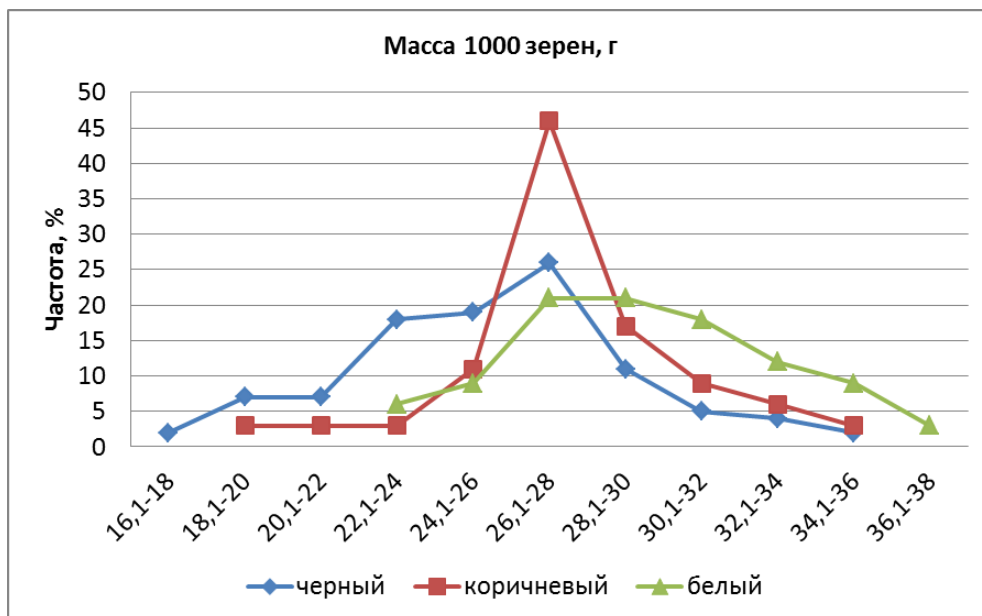


Рис. 4 – Распределение частот признака «масса 1000 зёрен» у гибрида риса

КРЧ форм с БЗ была сдвинута вправо относительно таковой форм КЗ, а у форм ЧЗ, наоборот, влево, что повлияло на среднюю величину этого признака: у форм ЧЗ – 25,8 г, КЗ – 27,8 г, БЗ – 29,2 г. Формы с белым перикарпом имели более крупное зерно, чем с коричневым и особенно с черным. Здесь также проявилось сцепление генов. Выявлено 8 трансгрессивных растений с массой 1000 зерен от 34 до 37 г.

По длине зерновки исходный родительский сорт Гагат (10,5 мм) значительно превосходил сорт Кубояр (8,4 мм) на 2,1 мм. У гибридов этот признак колебался от 7,5 до 12 мм, в среднем – 9,5 мм. Доминирование отсутствовало ( $h_r = 0,05$ ). Расщепление произошло в соотношении 1:4:6:4:1 при взаимодействии двух пар генов.

КРЧ гибрида в трех группах различались по конфигурации и имели по две вершины – большую слева и маленькую справа (рис. 5). Большие вершины в группах КЗ и БЗ находились в одном классе (9,1-9,5 мм), а у форм ЧЗ была смещена вправо и поэтому средняя длина зерновки (9,7 мм) у них была несколько больше, чем у БЗ (9,5 мм) и КЗ (9,4 мм). Это указывает на сцепление локусов длины зерновки с генами окраски перикарпа.

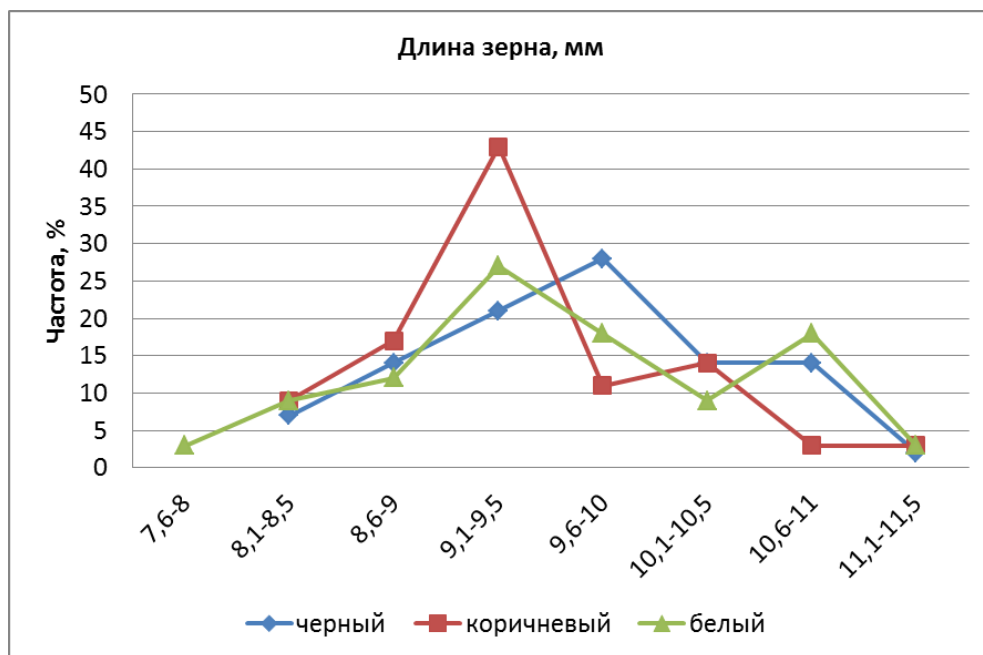


Рис. 5 – Распределение частот признака «длина зерновки» у гибрида риса

По ширине зерен родительские сорта различались на 0,5 мм, у Кубояра она составила 3,4 мм, у Гагата – 2,9 мм. Средняя ширина зерновки у гибридов  $F_2$  оказалась 3,07 мм, варьируя в пределах изменчивости родительских сортов от 2,6 до 3,7 мм. Наблюдались правосторонняя асимметрия и доминирование меньших значений признака ( $h_r = -0,32$ ). Расщепление происходило по моногибридной схеме в соотношении 3:1.

КРЧ трех фракций гибрида также различались между собой. Они были одновершинными, причем левая вершина соответствовала формам ЧЗ, правая – БЗ (рис. 6). Посередине между ними располагалась КРЧ форм КЗ.

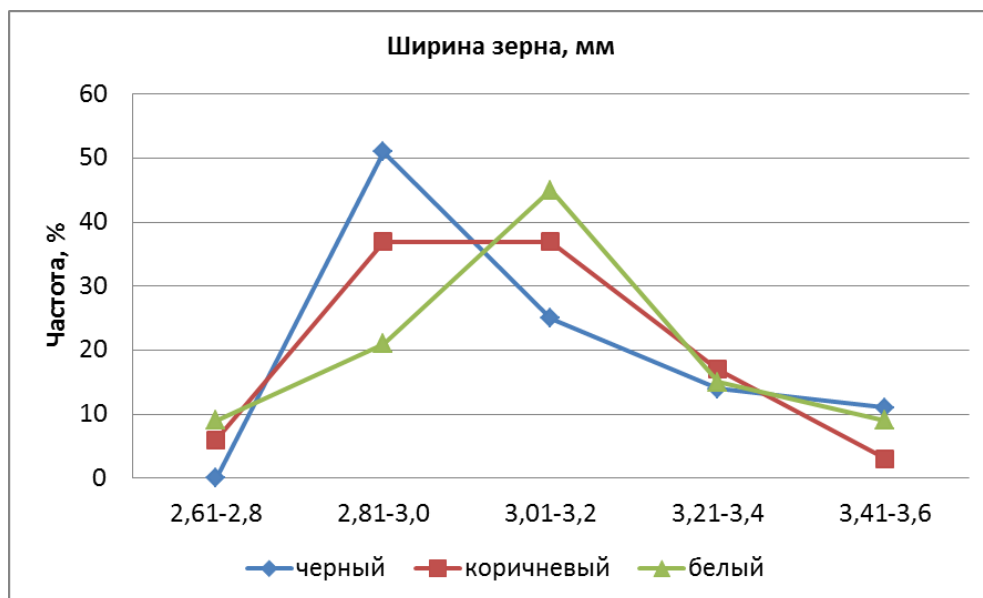


Рис. 6 – Распределение частот признака «ширина зерновки» у гибрида риса

Таким образом, формы ЧЗ имели более длинное, узкое, мелкое зерно по сравнению с другими группами. Для того, чтобы преодолеть это сцепление признаков, нужно искать образцы с новым сочетанием генов, возникающим в результате кроссинговера.

Из популяции  $F_2$  были выделены лучшие формы, сочетающие черную окраску перикарпа с оптимальной высотой растений, повышенной озерненностью и массой 1000 зерен. Их высота колебалась в пределах 70-130 см, длина метелки – 14,4-25,0 см, общее число колосков – 98-387 шт., масса 1000 зерен – 20,5-33,3 г, длина зерна – 8,2-10,6 мм, ширина зерна – 2,8-3,5 мм. Эти формы посеяны на третье поколение в гибридном питомнике для последующего создания сортов риса с черным перикарпом зерновки.

## Выводы

1. Расщепление по окраске перикарпа проходило по тригибридной схеме по типу комплементарности в соотношении 27 черных: 21 коричневых: 16 белых. Черная окраска перикарпа формировалась при наличии в генотипе трех доминантных генов Kala 1, Kala 3 и Kala 4, коричневая – определялась геном Kala 4, белая – остальными комбинациями генов.

2. Наследование признака «высота растения» происходило с частичным доминированием больших значений признака ( $h_p = 0,32$ ). Исходные родительские формы различались по аллельному состоянию трех пар генов.

3. По длине метелки наблюдали сверхдоминирование больших значений ( $h_p = 1,36$ ) и положительную трансгрессию. Различия между родителями были больше, чем по одной паре генов.

4. По числу колосков на метелке установлено сверхдоминирование ( $h_p = 5,47$ ) и взаимодействие трех пар генов.

5. По массе 1000 зерен установлены отрицательное сверхдоминирование этого признака ( $h_p = -2,0$ ), расщепление 1:4:6:4:1, т.е. дигенные различия.

6. По длине зерновки доминирование отсутствовало ( $h_p = 0,05$ ), расщепление в соотношении 1:4:6:4:1 при взаимодействии двух пар генов.

7. По ширине зерен доминировали меньшие значения признака ( $h_p = -0,32$ ). Расщепление было по моногибридной схеме в соотношении 3:1.

8. По трем группам форм с черным, коричневым и белым перикарпом конфигурации кривых распределения частот были особенными и не совпадали, что свидетельствует о сцеплении локусов всех изученных признаков с генами окраски перикарпа.

9. Для дальнейшей селекционной работы отобраны формы  $F_2$  с черной окраской перикарпа, сочетающие оптимальную высоту растения, длину метелки, повышенную озерненность и массу 1000 зерен.

## Конфликт интересов

Не указан.

## Conflict of Interest

None declared.

## Список литературы / References

1. Kushwaha U.K.S. Black Rice: Research, History, and Development / U.K.S. Kushwaha // Adv. Plants Agric. Res. 2016. – XX. – 192 p. DOI: 10.15406/apar.2016.05.00165
2. Ciulu M. Extraction and Analysis of Phenolic Compounds in Rice: A Review / M. Ciulu, M.L. Cádiz-Gurrea, A. Segura-Carretero // Molecules, 2018. – 23(11). – 2890. <https://doi.org/10.3390/molecules23112890>
3. Maeda H. Genetic dissection of black grain rice by the development of a near isogenic line / H. Maeda, T. Yamaguchi, M. Omoteno, T. Takarada, K. Fujita, K. Murata, Y. Iyama, Y. Kojima, M. Morikawa, H. Ozaki, N. Mukaino, Y. Kidani, T. Ebitani // Breed Sci., 2014. – Vol. 64(2). – P. 134–141. DOI: 10.1270/jsbbs.64.134
4. Zhou L. Dissection of genetic architecture of rice plant height and heading date by multiple-strategy-based association studies / L. Zhou, S. Liu, W. Wu, D. Chen, X. Zhan, A. Zhu, Y. Zhang, S. Sheng, L. Cao, X. Lou, H. Xu // Scientific Reports, 2016. – 6. – P. 29718.
5. Han Z. QTLs for heading data and plant height under multiple environments in rice / Z. Han, W. Hu, C. Tan, Y. Xing // Genetica, 2017. – 145. – P. 67–77. doi: 10.1007/s10709-016-9946-6.
6. Wang X. Identification and application of major quantitative trait loci for panicle length in rice (*Oryza sativa*) through single-segment substitution lines / X. Wang, G. Liu, Zh. Wang, S. Chen, Y. Xiao, Ch. Yu // Plant breeding. 2019. – Vol. 138(3). – P. 299–308. <https://doi.org/10.1111/pbr.12687>
7. Niu X. Identification and validation of quantitative trait loci for grain number in rice (*Oryza sativa* L.) / X. Niu, Y. Zhu, Zh. Sun, S. Yu, J. Zhuang, Y. Fan // Agronomy. 2020. – Vol. 10. – P. 180. doi:10.3390/agronomy10020180
8. Susilowati M. Identification of a major quantitative trait locus for grain weight in rice using microsatellite marker / M. Susilowati, H. Aswidinnoor, W. Enggarini, K.R. Trijatmiko // Makara Journal of Science. 2017. – Vol. 21. – No. 4. – P. 155–162. doi: 10.7454/mss.v21i4.6590
9. Xu F.F. Association mapping of quantitative trait loci for yield-related agronomic traits in rice (*Oryza sativa* L.) / F.F. Xu, L. Jin, Y. Huang, Ch. Tong, Y.L. Chen, J.S. Bao // Journal of Integrative Agriculture, 2016. – 15(10). – P. 2192–2202. doi: 10.1016/S2095-3119(15)61244-8
10. Yuan H. OsSPL18 controls grain weight and grain number in rice / H. Yuan, P. Qin, L. Hu, S. Zhan, S. Wang, P. Gao, J. Li, M. Jin, Z. Xu, Q. Gao, A. Du, B. Tu, W. Chen, B. Ma, Y. Wang, S. Li // Journal of Genetics and Genomics, 2019. – 46. – P. 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2019.01.003>

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.032>**ФИТОСАНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОСЕВОВ СОИ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ**

Научная статья

**Коваленко Т.К.<sup>1,\*</sup>, Лукашенко А.В.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1432-4500;<sup>1,2</sup> Дальневосточный научно-исследовательский институт защиты растений, с. Камень - Рыболов, Россия

\* Корреспондирующий автор (biometod[at]rambler.ru)

**Аннотация**

В статье приведены результаты полевых исследований по изучению фитосанитарной обстановки в посевах сои в Приморском крае 2017-2019 гг. Выявлен комплекс вредителей, относящихся к отрядам жесткокрылые, чешуекрылые, равнокрылые, полужесткокрылые. Определены доминирующие виды вредителей: *Paraluperodes suturalis nigrobilineatus* Motsch., *Aphis glycinis* Mats., *Leguminivora glycinivorella* Mats. Установлена роль энтомофагов в снижении численности вредителей в посевах сои.

**Ключевые слова:** соя, фитомониторинг, вредители, фитофаги, энтомофаги, агроценоз.

**PHITOSANITARY CONDITION OF SOWINGS OF SOYBEANS IN THE PRIMORSKY KRAI**

Research article

**Kovalenko T.K.<sup>1,\*</sup>, Lukachenko A.V.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1432-4500;<sup>1,2</sup> Far Eastern Scientific Research Institute for Plant Protection, Kamen-Rybolov, Russia

\* Corresponding author (biometod[at]rambler.ru)

**Abstract**

This article provides results of the field studies of the phitosanitary situation of sowings of soybeans in the Primorsky krai in 2017-2019 years. Complex of pests referred to the order of Coleoptera, Lepidoptera, Homoptera, Hemiptera has been revealed. The dominant pests species were identified: *Paraluperodes suturalis nigrobilineatus* Motsch., *Aphis glycinis* Mats., *Leguminivora glycinivorella* Mats. The role of entomophages in reducing the number of pests in soybean crops has been established.

**Keywords:** soybean, phytomonitoring, agroecosystems, pests, phytophages, entomophagous

**Введение**

Соя является самой перспективной агрокультурой в России. Лидирующую позицию по объему производства сои занимает Дальневосточный округ. В Приморском крае соя является одной из основных экономически значимых сельскохозяйственных культур. В 2019 г. соей в крае было засеяно 275 тыс. га. Средняя урожайность культуры по стране колеблется в пределах 11-14 ц/га. Урожай сои в значительной степени зависит от влияния целого ряда различных факторов, из которых особое значение имеют болезни и вредители. С ростом площадей посева культуры эта проблема приобретает все большую остроту.

Видовой состав вредителей сои от известен, но уровень доминирования, вредоносность и численность насекомых на сое постоянно варьирует, что обусловлено действием абиотических и биотических факторов среды, которые влияют на развитие и размножение фитофагов [1], [2].

Для эффективной защиты сои от вредных организмов одним из обязательных мероприятий интегрированной технологии является мониторинг фитосанитарного состояния посевов, который позволяет своевременно обнаружить и спрогнозировать их распространение и разработать методы борьбы. Изучение видового состава, закономерностей формирования энтомоценоза в посевах сои на различных этапах онтогенеза растений, выявление наиболее многочисленных видов фитофагов и приемов ограничения их численности являются, вопросами, несомненно, актуальными.

В связи с этим, основной целью исследований являлось уточнение видового состава фитофагов сои, определение вредных видов. В процессе исследований решались следующие задачи:

- уточнить видовой состав фитофагов агроценозов сои;
- установить динамику численности вредителей, циклы развития и сопряженность с фазами развития растения-хозяина.

**Материалы и методы исследования**

Учеты насекомых и наблюдения за растениями осуществляли во время маршрутных обследований и на стационарном участке: п. Тимирязевский Уссурийского района (ФГБНУ «ФНЦ агроботехнологий Дальнего Востока им. А. К. Чайки») на пяти сортах сои (Приморская 4, Сфера, Приморская 86, Приморская 96, Муссон) во все фазы развития культуры. Для установления видового состава фитофагов соевого агроценоза использовали общепринятые методы исследований: кошение энтомологическим сачком (10 проб по 10 взмахов) с последующим определением насекомых в лабораторных условиях, визуальный осмотр растений (учет вредителей проводили путем осмотра 100 растений – 10 проб по 10 растений, размещаемых по участку в шахматном порядке).

**Результаты исследования и обсуждение**

В начальный период роста и развития сои опасность представляют жуки листоеда соевого полосатого, личинки листоеда соевого многоядного, гусеницы подгрызающих совок, клубеньковые долгоносики. В июне-июле листья сои повреждают многоядные вредители: луговой мотылек, совки, соевая желтушка, клопы, соевая тля.

Из семейства листоедов (Coleoptera, Chrysomelidae) в фазу всходов – первого-второго тройчатых листьев на всех сортах сои в годы исследований преобладал листоед соевый полосатый *Paraluperodes suturalis nigrobilineatus* Motsch. со средней численностью 2,9-8,4 жуков/м<sup>2</sup>, численность была ниже ЭПВ. Для молодых растений особенно опасен листоед соевый многоядный *Atrachya menetriesi* Fald. В 2018 г. средняя численность в крае составила 10 лич./м<sup>2</sup>, максимальная – 25 лич./м<sup>2</sup>. В фазу цветения в посевах сои отмечен четырехточечный листоед *Monolepta quadriguttata* Motsch. (1,2-2,8 жуков/10 взмахов). Наибольшая численность отмечена на сорте Приморская 86. В агроценозах сои в единичных экземплярах отмечены 2 вида клопов-щитников (Hemiptera, Pentatomidae): клоп ягодный *Dolycoris baccarum* L., щитник ярко-зеленый *Palomena viridissima* Poda и полевой клоп *Lygus pratensis* L. (Miridae). Клопы встречались на сортах Приморская 86 и Приморская 96. Чешуекрылые на сое представлены семействами совки *Noctuidae*, огневки *Pyrallidae*, листовертки *Tortricidae*. Совка донниковая *Heliothis maritima* Graslin и совка стальниковая *Pyrria umbra* Hufnagel встречались на сортах Приморская 86, Приморская 96, Приморская 4 с численностью 2-4 гусеницы на 10 взмахов сачком. При воспитании в лабораторных условиях гибель гусениц совок, собранных на сое, от болезней составила 16,6%, от энтомофагов – 25,0%. Гусеницы лугового мотылька *Loxostege sticticalis* L. в единичных экземплярах отмечены на сорте сои Приморская 86.

В процессе исследований в посевах сои выявлены доминирующие виды вредителей: листоед соевый полосатый, соевая тля, плодоярка соевая. Листоед соевый полосатый *Paraluperodes suturalis nigrobilineatus* – специализированный вредитель сои. Вредят личинки и жуки. Вредоносность наблюдается от всходов растений до конца вегетации. Основной вред наносят жуки, выгрызают на семядолях с нижней стороны ямки, иногда повреждают молодые стебельки. Повреждения в эту фазу наиболее опасны для растений сои. Затем питаются простыми и тройчатыми листьями, выгрызая небольшие округлые отверстия. Часто жуки уничтожают точку роста, вызывая ненормальное ветвление стеблей. Наиболее серьезные повреждения жуки наносят в засушливую погоду. Личинки обитают в почве, внедряются в клубеньки и питаются их содержимым. Повреждение клубеньков сокращает обогащение почвы азотом, что снижает роль сои как предшественника в севообороте [3, с. 243-244], [4, с. 74-75]. Жуки листоеда в условиях Приморского края из мест зимовки выходят в середине мая, при появлении всходов сои переходят на нее. Откладка яиц начинается в первой декаде июня, отрождение личинок вредителя – во второй декаде июня. Молодые жуки появляются на посевах сои в третьей декаде июля.

В 2017 г. дождливая и прохладная погода сдерживала развитие и распространение листоеда соевого полосатого. Заселение посевов сои жуками в Уссурийском районе составило в фазу всходов от 6 до 11 экз./м<sup>2</sup>, в фазу цветения от 9,2 до 17 экз./м<sup>2</sup>, в фазу созревания от 12 до 18,2 экз./м<sup>2</sup>. По краю максимальная численность жуков отмечена в Октябрьском районе – 30 жук./м<sup>2</sup>, была близка к пороговой (40-50 жук./м<sup>2</sup>) [5, с. 20]. В 2018 г. прохладная и дождливая погода весеннего периода также сдерживала заселение всходов сои листоедом. Перезимовавшие жуки встречались в посевах культуры от выхода второго тройчатого листа до цветения. Переменчивая погода в летний период снижала его активность и вредоносность, численность вредителя была на низком уровне – 5-7 жук./м<sup>2</sup> (см. таблицу 1). Имаго нового поколения в 2018 г. отмечены с 23 июля в фазу цветения. Максимальная численность составила от 7 до 15 жуков/м<sup>2</sup>. В этот период вредитель хозяйственного значения не имел.

Таблица 1 – Численность жуков *Paraluperodes suturalis nigrobilineatus* Motsch. в посевах сои, 2018-2019 гг.

| Сорт          | Средняя численность жуков, экз./м <sup>2</sup> |                              |          |
|---------------|--|------------------------------|----------|
|               | всходы   | первый-второй тройчатый лист | цветение |
| 2018 г.       |  |                              |          |
| Ходсон        | -  | 5                            | 7        |
| Приморская 13 | -  | 5                            | 10       |
| Приморская 69 | -  | 6                            | 10       |
| Приморская 96 | -  | 7                            | 15       |
| 2019 г.       |  |                              |          |
| Приморская 4  | 2,5  | 7,8                          | 15,0     |
| Приморская 96 | 2,4  | 9,0                          | 18,0     |
| Приморская 86 | 3,6  | 9,6                          | 20,0     |
| Сфера         | 2,2  | 8,0                          | 14,0     |
| Муссон        | 2,2  | 7,2                          | 12,0     |

Оптимальные условия для листоеда – засушливая теплая весна. В 2019 г. в мае температура воздуха была выше многолетней на 3,8<sup>0</sup>С, а осадков выпало выше нормы на 26,0 мм, что и оказало влияние на численность вредителя: в фазу всходов в Уссурийском районе (п. Тимирязевский) в посевах сои различных сортов она составила от 2,2 до 3,6 особей/м<sup>2</sup>. Увеличение численности жуков листоеда наблюдали в фазу первого-второго тройчатого листа, этому способствовала жаркая без осадков погода в первой декаде июня, но численность и в этот период была ниже ЭПВ. Молодые жуки появились в конце второй декады июля с численностью 12-20 особей/м<sup>2</sup>, но вредитель, как и в 2018 г., хозяйственного значения не имел.

Соевая тля *Aphis glycinis* Mats. появляется в июне на нижней стороне листьев сои, и с течением времени, расселяется по растению. Сильно поврежденные растения угнетаются и отстают в росте. При массовом заселении растений тлей на ее сладких выделениях развиваются сажистые сапрофитные грибы, которые значительно затрудняют ассимиляцию растений, снижая тем самым их продуктивность. Численность вредителя колеблется по годам. В 2017 г. средняя

численность вредителя составила 32 особи на растение при заселенности 36% растений. В 2018 г. вредоносность тли отмечена в фазу цветения. В двух хозяйствах: КХ Тимчишин А.С. (Уссурийский район) и ООО «Черниговский продукт» (Черниговский район) максимальная численность вредителя составила 10 экз./раст. на сортах Приморская 96 и Приморская 69 при сплошном способе посева. В 2019 г. заселение тлей происходило сразу с появлением всходов. В течение июня-июля численность нарастала за счет интенсивного размножения. На 19 июля численность составила на различных сортах от 59,7 до 171 особи на растение с заселенностью 92-100% растений. Отмечались растения с численностью 350-900 экз./раст. Комплексом афидофагов при соотношении хищник: жертва – 1:16 – 1:74 численность вредителя снизилась в течение 10 дней в 3,4-9,4 раза. В начале августа вредитель был полностью уничтожен (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Численность тли и энтомофагов в посевах сои, 2019 г. (Уссурийский район, п. Тимирязевский)

| Сорт          | 19.07                      |                                     |                           | 30.07                      |                                     |                           |
|---------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|               | Численность тли, экз./раст | Численность энтомофагов, особ./раст | Соотношение хищник жертва | Численность тли, экз./раст | Численность энтомофагов, особ./раст | Соотношение хищник жертва |
| Приморская 4  | 79,5                       | 4,8                                 | 1:16                      | 8,4                        | 2,2                                 | 1:4                       |
| Приморская 96 | 8/111,8                    | 2,7                                 | 111:41                    | 26,2                       | 4,9                                 | 1:5                       |
| Приморская 86 | 59,7                       | 3,2                                 | 1:18                      | 16,0                       | 6,4                                 | 1:3                       |
| Сфера         | 171,0                      | 2,3                                 | 1:74                      | 50,8                       | 2,8                                 | 1:18                      |
| Муссон        | 150,0                      | 3,3                                 | 1:45                      | 23,0                       | 2,8                                 | 1:8                       |

Обследования показали, что наиболее активной группой среди афидофагов в колониях тли на различных сортах сои являлись кокцинеллиды: 89,7-96,4% от всего комплекса энтомофагов (см. таблицу 3). Наиболее массовые виды: *Coccinella septempunctata* L., *Propylaea quatuordecimpunctata* L., *Hippodamia tredecimpunctata* L., *Harmonia axyridis* Pall, из них доминировала семиточечная коровка.

Таблица 3 – Численность афидофагов в колониях тли на посевах сои, 2019 г.

| Сорт          | Численность энтомофагов |      |           |     |           |     |          |
|---------------|-------------------------|------|-----------|-----|-----------|-----|----------|
|               | кокцинеллиды            |      | сирфиды   |     | хризопы   |     | паразиты |
|               | экз./раст.              | %    | экз./раст | %   | экз./раст | %   | %        |
| Приморская 4  | 8,3                     | 93,8 | 0,55      | 6,2 | 0         | 0   | 1,2      |
| Приморская 96 | 8,0                     | 93,4 | 0,10      | 1,2 | 0,46      | 5,4 | 1,4      |
| Приморская 86 | 11,4                    | 89,7 | 0,65      | 5,2 | 0,95      | 7,5 | 6,3      |
| Сфера         | 8,2                     | 96,4 | 0,15      | 1,8 | 0,15      | 1,8 | 1,7      |
| Муссон        | 8,1                     | 95,3 | 0,10      | 1,2 | 0,30      | 3,5 | 1,4      |

В колониях тли встречались личинки и имаго сирфид (Diptera, Syrphidae) и хризоп (Neuroptera, Chrysopidae), но численность их была значительно ниже, не превышала 6,2-7,5% соответственно. Также встречались мумифицированные тли, но роль паразитов в ограничении численности вредителя была низкая: 1,2-6,3%.

Ежегодно зерно повреждает плодоярка соевая *Leguminivora glycinivorella* Mats. (Lepidoptera, Tortricidae) – специализированный вредитель культурной и дикорастущей сои на Дальнем Востоке. В Приморском крае вредитель развивается в одном поколении. Первые бабочки появляются в начале августа. Яйцекладка наблюдается в начале второй декады августа, массовая яйцекладка – в третьей. Отрождение гусениц начинается во второй половине августа, массовое появление – в конце августа – начале сентября.

В 2018 г. соевая плодоярка отмечалась во всех районах обследования (Октябрьский, Уссурийский, Черниговский, Яковлевский, Чугуевский) на общей площади посева 4256,5 га. Погодные условия не повлияли на развитие и распространение вредителя. Численность находилась в пределах среднесезонных наблюдений. Повреждение бобов сои вредителем в хозяйствах Приморского края варьировало от 1,7 до 3,7%. Средняя численность гусениц составила от 0,1 до 0,17 особей/м<sup>2</sup>, средний балл заселения растений гусеницами – 1,0-2,4 балла.

К числу важнейших факторов для сдерживания роста численности вредителя и снижения вредоносности плодоярки соевой следует отнести возделывание устойчивых сортов сои. При оценке сортообразцов сои в Амурской области выделено 6 образцов, устойчивых к повреждению соевой плодояркой: Хэйхэ 14 (Китай), К 9986 Ствиг 1 (Беларусь), К 9984 Ольса (Беларусь), Окухара (Япония), 04-18 (Канада), 01-99 (Канада) [6, с. 85], [7, с. 74].

В 2019 г. проводили оценку 5 сортов сои селекции ФГБНУ «Федеральный научный центр агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки» на поврежденность плодояркой соевой [8, с. 17-20]. Перед уборкой урожая культуры отбирали образцы (4 пробы по 10 растений каждого сорта на расстоянии 10, 20, 30, 40 метров от края поля). Определяли среднее количество бобов на растение, учитывали количество поврежденных и неповрежденных бобов, устанавливали процент поврежденных бобов. Учеты, проведенные перед уборкой культуры, показали, что средняя поврежденность бобов сои гусеницами плодоярки на различных сортах составила от 1,2 до 4,6% (см. таблицу 4). Низкий процент поврежденных бобов сои отмечен на среднеспелых сортах Приморская 96 и Приморская 4 – 1,2 и 1,4% соответственно. На сорте Сфера (среднеспелый) поврежденность бобов была выше по сравнению с другими сортами. По данным Н.С. Анисимова «наибольшая плотность гусениц соевой плодоярки отмечается в полосе 10-20 м от края

поля» [9, с. 9-11]. Наибольшее количество поврежденных бобов у среднепоздних сортов сои Муссон и Приморская 86 мы также отмечали на растениях на расстоянии 10-20 метров от края поля. А у сортов Приморская 4, Приморская 96 и Сфера доля бобов, поврежденных соевой плодожоркой, увеличивалась к центру поля.

Таблица 4 – Поврежденность бобов сои соевой плодожоркой, 2019 г.

| Сорт          | Повреждено бобов, % |           |           |            |           |
|---------------|---------------------|-----------|-----------|------------|-----------|
|               | 10 м                | 20 м      | 30 м      | 40 м       | Среднее   |
| Приморская 4  | 0,5 ± 0,2           | 1,3 ± 0,2 | 1,0 ± 0,1 | 2,7 ± 0,6  | 1,4 ± 0,5 |
| Приморская 96 | 1,0 ± 0,2           | 0,3 ± 0,1 | 0,4 ± 0,1 | 3,0 ± 0,5  | 1,2 ± 0,6 |
| Приморская 86 | 2,2 ± 0,2           | 6,2 ± 0,9 | 2,1 ± 0,6 | 4,2 ± 0,3  | 3,6 ± 0,9 |
| Сфера         | 1,6 ± 0,2           | 1,8 ± 0,5 | 1,8 ± 0,2 | 13,4 ± 3,6 | 4,6 ± 2,8 |
| Муссон        | 4,9 ± 0,5           | 0,7 ± 0,3 | 1,6 ± 0,5 | 1,6 ± 0,7  | 2,2 ± 1,0 |

### Заключение

Таким образом, в результате фитосанитарного мониторинга в посевах сои выявлены доминирующие виды вредителей: *Paraluperodes suturalis nigrobilineatus*, *Aphis glicines*, *Leguminivora glycinivorella*. Погодные условия 2017-2019 гг. сдерживали активность и вредоносность вредителей в посевах сои в Приморском крае, численность была ниже ЭПВ. На динамику численности и распространение вредных насекомых оказывают влияние агроклиматические условия года, агротехнические меры. Нарушение севооборотов, систем обработки почвы при благоприятных погодных условиях могут вызвать увеличение численности и вредоносности как специализированных, так и многоядных вредителей.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы /References

1. Машенко Н.В. Насекомые вредители сои в Приамурье: методические рекомендации / Н.В. Машенко – Новосибирск, 1984. – 136 с.
2. Машенко Н.В. Наиболее распространенные вредители сои в Приамурье и меры борьбы с ними: Методическое пособие / Н.В. Машенко – Благовещенск: Изд-во ПКИ «Зоя», 2012. – 32 с.
3. Ващенко А.П. Соя на Дальнем Востоке / А.П. Ващенко, Н.П. Мудрик, П.П. Фисенко, Л.А. Дега, Н.В. Чайка, Ю.С. Капустин – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 435 с.
4. Дега Л.А. Болезни и вредители сои на Дальнем Востоке / Л.А. Дега – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 98 с.
5. Обзор Фитосанитарного состояния сельскохозяйственных культур в 2017 году и прогноз развития вредных объектов в 2018 году. – Владивосток, 2018. – 75 с.
6. Дубовицкая Л.К. Оценка исходного материала сои на устойчивость к вредным организмам / Л.К. Дубовицкая, Ли Хун Пэн, Ю.В. Положиева // Итоги координации научно-исследовательских работ по сое за 2011-2014 годы: сб. науч. статей. – Благовещенск, 2015. – С. 80-86.
7. Ли Хун Пэн Повреждаемость сортов и сортообразцов сои соевой плодожоркой / Ли Хун Пэн, Л.К. Дубовицкая // Адаптивные технологии в растениеводстве Амурской области – Благовещенск, 2007. – Вып. 3. – С. 72-75.
8. Каталог сортов полевых, кормовых, овощных культур и картофеля селекции ФГБНУ «Приморский НИИСХ», возделываемых в Приморском крае / под ред. Ю.И. Слабко – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 52 с.
9. Анисимов Н.С. Топическое распределение насекомых – вредителей в соевом агроценозе на юге Амурской области // Дальневосточный аграрный вестник. – 2019. – № 3 (51). – С. 5-12.

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

1. Mashchenko N.V. Nasekomye – vrediteli soi v Priamur'e: Metodicheskie ukazaniya [Insect Pest of soya in the Amur Region] / N.V. Mashchenko – Novosibirsk, 1984. – 136 p. [in Russian]
2. Mashchenko N.V. Naibolee rasprostranennyye vrediteli soi v Priamur'e I mery bor'by s nimi: Metodicheskoe posobie [The most common soybean pests in the Amur Region and measures for their control: methodical manual] / N.V. Mashchenko – Blagoveshchensk, Izd-vo PKI «Zeya», 2012. – 32 p. [in Russian]
3. Vashchenko A.P. Soya na Dal'nem Vostoke [Soybean in the Far East] / A.P. Vashchenko, N.V. Mudrik, P.P. Fisenko, L.A. Dega, N.V. Chaika, U.S. Kapustin – Vladivostok: Dalnauka, 2010. – 435 p. [in Russian]
4. Dega L.A. Bolezni i vrediteli soi na Dal'nem Vostoke [Soybean diseases and pests in the Far East] / L.A. Dega – Vladivostok: Dalnauka, 2012. – 98 p. [in Russian]
5. Obzor fitosanitarnogo sostoyaniya sel'skhozaystvennykh kul'tur v 2017 godu I prognoz razvitiya vrednykh obektov v 2018 godu [Overview of the phytosanitary condition of crops in year 2017 and forecast of the spread of harmful objects in year 2018] – Vladivostok, 2018. – 72 p. [in Russian]
6. Dubovickaya L.K. Ocenka iskhodnogo materiala soi na ustojchivost' k vrednym organizmam [Assessment of soybean base material as to resistance to pests] / L.K. Dubovickaya, Li Hun Pen, Yu. V. Polozhieva // Itogi koordinacii nauchno-issledovatel'skikh rabot po soe za 2011-2014 gody: sbornik nauchnykh statej [The results of the coordination of science-research work on soybean for the period of 2011-2014: collection of scientific articles] – Blagoveshchensk, 2015. – PP. 80-86. [in Russian]
7. Li Hun Pen Povrezhdanost' sortov i sortoobrazcov soi soevoy plodozhorkoj [Rate of damage to varieties and specimens of soybean by Soybean moth] / Li Hun Pen, L.K. Dubovickaya // Adaptivnyye tekhnologii v rastenievodstve Amurskoj oblasti [Adaptive technologies in crop production in the Amur region] – Blagoveshchensk, 2007. – Issue 3. – PP. 72-75. [in Russian]
8. Katalog sortov polevykh, kormovykh, ovoshnykh kul'tur i kartofelya selekcii FGБНУ «Primorskij NIISKH», vozdel'yvaemykh v Primorskom krae [Catalog of varieties of field, forage, vegetable crops and potatoes of selection FSBSI "Primorsky Scientific-Research Institute of Agriculture" cultivated in the Primorsky territory] / pod red. Yu.I. Slabko. – Vladivostok: Dalnauka, 2016. – 52 p. [in Russian]
9. Anisimov L.S. Topicheskoe raspredelenie nasekomykh – vreditel'ey v soevom agroecenoze na yuge Amurskoj oblasti [Topical distribution of insect pests in the soybean agroecocenos in the south of the Amur region] / L.S. Anisimov // Far Eastern Agrarian Herald. – 2018. – № 3 (51). – PP. 5-12. [in Russian]