

электронный научно-практический журнал

актуальные вопросы аграрной науки

выпуск №46
март

ISSN: 2411-6483

МОЛОДЁЖНЫЙ 2023



**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Иркутский государственный
аграрный университет имени А.А. Ежевского»**

**Электронный научно-практический журнал
“АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ АГРАРНОЙ НАУКИ”**

Выпуск № 46
март

Молодежный 2023

Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”, 2023, выпуск 46, март.
Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”, 2022, 46th edition, March.

Издается по решению Ученого совета Иркутской государственной сельскохозяйственной академии с ноября 2011 г.

It is edited under the decision of the Scientific Council of the Irkutsk State Academy of Agriculture since November, 2011.

Главный редактор: Я.М. Иваньо – д.т.н.

Зам. главного редактора: М.К. Бураев – д.т.н.

Ответственный секретарь: Б.Ф. Кузнецов – д.т.н.

Члены редакционного совета: С.Н. Шуханов – д.т.н.; В.Н. Хабардин – д.т.н.; Ю.М. Краковский – д.т.н.; В.И. Зоркальцев – д.т.н.; С.Н. Степаненко – д.ф.-м.н. (Одесский государственный экологический университет, г. Одесса, Украина).

Chief editor: Ya.M. Ivanyo – D. Sc. in engineering.

Deputy chief editor: M.K. Buraev – D. Sc. in engineering.

Executive secretary: B.F. Kuznetsov – D. Sc. in engineering.

The members of the editorial board: S.N. Shukhanov – D. Sc. in engineering; V.N. Khabardin – D. Sc. in engineering; Yu.M. Krakovsky – D. Sc. in engineering; V.I. Zorkaltsev – D. Sc. in engineering; S.N. Stepanenko – D. Sc. in physics and mathematics (Odessa State Ecological University, Ukraine).

В журнале опубликуются работы авторов по разным тематикам: проблемам развития агроинженерных систем и технологий, математическим и информационным технологиям решения прикладных задач.

In the journal there are articles on different topics, such as: problems of development of agroengineering systems and technologies, mathematical and information technologies for solving applied problems.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77 – 76761.

The journal is registered by the Federal Agency for Supervision in the sphere of Communications, Information Technologies and Mass Media Communications. Certificate of registration of mass media is El № FS77 – 76761.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования электронной библиотеке LIBRARY.RU.

The journal is included to the Russian Federation index of scientific quoting of electronic library eLIBRARY.RU.

Рукописи, присланные в журнал, не возвращаются. Авторы несут полную ответственность за подбор и изложение фактов, содержащихся в статьях; высказываемые ими взгляды могут не отражать точку зрения редакции. Любые нарушения авторских прав преследуются по закону. Перепечатка материалов журнала допускается только по согласованию с редакцией. Рецензии хранятся в редакции не менее 5 лет в бумажном и электронном вариантах и могут быть предоставлены в Министерство образования и науки РФ по запросу. Manuscripts are not returned to the authors. The authors are fully responsible for the compilation and presentation of information contained in their papers; their views may not reflect the Editorial Board’s point of view. Copyright. All rights protected. No part of the Journal materials can be reprinted without permission from the Editors. Reviews are stored in the office of editorial board at least 5 years in the paper and electronic versions and they can be provided on request to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. In addition, the editorial board provides its opinion on the compliance of the scientific work and the possibility of the publication.

Статьи проверены с использованием Интернет-сервиса “Антиплагиат”

Articles are verified with Internet-service “Anti-plagiary”

СОДЕРЖАНИЕ

Серия МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АГРОИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Бричагина А.А., Степанов Н.В., Пальвинский В.В.</i> Комбинированный агрегат для посева семян рапса.....	6
<i>Наумов И.В., Федоринова Э.С., Якупова М.А., Домарцукский А.А.</i> Экспериментальное исследование показателей качества электрической энергии в лабораторных условиях.....	14
<i>Носенко Л.Ф., Пирог В.П., Кузнецов Б.Ф.</i> Измерение химического потенциала кислорода в сточных водах.....	22
<i>Смышляев А.А.</i> Расчет длины зоны восстановления частицы при ударе о плоский измельчающий элемент.....	28
<i>Шистеев А.В., Бебиков Д.В.</i> Техническое обслуживание и ремонт тракторов Zoomlion RS в условиях Иркутской области.....	35

Серия ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Зоркальцев В.И.</i> Многокритериальные задачи оптимизации и алгоритмы поиска Парето-оптимальных решений.....	45
<i>Иваньо Я.М., Цыренжапова В.В.</i> Трендовые модели в прогнозировании и оценке потерь урожайности сельскохозяйственных культур	53
<i>Репецкий О.В.</i> Применение математического моделирования на основе метода конечных элементов для создания турбомашин повышенного ресурса.....	62

CONTENTS

Series MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AGRO-ENGINEERING SYSTEMS

<i>Brichagina A.A., Stepanov N.V., Palvinsky V.V.</i> Combined unit for sowing rapse seeds.....	6
<i>Naumov I.V., Fedorinova E.S., Yakupova M.A., Domarackii A.A.</i> Experimental study of electric power quality indicators.....	14
<i>Nosenco L.F., Pirog V.P., Kuznetsov B.F.</i> Measuring the chemical potential of oxygen in wastewater.....	22
<i>Smyshlyaev A.A.</i> Calculation of length of particle recovery zone at impact against flat grinding element.....	28
<i>Shisteev A.V., Bebikov D.V.</i> Maintenance and repair of tractors Zoomlion RS in the conditions of the Irkutsk region.....	35

Series INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING, MANAGEMENT, MATHEMATICAL MODELING

<i>Zorkaltsev V.I.</i> Multi-criteria optimization problems and algorithms for searching Pareto-optimal solutions.....	45
<i>Ivanyo Ya.M., Tsyrenzhapova V.V.</i> Trend models in forecasting and evaluation of losses of crop yield.....	53
<i>Repetckii O.V.</i> Application of mathematical modeling based on the finite element method to create of turbomachines of increased resource.....	62

УДК 631.33.022

КОМБИНИРОВАННЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ПОСЕВА СЕМЯН РАПСА

А.А. Бричагина, Н.В. Степанов, В.В. Пальвинский

ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

В статье отмечается, что количество посевных площадей, занятых под возделывание рапса в Иркутской области увеличивается с каждым годом. Рапс в области возделывается с целью получения семян и кормов для сельскохозяйственных животных. Наряду с другими мероприятиями важную роль в технологии возделывания рапса имеет посев, произведенный при строгом соблюдении всех агротехнических требований, основные из которых – соблюдение заданной нормы высева и глубины посева. Обязательным условием с учетом особенностей региона является внесение при посеве семян рапса минеральных удобрений. Наибольшая экономическая эффективность наблюдается при внесении твердых азотных удобрений. В условиях Иркутской области при посеве рапса хорошо зарекомендовала себя сеялка Primera DMC 9000-2C. С целью повышения производительности при посеве рапса нами была предложена конструкция модернизированного комбинированного посевного агрегата, включающего в себя сеялку AMAZONE Primera DMC 9000-2C и бункер с дозатором сеялки APV PS 800. При этом в бункере APV PS 800 размещаются семена рапса, в одном отсеке бункера сеялки Primera DMC 9000-2C находятся сложные минеральные удобрения, в другом – аммиачная селитра. Для проверки работоспособности предложенного посевного агрегата были проведены лабораторные исследования аэродинамических свойств семян рапса и выполнены необходимые технологические расчеты. Использование посевного агрегата AMAZONE Primera DMC 9000-2C с бункером APV PS 800 позволит увеличить производительность при посеве за счет сокращения технологических простоев, требуемых для заправки агрегата минеральными удобрениями.

Ключевые слова: мелкосемянные культуры, рапс, посевной агрегат, пневматическая сеялка, внесение удобрений.

COMBINED UNIT FOR SOWING RAPSE SEEDS

Brichagina A.A., Stepanov N.V., Palvinsky V.V.

FSBEI HE Irkutsk SAU

Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

The article notes that the number of acreage occupied by the cultivation of rapeseed in the Irkutsk region is increasing every year. Rape is cultivated in the region to obtain seeds and feed for farm animals. Along with other measures, sowing performed in strict compliance with all agrotechnical requirements, the main of which is compliance with the specified sowing rate and sowing depth, plays an important role in the technology of rapeseed cultivation. A prerequisite, taking into account the characteristics of the region, is the application of mineral fertilizers when sowing rapeseed seeds. The greatest economic efficiency is observed when applying solid nitrogen fertilizers. In the conditions of the Irkutsk region, when sowing

rapeseed, the Primera DMC 9000-2C seeder has proven itself well. In order to increase productivity when sowing rapeseed, we proposed the design of a modernized combined sowing machine, which includes the AMAZONE Primera DMC 9000-2C seeder and the APV PS 800 seeder hopper with a metering hopper. At the same time, rapeseed seeds are placed in the APV PS 800 hopper seeders Primera DMC 9000-2C are complex mineral fertilizers, in the other - ammonium nitrate. To test the performance of the proposed sowing unit, laboratory studies of the aerodynamic properties of rape seeds were carried out and the necessary technological calculations were made. The use of the AMAZONE Primera DMC 9000-2C seed drill with the APV PS 800 hopper will increase the sowing performance by reducing the technological downtime required for filling the machine with mineral fertilizers.

Keywords: small seed crops, rapeseed, sowing unit, pneumatic seeder, fertilization.

За последние годы в структуре севооборота Иркутской области значительно возросла посевная площадь, занятая под возделывание масличных культур. В 2022 г. по сравнению с 2021 г. площадь увеличена на 53% и составила 87,3 тыс. га. Большую часть площади занимает рапс – 78,7 тыс. га, что больше на 23,4 тыс. га, чем в 2021 году [6].

Наряду с другими мероприятиями, важную роль в технологии возделывания рапса имеет посев семян с одновременным внесением твердых минеральных удобрений, произведенный при строгом соблюдении всех агротехнических требований [10]. Основными из них являются соблюдение заданной нормы высева и глубины посева семян и минеральных удобрений [11]. Данные показатели качества посева в главной степени зависят от применяемых посевных машин [4, 9]. Особенностью при посеве рапса является малая норма высева - 8...12 кг/га при возделывании негибридных сортов, 3...6 кг/га при возделывании гибридов и небольшая глубина заделки семян – 1.5...2,5 см [2, 3, 5].

В условиях Иркутской области при посеве рапса хорошо зарекомендовала себя сеялка Primera DMC 9000-2C. Данная посевная машина позволяет высевать мелкосемянные травы, зерновые, бобовые и масличные культуры с нормой высева от 2 до 400 кг/га на заданную глубину посева (0...5 см) по любому агрофону [1, 7].

С целью повышения производительности при посеве рапса нами была предложена конструкция модернизированного комбинированного посевного агрегата, включающего в себя сеялку AMAZONE Primera DMC 9000-2C и бункер с дозатором сеялки APV PS 800 [8]. При этом в бункере APV PS 800 размещаются семена рапса, в одном отсеке бункера сеялки Primera DMC 9000-2C находятся сложные минеральные удобрения, в другом - аммиачная селитра.

Модернизированный посевной агрегат представлен на рисунке 1.

Семена рапса, поступающие из бункера сеялки APV PS 800 самотеком, двигаются в полость высевающего аппарата, установленного на заданную норму высева. После этого, воздушным потоком, создаваемым вентилятором, транспортируются по воздухопроводам к трубам

распределительных головок сеялки Primera DMC 9000-2С, где смешиваются с гранулами минеральных удобрений [7].



Рисунок 1 – Посевной агрегат AMAZONE Primera DMC 9000-2С с бункером APV PS 800

Для соединения семяпроводов сеялки APV PS 800 с трубой распределительной головки используется патрубок для подачи семян (рис. 2).

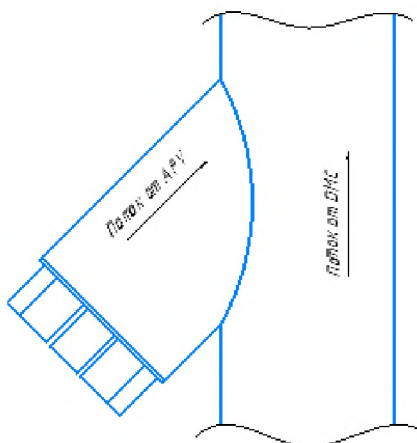


Рисунок 2 – Патрубок для подачи семян

Патрубок для подачи семян состоит из трубы диаметром 126 мм с толщиной стенки 2 мм и патрубка, на торце которого установлена специальная крышка для подсоединения семяпроводов, которые идут от бункера APV PS 800.

Для перемещения семян от сеялки APV PS 800 до трубы

распределительной головки сеялки Primera DMC 9000-2С необходимо использовать семяпроводы длиной 8 м.

Для выполнения технологических расчетов движения зерна в воздушном потоке и проверочных расчетов вентилятора сеялки APV PS 800 возникла необходимость определить критическую скорость витания зерна рапса. Для этой цели были проведены лабораторные исследования. Исследования проводились на лабораторном парусном классификаторе К-293. В результате установлено, что средневзвешенная скорость витания семян рапса сорта составляет 7,5-7,8 м/с.

Полное давление, которое должен развивать вентилятор для пневмотранспортирования материала складывается из статического и динамического давления. Статическое давление необходимо для преодоления сопротивлений по трубе трубопровода (потери на трение, потери в местных сопротивлениях). Динамическое давление необходимо для того, чтобы воздух двигался с заданной скоростью (рис. 3).

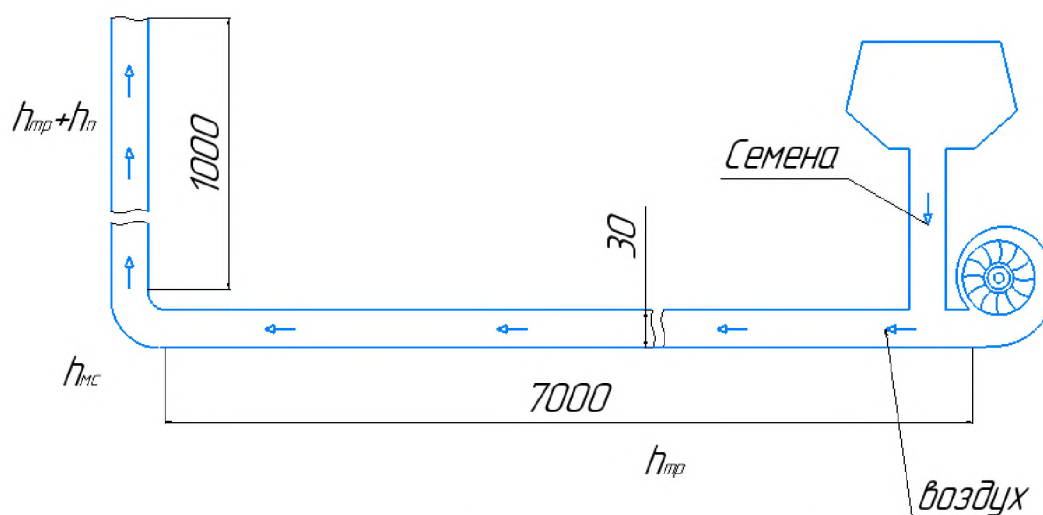


Рисунок 3 – Схема движения потока воздуха и семян по семяпроводу

Потери давления на преодоление трения по длине трубопровода, Па:

$$\Delta p_{тр} = \lambda \frac{lc^2}{2d} \rho, \quad (1)$$

где λ – коэффициент гидравлических сопротивлений трения;

l – длина трубопровода, м;

d – диаметр трубопровода, м;

c – скорость воздушного потока, м/с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Скорость воздушного потока выбираем в 2,2-2,3 раза больше, скорости витания рапса.

$$c = (2,2 - 2,3) \times c_{вит}; \quad (2)$$

$$c = 2,3 \times 7,8 = 18 \text{ м/с};$$

$$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$$

$$d = 0,03 \text{ м};$$

Определим число Рейнольдса для нашего случая

$$\text{Re} = \frac{cd}{\nu}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха (при температуре 20 С равна $15 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$).

Тогда

$$\text{Re} = \frac{18 \times 0,03}{15} = 36000.$$

Так как $10 \frac{d}{\Delta_{\text{эк}}} < \text{Re} < 560 \frac{d}{\Delta_{\text{эк}}}$, то для определения коэффициента гидравлических сопротивлений воспользуемся формулой Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{эк}}}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{эк}}$ – эквивалентная шероховатость стенок трубопровода, м (для данных семяпроводов $\Delta_{\text{эк}} = 3 \times 10^{-5} \text{ м}$). Согласно расчету

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{3 \times 10^{-5}}{0,03} + \frac{68}{36000} \right)^{0,25} = 0,0255,$$

тогда потери давления в семяпроводе составят

$$\Delta p_{mp} = 0,0255 \times \frac{8 \times 18^2}{2 \times 0,03} \times 1,2 = 1322 \text{ Па}.$$

Потери давления на преодоление местных сопротивлений при транспортировании материала Δp_{mc} определяются по формуле:

$$\Delta p_{mc} = \sum \xi \frac{c^2}{2} \rho, \quad (6)$$

где $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местного сопротивления (величина безразмерная);

$$\sum \xi = \xi_{в.с.} + \xi_n + \xi_{кол.} + \xi_{вн.р.}, \quad (7)$$

где $\xi_{в.с.}$ – коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении, равный 0.5;

ξ_n – коэффициент местного сопротивления примыкающего канала, составляющий 1;

$\xi_{кол.}$ – коэффициент местного сопротивления при повороте, равный 0,1;

$\xi_{вн.р.}$ – коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении, соответствующий 1.

Тогда

$$\Delta p_{mc} = (1 + 1 + 0,1 + 1) \times \frac{18^2}{2} \times 1,2 = 1205 \text{ Па}.$$

Потери давления на подъем определяются по формуле:

$$\Delta p_{под} = \rho g \mu H, \quad (8)$$

где H – высота подъема материала, м;

μ – коэффициент смеси принимаем 0,98. В этом случае

$$\Delta p_{под} = 1,2 \times 9,8 \times 0,98 \times 1 = 12 \text{ Па.}$$

Потери давления на разгон частиц

$$\Delta p_{разг} = \frac{4G_c c}{\pi d^2}, \text{ Па,} \quad (9)$$

где G_c – массовый расход транспортируемых частиц, кг/с.

При норме высева 12 кг/га и при максимальной производительности агрегата 13,5 га/ч $G_c c$ составит 0,045 кг/с.

Тогда

$$\Delta p_{разг} = \frac{4 \times 0,045 \times 18}{3,14 \times 0,03^2} = 1147 \text{ Па.}$$

Суммарные потери давления определяются по формуле:

$$\sum \Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{мс} + \Delta p_{под} + \Delta p_{разг}, \quad (10)$$

$$\sum \Delta p = 1322 + 1205 + 12 + 1147 = 3686 \text{ Па.}$$

Для подбора вентилятора необходимо давление потерь увеличить на 10%:

$$\sum \Delta p_{расч} = 3686 \times 1,1 = 4055 \text{ Па.}$$

Расход воздуха, обеспечиваемый вентилятором, находим по выражению:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} c. \quad (11)$$

Тогда

$$Q = \frac{3,14 \times 0,03^2}{4} \times 18 = 5,51 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 19,8 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Определив суммарные потери давления в семяпроводе, и сравнив их, с давлением, которое развивает вентилятор, можно заключить, что система воздушных каналов подачи семян рапса работоспособна, а также имеет запас мощности и производительности для использования данной системы при больших массовых расходах.

При посеве рапса данным комплексом лимитирующим фактором, снижающим производительность, является необходимость частой дозагрузки бункеров с удобрениями. Проведенная модернизация посевного комплекса позволяет существенно повысить производительность агрегата, за счет двукратного сокращения времени загрузки агрегата удобрениями и сокращением времени на сопутствующие операции. Это стало возможным за счет использования бункеров, используемых ранее под семенной материал, для удобрений. Отпала необходимость смешивания азотных и сложных удобрений, так как теперь они загружаются в разные бункера. Поэтому дополнительно нивелирована проблема неравномерного внесения удобрений, возникающая из-за неоднородности получаемой после перемешивания смеси.

Список литературы

1. История успеха сеялки Primera DMC / Хайнц Драйер. – Amazonen-Werke. – 2013. – 131 с.
2. Методические рекомендации по возделыванию рапса ярового в условиях Иркутской области / А.С. Кириленко – Иркутск: Изд-во ИрГСХА. – 2008. – 28 с.
3. Михеев, Д.А. Направления совершенствования посева рапса / Д.А. Михеев, Д.А. Лукьянов // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2021. – № 1(20). – С. 253-258.
4. Обзор совершенствования высеваящих систем посевных машин / А.С. Бардола, М.К. Сердалин, А.Ю. Головин, У.К. Сабиев // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: Матер. V Междунар. научно-практ. конф., Омск, 29 апреля 2021 года. – Омск: Омский ГАУ имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 20-27.
5. Овчинникова, А.И. Применение зернотравяной сеялки для посева рапса / А.И. Овчинникова, А.А. Бричагина // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. – 2018. – № 2-2. – С. 122-124.
6. Посевная завершена в Иркутской области [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ogirk.ru/2022/07/11/posevnaja-zavershena-v-irkutskoj-oblasti/> - 10.03.2023.
7. Руководство по эксплуатации AMAZONE Primera DMC 9000. Сеялка прямого высева / D-49202 Hasbergen-Gaste, 2015. – 156 с.
8. Руководство по эксплуатации PS 800 M1, PS 800 M1 D, HG 450 M1 / ООО “АПВ Рус”, 2018. – 44 с.
9. Свинцова, О.Н. Обзор и анализ сошников сеялок для определенных сельскохозяйственных культур / О.Н. Свинцова, Г.Н. Поляков, С.Н. Шуханов // Проблемы и перспективы устойчивого развития агропромышленного комплекса: Матер. Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти А.А. Ежевского, п. Молодежный, 17-18 ноября 2022 года. – п. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2022. – С. 82-89.
10. Селяков, А.А. Влияние приемов посева на урожайность и биохимический состав маслосемян сортов ярового рапса в Среднем Предуралье / А.А. Селяков, А.С. Богатырева, Э.Д. Акманаев // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 14, № 2(53). – С. 47-51.
11. Усов, В.Ю. Эффективность внесения азотных удобрений в посевах рапса ярового на корм / В.Ю. Усов, М.В. Усова, А.К. Тажибаев // Наука XXI века: опыт прошлого – взгляд в будущее: Матер. II Междунар. научно-практ. конф., Омск, 25 апреля 2016 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; ФГБОУ ВО “Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)”. – Омск: (СибАДИ), 2016. – С. 297-299.

References

1. Hajnc Drajer. Istoriya uspekha seyalki Primera DMC [The success story of the Primera DMC seeder]. Amazonen-Werke, 2013, 131 p.
2. Kirilenko, A.S. Metodicheskie rekomendacii po vzdelyvaniyu rapsa yarovogo v usloviyah Irkutskoj oblasti [Methodological recommendations for the cultivation of spring rapeseed in the conditions of the Irkutsk region]. Irkutsk, 2008, 28 p.
3. Miheev, D.A., Lukianov D.A. Napravleniya sovershenstvovaniya poseva rapsa [Directions of improvement of rapeseed sowing]. Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skohozyajstvennogo naznacheniya. 2021, no. 1(20), pp. 253-258.
4. Bardola, A.S. et al. Obzor sovershenstvovaniya vysevayushchih sistem posevnyh mashin [Review of the improvement of sowing systems of sowing machines]. Omsk, 2021, pp. 20-27.

5. Ovchinnikova, A.I., Brichagina, A.A. Primenenie zernotravyanoj seyalki dlya poseva rapsa [Application of a grain-grass seeder for sowing rapeseed]. Molodaya nauka agrarnogo Dona: tradicii, opyt, innovacii. 2018, no. 2-2, pp. 122-124.

6. Posevnaya zavershena v Irkutskoj oblasti [The sowing campaign has been completed in the Irkutsk region]. <https://www.ogirk.ru/2022/07/11/posevnaja-zavershena-v-irkutskoj-oblasti/> - 10.03.2023.

7. Rukovodstvo po ekspluatacii AMAZONE Primera DMC 9000. Seyalka pryamogo vyseva [AMAZON Primera DMC 9000 User Manual. Direct seeding drill]. 2015, 156 p.

8. Rukovodstvo po ekspluatacii PS 800 M1, PS 800 M1 D, HG 450 M1 [Operating Manual PS 800 M1, PS 800 M1 D, HG 450 M1]. 2018, 44 p.

9. Svincova, O.N. et all. Obzor i analiz soshnikov seyalok dlya opredelennyh sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Overview and analysis of seeder coulters for certain crops]. Molodezhnyj: Irkutskij GAU, 2022, pp. 82-89.

10. Selyakov, A.A. et all. Vliyanie priemov poseva na urozhajnost' i biohimicheskiy sostav maslosemyan sortov yarovogo rapsa v Srednem Predural'e [The influence of sowing techniques on the yield and biochemical composition of oilseeds of spring rapeseed varieties in the Middle Urals]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2019, vol. 14, no. 2(53), pp. 47-51.

11. Usov, V.Yu et all. Effektivnost' vneseniya azotnyh udobrenij v posevah rapsa yarovogo na korm [Efficiency of application of nitrogen fertilizers in spring rapeseed crops for feed]. Omsk: SibADI, 2016, pp. 297-299.

Дата поступления в редакцию 17.03.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторах

Бричагина Анастасия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения АПК инженерного факультета. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская область, Иркутский р-н, пос. Молодежный, тел. 89500624935, e-mail:anabri8t@gmail.com).

Степанов Николай Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, безопасности жизнедеятельности и профессионального обучения инженерного факультета. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская область, Иркутский р-н, пос. Молодежный, тел. 89021710629, e-mail:anabri8t@gmail.com).

Пальвинский Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения АПК инженерного факультета. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская область, Иркутский р-н, пос. Молодежный, тел. 89025449794, e-mail:kvenbox@mail.ru).

Information about authors

Brichagina Anastasia A. – Candidate of Technical Sciences, Ass. Prof. of the Department of Technical Support of the Agroindustrial Complex of the Faculty of Engineering. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk District, Irkutsk Region, Russia, 664038, tel.: 89500624935, e-mail: anabri8t@gmail.com).

Stepanov Nikolai V. – Candidate of Technical Sciences, Ass. Prof. of the Department of Operation of the Machine and Tractor Fleet, Life Safety and Vocational Training of the Faculty of Engineering. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk District, Irkutsk Region, Russia, 664038, tel. 89021710629, e-mail: anabri8t@gmail.com).

Palvinsky Viktor V. – Candidate of Technical Sciences, Ass. Prof. of the Department of Technical Support of the Agroindustrial Complex, Faculty of Engineering. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk District, Irkutsk Region, Russia, 664038, tel. 89025449794, e-mail: kvenbox@mail.ru).

УДК 621.316

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

И.В. Наумов, Э.С. Федоринова, М.А. Якупова, А.А. Домарацкий

ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований несимметричных режимов работы электрических сетей 0,4 кВ на имитационной модели электрической сети, созданной в лабораторных условиях. Измерение и исследование режимов электрических сетей затруднено необходимостью соблюдения техники безопасности и ограничениями на коммутации элементов сети. Затруднения в исследованиях действующих распределительных электрических сетей 0,4 кВ возникают также при изменении мощностей электрических нагрузок, видов нагрузок и протяженности линий электропередачи. Поэтому для изучения свойств электрической сети и измерений параметров их режима работы используется физическое моделирование. Параметры модели масштабированы к параметрам электрической сети. Представлена разработка новой конструкции симметрирующего устройства (СУ), рассчитана и создана его физическая модель. Отличительной особенностью предлагаемой модели СУ является возможность автоматического изменения параметров за счёт саморегулируемой индуктивности при изменяющемся уровне несимметричного (несбалансированного) электропотребления. Целью статьи является обоснование эффективности действия балансирующего эффекта для разработанной модели устройства по минимизации дополнительных потерь электрической энергии и повышения ее качества, обусловленных несбалансированным электропотреблением. С помощью созданной экспериментальной установки удалось протестировать работу разработанной физической модели устройства симметрирования, что позволяет осуществлять минимизацию потерь и повышение качества электрической энергии (КЭЭ). Эффект симметрирования оценивался по изменению коэффициентов несимметрии токов по обратной (K_{i2}) и нулевой (K_{i0}) последовательности, а также коэффициентам несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{u0}) и дополнительных потерь мощности (K_p). По результатам измерений и расчетов были построены временные нагрузочные диаграммы, визуализирующие изменение исследуемых показателей, анализ которых позволил сделать заключение об эффективности применения разработанной модели симметрирующего устройства в распределительных сетях напряжением 0,4кВ.

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент потерь мощности, показатели несимметрии, симметрирующее устройство, дополнительные потери мощности.

EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRIC POWER QUALITY INDICATORS

Naumov I.V., Fedorinova E.S., Yakupova M.A., Domarackii A.A.

FSBEI HE Irkutsk SAU

Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

The results of experimental studies of asymmetric operating modes of 0.4 kV electrical networks on a simulation model of an electrical network created in laboratory conditions are presented. The measurement and study of the modes of electrical networks is hampered by the

need to comply with safety regulations and restrictions on the switching of network elements. Difficulties in the study of existing 0.4 kV distribution electrical networks also arise when the power of electrical loads, types of loads and the length of power lines change. Therefore, to study the properties of the electrical network and measure the parameters of their mode of operation, physical modeling is used. The model parameters are scaled to the electrical network parameters. The development of a new design of a balancing device (BD) is presented, its physical model is calculated and created. A distinctive feature of the proposed BD model is the ability to automatically change parameters due to self-regulating inductance with a changing level of asymmetric (unbalanced) power consumption. The purpose of the article is to substantiate the effectiveness of the balancing effect for the developed model of the device to minimize additional losses of electrical energy and improve its quality, due to unbalanced power consumption. With the help of the created experimental setup, it was possible to test the operation of the developed physical model of the balancing device, which allows minimizing losses and improving the quality of electrical energy (QEE). The balancing effect was estimated by changes in the coefficients of current unbalance in the reverse (K_{i2}) and zero (K_{i0}) sequences, as well as the coefficients of voltage asymmetry in the negative sequence (K_{u0}) and additional power losses (K_p). Based on the results of measurements and calculations, time load diagrams were constructed, visualizing the change in the studied indicators, the analysis of which made it possible to conclude that the developed model of the balancing device was used effectively in distribution networks with a voltage of 0.4 kV.

Keywords: power quality, power loss factor, unbalance indicators, balancing device, additional power losses.

В настоящее время большое внимание уделяется повышению качества электрической энергии, одним из важных показателей которого является несимметрия напряжений и токов.

Обеспечение симметрии напряжений и токов необходимо не только по техническим условиям работы оборудования, но и для обеспечения надежной и экономичной работы всех звеньев системы электроснабжения.

Основной причиной возникновения длительных несимметричных режимов электрических систем является неравномерное распределение потребителей электрической энергии по фазам сети, а также случайный характер их коммутаций. К таким потребителям относятся электротехнологические установки, вследствие несимметричного исполнения и особенностей самого технологического процесса, обуславливают несимметрию режима питающей электрической сети, что отрицательно влияет на работу потребителей и ведет к ухудшению показателей класса энергетической эффективности (КЭЭ).

Подключение таких потребителей к электрической сети вызывает несимметрию токов и напряжений, которая отрицательно сказывается на работе всех звеньев системы электроснабжения, приводит к увеличению потерь и снижению надежности работы электрооборудования.

Проведенные исследования несимметричных режимов работы в действующих электрических сетях напряжением 0,4 кВ, показали, что характер работы этих сетей объективно несимметричен и характеризуется

значительными эмиссионными потоками дополнительных составляющих токов нагрузки [2, 4].

Вследствие этого задачей исследования несбалансированных режимов электрических сетей указанного напряжения является поиск наиболее целесообразных технических решений, направленных на повышение эффективности использования электрической энергии в части снижения дополнительных потерь и повышения КЭЭ.

В литературных источниках [3, 4-7, 10, 11] описываются различные виды СУ, которые позволяют снизить уровень несимметрии в электрических сетях и улучшить качество электрической энергии. Вместе с этим применение описанных средств симметрирования, имеющих сложную систему управления, в значительной степени удорожает конструкцию таких устройств, что приводит к снижению их эксплуатационной надежности. Это связано с тем, что наличие большого количества коммутационных элементов усложняет схему, создаёт дополнительные перенапряжения, снижающие изоляционные свойства электрооборудования в целом и требует повышенного внимания к ее обслуживанию. Кроме того, использование силовой электроники для управления процессом симметрирования, не только требует дополнительных затрат на обслуживание, но также может служить источником дополнительных токовых искажений. Поэтому наибольший эффект может быть получен от тех средств симметрирования, которые изменяют свои параметры автоматически в результате электромагнитных взаимодействий при изменяющемся уровне несимметричного электропотребления.

В качестве такого симметрирующего устройства предлагается СУ, показанное на рисунке 1¹.

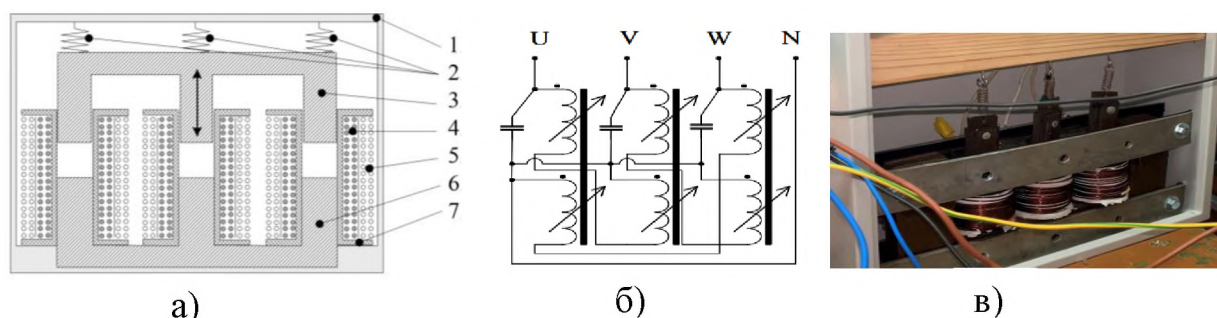


Рисунок 1 – Симметрирующее устройство с саморегулируемой индуктивностью:

а – конструктивное исполнение; б – электрическая; в – общий вид

1 – корпус, 2 – пружины, 3 – подвижный сердечник, 4 – первичная обмотка, 5 – вторичная обмотка,

6 – статический сердечник, 7 – катушка индуктивности.

Установка для имитации симметричных и несимметричных режимов электрической сети 0,4 кВ (рис. 2) создана на кафедре электроснабжения и электротехники Иркутского ГАУ.

¹ Конструкция предлагаемой модели СУ представлена на рассмотрение в Патентное бюро РФ

Участки электрической сети (рис. 2а), имеющие различную длину, образуют ЛЭП с различными параметрами.

Несимметричное электропотребление имитируется лампами накаливания разной мощности с возможностью подключения к различным участкам в фазах сети. Для контроля параметров электрической сети в исследуемых режимах использовались токовые клещи и регистратор напряжения и тока “Парма РК6.05М”.

Главный корпус Иркутского ГАУ получает питание от силового трансформатора ТМГ 630 кВА. В качестве допущения принимаем условие, что система напряжения на шинах низкого напряжения силового трансформатора симметрична. Результаты измерения на вводе 3-фазной системы в лаборатории показали, что фазные напряжение $U_U \approx U_V \approx U_W \approx 220$ В и линейные напряжение $U_{UV} \approx U_{VW} \approx U_{WU} \approx 380$ В.

В начале проведения исследования на экспериментальной установке был создан симметричный режим работы сети, при котором относительные мощности нагрузок в фазах были одинаковые. Далее выполнялась имитация несимметричного режима сети, путем подключения ламп накаливания в каждом узле, начиная с конца линии. В фазе “U” мощность лампы составляла 500 Вт, в фазе “V” - 100 Вт и в фазе “W” - 25 Вт.



а)



б)

Рисунок 2 – Экспериментальная установка для имитации симметричных и несимметричных режимов электрической сети 0,4 кВ:

а – участок электрической сети; б – нагрузка

Оценка эффективности СУ производилась для следующих показателей: K_{i2} и K_{i0} – коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов, представляющие собой отношения соответствующих симметричных составляющих токов к току прямой последовательности; K_{u0} – коэффициент нулевой последовательности напряжения; K_p – коэффициент потерь мощности. Указанные коэффициенты подробно рассмотрены в [2].

При моделировании трехфазного несимметричного электропотребления при отсутствии и включении в сеть предлагаемой модели СУ получены следующие результаты (рис. 3, 4).

Рассмотрим эффект симметрирования на примере изменения коэффициентов K_{i2} , K_{i0} и K_{u0} и коэффициента потерь K_p . Значение коэффициента K_p обусловлено большими значениями K_{i2} и K_{i0} .

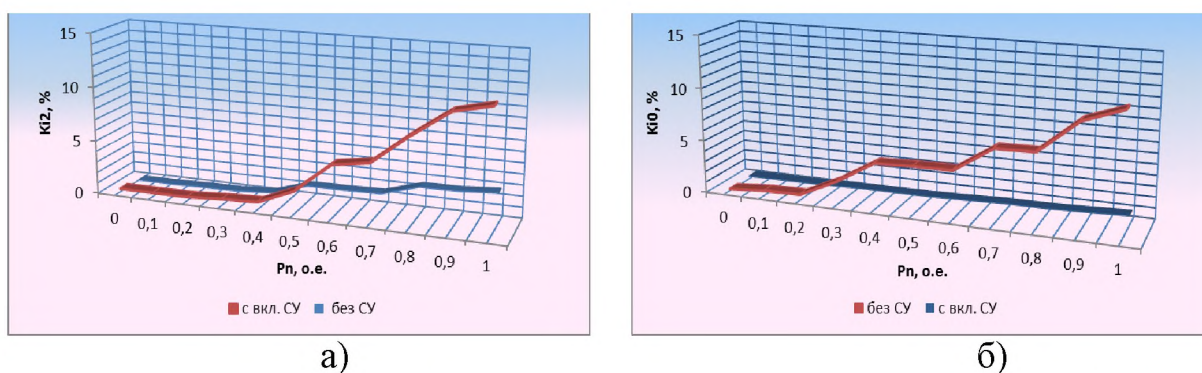


Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов K_{i2} и K_{i0} в моделируемой сети 0,4кВ от мощности трехфазной несимметричной нагрузки

При этом видно, что коэффициент K_{i2} при включении СУ во второй половине увеличения мощности несимметричной нагрузки превышает значение этого показателя без СУ (рис. 3 а). Это обусловлено тем, что параметры СУ отстраиваются от токов нулевой последовательности и предлагаемая модель устройства не симметрирует обратную последовательность токов основной частоты.

Коэффициент K_{i0} (рис. 3 б) при включении СУ значительно (в 8,6 раз) снижается, по сравнению с режимом сети без устройства. В целом коэффициент потерь K_p , обусловленный этими коэффициентами снижается в значительной степени при включении СУ (рис. 4 а). Среднее за период измерения значение этого показателя составляет 2,83. При включении СУ среднее значение K_p составило 1,2, то есть симметрирующий эффект составил 57,6%.

На рисунке 4, б представлены зависимости коэффициента несимметрии напряжения нулевой последовательности K_{u0} от мощности трехфазной несимметричной нагрузки. Анализ графиков показал, что его среднее значение при возрастании несимметричной нагрузки при отсутствии СУ составляет 2,7%, а максимальное значение K_{u0} – 5,66%. При включении СУ среднее значение коэффициента K_{u0} составило 0,8%, то есть произошло уменьшение этого коэффициента почти в 3,5 раза. Как видно, симметрирующий эффект СУ составляет более 70%.

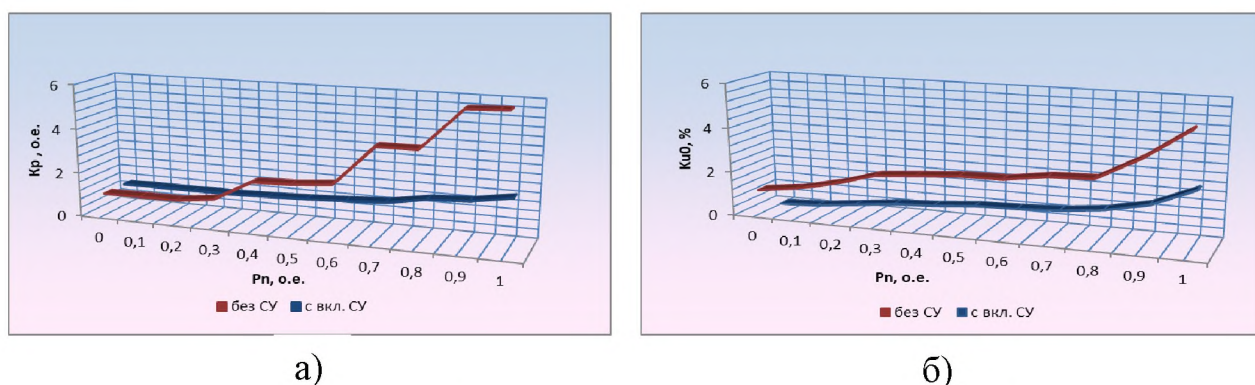


Рисунок 4 – Зависимость коэффициентов K_p и K_{uo} в моделируемой сети 0,4кВ от мощности трехфазной несимметричной нагрузки

Таким образом, созданная физическая модель сети 0,4 кВ позволяет моделировать разноуровневые ситуации несимметричного электропотребления, производить подбор и оценку наиболее целесообразных способов повышения качества по снижению дополнительных потерь электрической энергии.

В результате проведенного экспериментального исследования показателей качества электрической энергии в лабораторных условиях можно сделать вывод об эффективности предлагаемого СУ. Качество электрической энергии по K_{uo} повышается более чем на 70%, а снижение дополнительных потерь мощности, обусловленных несбалансированным электропотреблением, составляет более 50%.

Список литературы

1. Наумов, И.В. Моделирование режимов несимметричного электропотребления в сельских распределительных электрических сетях 0,38 кВ при многоступенчатом отборе мощности / И.В. Наумов, А.А. Багаев // Вестник Алтайского ГАУ. – 2022. – № 6(212). – С. 90-104. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104. – EDN SKBGVV.
2. Наумов, И.В. Исследование качества и дополнительных потерь электрической энергии при несимметричном электропотреблении в действующих сельских распределительных электрических сетях напряжением 0,38 кВ / И.В. Наумов, М.А. Якупова, Э.С. Федорова // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: Матер. междунар. научно-практ. конф. молодых ученых, п. Молодежный, 26-27 марта 2020 года. – п. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2020. – С. 330-337.
3. Наумов, И.В. О цифровом обеспечении расчетов несимметричных режимов в сельских распределительных электрических сетях / И.В. Наумов, А.А. Багаев, С.В. Подъячих, А.Н. Третьяков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 10(216). – С. 72-81. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-216-10-72-81. – EDN XSUTFY.
4. Наумов, И.В. К вопросу о дополнительных потерях электрической энергии в сельских распределительных электрических сетях, напряжением 0,38 кВ / И.В. Наумов, М.А. Якупова, Э.С. Федорова // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: Матер. междунар. научно-практ. конф. молодых ученых, п. Молодежный, 26-27 марта 2020 года. – п. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2020. – С. 322-329.

5. Трансформаторы типа ТМГСУ и ТМГСУ11 со специальным встроенным симметрирующим устройством / МЭТЗ им. В.И. Козлова. – URL: <https://metz.by/library/transformatorytipa-tmgsu-i-tmgsu11-so-specialnym-vstroennym-simmetriruyushhim-ustrojstvom/>.

6. Bao, G. Load transfer device for solving a three-phase unbalance problem under a low-voltage distribution network / G. Bao, S. Ke. – Text: electronic // *Energies*. – 2019. – Vol. 12 (15). – P. 2842. – URL: <https://doi.org/10.3390/en12152842>.

7. Blazic, B. Improved D-STATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages / B. Blazic, I. Papic. – Text : electronic // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2006. – Vol. 21, no. 1. – P. 225-233. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1564204>.

8. Campos, A. Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching functions / A. Campos, G. Joos, P.D. Ziogas, J.F. Lindsay. – Text : electronic // *Power Electronics, IEEE Transactions on*. – 1994. – Vol. 9-3. – P. 269-274. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/311259?reload=true>.

9. Naumov, I.V. Methodological Bases of the Fire Hazard Reduction in Internal and External 0.38 kV Electrical Networks with Unbalancing Power Consumption / I.V. Naumov, S.V. Podyachikh, M.A. Yakupova, E.S. Fedorinova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : II International scientific and practical conference "Ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science"*, Smolensk, Russian Federation, 23-27 января 2022 года. – Smolensk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012145. – DOI 10.1088/1755-1315/1045/1/012145. – EDN NUKSBQ.

10. Naumov, I.V. Asymmetric power consumption in rural electric networks / I.V. Naumov, D.N. Karamov, A.N. Tretyakov [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18-20 ноября 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall*. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 32088. – DOI 10.1088/1755-1315/677/3/032088. – EDN LRJNGD.

11. Pana, A. Experimental Validation of Power Mechanism for Load Balancing Using Variable Susceptances in Three Phase Four Wire Distribution Networks / A. Pana, A. Baloi, F. Molnar-Matei // *EUROCON 2007 – The International Conference on "Computer as a Tool"*. 1567-1572. DOI: 10.1109/EURCON.2007.4400415.

12. Shklyarskiy, Y.E. The compensation criterion of overload neutral wire current in low voltage electrical networks / Y.E. Shklyarskiy, A.Y. Shklyarskiy, A.A. Belitskiy // *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 1012-1015. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910728.

References

1. Naumov, I.V., Bagaev, A.A. Modelirovanie rezhimov nesimmetrichnogo elektropotrebleniya v sel'skih raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah 0,38 KV pri mnogostupenchatom otbore moshchnosti [Modeling of asymmetric power consumption modes in rural distribution electric networks of 0.38 KV with multi-stage power sampling]. *Vestnik Altajskogo GAU*. 2022, no. 6(212), pp. 90-104. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104. – EDN SKBGVV.

2. Naumov, I.V. et all. Issledovanie kachestva i dopolnitel'nyh poter' elektricheskoy energii pri nesimmetrichnom elektropotreblenii v dejstvuyushchih sel'skih raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah napryazheniem 0,38 kV [Investigation of the quality and additional losses of electrical energy with asymmetric power consumption in existing rural distribution electric networks with a voltage of 0.38 kV]. *Molodezhnyj: Irkutskij GAU*, 2020, pp. S. 330-337.

3. Naumov, I.V. et all. O cifrovom obespechenii raschetov nesimmetrichnyh rezhimov v sel'skih raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah [About digital support of calculations of

asymmetric modes in rural distribution electric networks]. Vestnik Altajskogo GAU. 2022, no. № 10(216), pp. 72-81. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-216-10-72-81.

4. Naumov, I.V. et all. К вопросу о дополнительных потерях электрической энергии в сельских распределительных электрических сетях, напряжением 0,38 кВ [On the issue of additional losses of electric energy in rural distribution electric networks with a voltage of 0.38 kV]. Molodezhnyj: Irkutskij GAU, 2020, pp. 322-329.

5. Transformatory типа TMGSU i TMGSU11 со special'nym vstroennym simmetriruyushchim ustrojstvom [Transformers of type TMGSU and TMGSU11 with a special built-in balancing device]. <https://metz.by/library/transformatorytipa-tmgsu-i-tmgsu11-so-specialnym-vstroennym-simmetriruyushhim-ustrojstvom/>.

Дата поступления в редакцию 02.02.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторах

Наумов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н., пос. Молодежный, тел. 8924608990, e-mail: professornaumov@list.ru).

Федоринова Эльвира Сергеевна – ассистент кафедры электроснабжения и электротехники. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н., пос. Молодежный, тел. 89041179752, e-mail: fec89834052365@yandex.ru).

Якупова Марина Андреевна – ассистент кафедры электроснабжения и электротехники. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н., пос. Молодежный, тел. 89086642241, e-mail: yakupovamarina199@yandex.ru).

Домарацкий Андрей Александрович – студент 1 курса з/о направление 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н., пос. Молодежный, тел. 89246057890, e-mail: domar77@ya.ru).

Information about authors

Naumov Igor V. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. 8924608990, e-mail: professornaumov@list.ru).

Fedorinova Elvira S. – Assistant of the Department of Power Supply and Electrical Engineering. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. 89041179752, e-mail: fec89834052365@yandex.ru).

Yakupova Marina A. – Assistant of the Department of Power Supply and Electrical Engineering. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. 89086642241, e-mail: yakupovamarina199@yandex.ru).

Domarackii Andrei A. – Student of 1-st course of direction 13.04.02 Electric power engineering and electrical. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. 89246057890, e-mail: domar77@ya.ru).

УДК 543.422.5

ИЗМЕРЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА КИСЛОРОДА В СТОЧНЫХ ВОДАХ

¹Л.Ф. Носенко, ¹В.П. Пирог, ²Б.Ф. Кузнецов

¹ ООО “Научно-производственное предприятие ОКБА”

г. Ангарск, Иркутская обл. Россия

² ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская обл., Россия

В статье описан анализатор химического потенциала кислорода (ОКХП) на основе твердоэлектrolитного чувствительного элемента. Принцип работы ОПУ поясняется схемой, на которой представлены основные узлы преобразователя. Анализируемая вода из колонки-дозатора равномерно поступает в испаритель, а затем в высокотемпературный реактор, где протекают реакции взаимодействия восстановителей с водяным паром. Состав прореагировавшего образца характеризуется определенным парциальным давлением кислорода, которое будет тем ниже, чем выше содержание восстановителей в анализируемой среде. Поэтому для оценки содержания восстановителей необходимо определить парциальное давление кислорода в прореагировавшей пробе. Для этого используется твердоэлектrolитный чувствительный элемент, обладающий свойством развивать электродвижущую силу, пропорциональную логарифму отношения парциальных давлений кислорода в анализируемой и сравнительной средах. Анализируемая среда омывает внешний электрод чувствительного элемента, а сравнительная среда (атмосферный воздух, парциальное давление кислорода) используется во внутреннем электроде. Чувствительный элемент анализатора выполнен в виде трубки из твердоэлектrolитной керамики состава $0,9\text{ZrO}_2 + 0,1\text{Y}_2\text{O}_3$. Эта керамика обладает проводимостью по ионам кислорода при высоких температурах (выше 600°C). Рабочей частью чувствительного элемента является его дно, на которое методом выжигания с обеих сторон нанесены пористые платиновые электроды. Внешний электрод является рабочим электродом, внутренний электрод является электродом сравнения. Токоподводы от электрода выполнены в виде платиновых проводов. Внутренний электрод омывается конвекцией воздухом, который служит сравнительной средой.

Ключевые слова: химический потенциал кислорода, преобразователь, реактор, твердоэлектrolитный чувствительный элемент.

MEASURING THE CHEMICAL POTENTIAL OF OXYGEN IN WASTEWATER

¹Nosenco L.F., ¹Pirog V.P., ²Kuznetsov B.F.

¹LLC "Scientific and Production Enterprise OKBA"

Angarsk, Irkutsk region, Russia

²FSBEI HE Irkutsk SAU

Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

The article describes an oxygen chemical potential analyzer (OCCP) based on a solid electrolyte sensitive element. The principle of operation of the OPU is illustrated by a diagram that shows the main components of the converter. The analyzed water from the dosing column evenly enters the evaporator, and then into the high-temperature reactor, where the reactions of the interaction of reducing agents with water vapor take place. The composition of the reacted sample is characterized by a certain partial pressure of oxygen, which will be the lower, the

higher the content of reducing agents in the analyzed medium. Therefore, to estimate the content of reducing agents, it is necessary to determine the partial pressure of oxygen in the reacted sample. For this, a solid electrolyte sensitive element is used, which has the property to develop an electromotive force proportional to the logarithm of the ratio of oxygen partial pressures in the analyzed and comparative media. The medium to be analyzed flows around the outer electrode of the sensing element, while the reference medium (atmospheric air, oxygen partial pressure) is used in the inner electrode. The sensitive element of the analyzer is made in the form of a tube made of solid electrolyte ceramics with the composition $0.9\text{ZrO}_2 + 0.1\text{Y}_2\text{O}_3$. This ceramic has oxygen ion conductivity at high temperatures (above 600°C). The working part of the sensitive element is its bottom, on which porous platinum electrodes are deposited on both sides by burning out. The outer electrode is the working electrode, the inner electrode is the reference electrode. Current leads from the electrode are made in the form of platinum wires. The inner electrode is bathed by convection with air, which serves as a reference medium.

Keywords: chemical potential of oxygen, converter, reactor, solid electrolyte sensitive element.

Введение. Химическое потребление кислорода (ХПК) – показатель содержания органических веществ в воде, который характеризует количество кислорода, затраченное на окисление органических соединений в пробе. Количественно ХПК выражается в миллиграммах потреблённого кислорода на один литр воды ($\text{мг O}_2/\text{л}$) и используется для оценки уровня органического загрязнения сточных вод [5].

Показатели ХПК используются:

- для нормативной оценки сточной воды, сбрасываемой в водоёмы [5];
- для настройки технологического процесса очистки сточных вод на очистных сооружениях [3, 7];
- в экологическом мониторинге объектов водоподготовки и водоснабжения [2];
- в научных исследованиях в области гидрохимии [8].

Приборы титраторы получили сейчас большое распространение. Преимущества их очевидны – ограниченное участие человека в процессе измерения, увеличение темпа и объёма работ [4]. В зависимости от физического принципа, положенного в основу работы устройства, титраторы подразделяют на:

- потенциометрические;
- фотометрические;
- кондуктометрические;
- термометрические;
- амперометрические;
- волюметрические;
- кулонометрические.

Самые распространенные на рынке – это анализаторы-потенциометры и фотометры. Принцип работы потенциометра основывается на измерении электрического потенциала. Такая разновидность титраторов оборудована

никелевыми, платиновыми, серебряными или стеклянными индикаторными электродами, с помощью которых осуществляется замер.

В некоторых случаях измерение ХПК потенциометром усложнено реакцией исследуемого вещества. В таких ситуациях рекомендуется использовать устройство другого принципа действия.

Метод фотометрии опирается на методику абсорбционной спектроскопии – области знаний оптической физики. Метод основывается на анализе поглощающих видимый свет растворов и количественном расчете поглощённого ими света. Главное преимущество метода – его можно использовать для анализа любых веществ. Измерение осуществляется с помощью источника монохромного света, прошедшего через раствор и попавшего на фотоэлемент.

Фотометры могут быть индикаторными и безиндикаторными [1]. В первом случае значение имеет цвет раствора – анализируется его смена при воздействии излучения, а во втором случае – плотность раствора.

Приведем твердоэлектродный метод измерения химического потенциала кислорода [6], с помощью которого предложено измерять потенциал кислорода в сточных водах.

Принцип действия анализатора химического потенциала кислорода (ХПК) с твердоэлектродным чувствительным элементом [8] иллюстрируется схемой (рис. 1), на которой представлены основные узлы преобразователя.

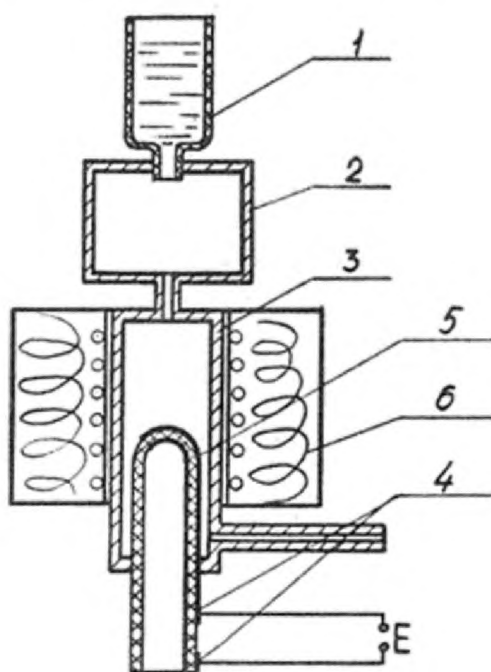


Рисунок 1 - Схема, поясняющая принцип действия анализатора

1 – дозирующая колонна, 2 – испаритель, 3 – реактор, 4 – электроды, 5 – чувствительный элемент, 6 – нагреватель.

Анализируемая вода из дозирующей колонки 1 равномерно поступает в испаритель 2, а затем в высокотемпературный реактор 3, где протекают реакции взаимодействия восстановителей с водяным паром. Состав прореагировавшей пробы характеризуется определённым парциальным давлением кислорода, которое будет тем меньше, чем больше содержание восстановителей в анализируемой среде. Следовательно, для оценки содержания восстановителей необходимо определить парциальное давление кислорода в прореагировавшей пробе. Для этого используется твёрдоэлектролитный чувствительный элемент 5, который обладает свойством развивать ЭДС, пропорциональную логарифму отношения парциальных давлений кислорода анализируемой и сравнительных сред. Анализируемая среда омывает наружный электрод чувствительного элемента, а сравнительная среда (атмосферный воздух, парциальное давление кислорода) за счёт температурной конвекции омывает внутренний электрод.

Таким образом, действие анализатора основано на измерении ЭДС твёрдоэлектролитного чувствительного элемента, которое зависит от содержания восстановителей в анализируемой среде и, соответственно, от ХПК этой среды. Зависимость между ХПК и ЭДС чувствительного элемента выражается соотношением:

$$N = \frac{M_{O_2} \cdot \exp\left(\frac{2F \cdot E}{R \cdot T}\right) \cdot d}{2M_{H_2O} \cdot K_p \cdot C^{1/2} \cdot P^{1/2}}$$

где N – химическое потребление кислорода, мг/л;

$M_{O_2} = 32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ – молярная масса кислорода;

$M_{H_2O} = 18 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ – молярная масса воды;

$F = 9,65 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг} \cdot \text{экв}}$ – число Фарадея;

E – ЭДС чувствительного элемента, В;

$R = 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ – газовая постоянная;

T – температура рабочей зоны чувствительного элемента, К;

$d = 1 \cdot 10^6 \frac{\text{мг}}{\text{л}}$ – плотность воды;

$K_p = \left[\exp\left(\frac{13160}{T} - 5,55\right) \right]$ – константа равновесия реакции образования воды, Па^{-1/2};

C – молярная масса кислорода в окружающем воздухе;

P – атмосферное давление, Па.

Реактор выполнен из жаропрочной стали. Сборочный чертёж реактора с испарителем и штуцерной головкой приведён на рис. 2.

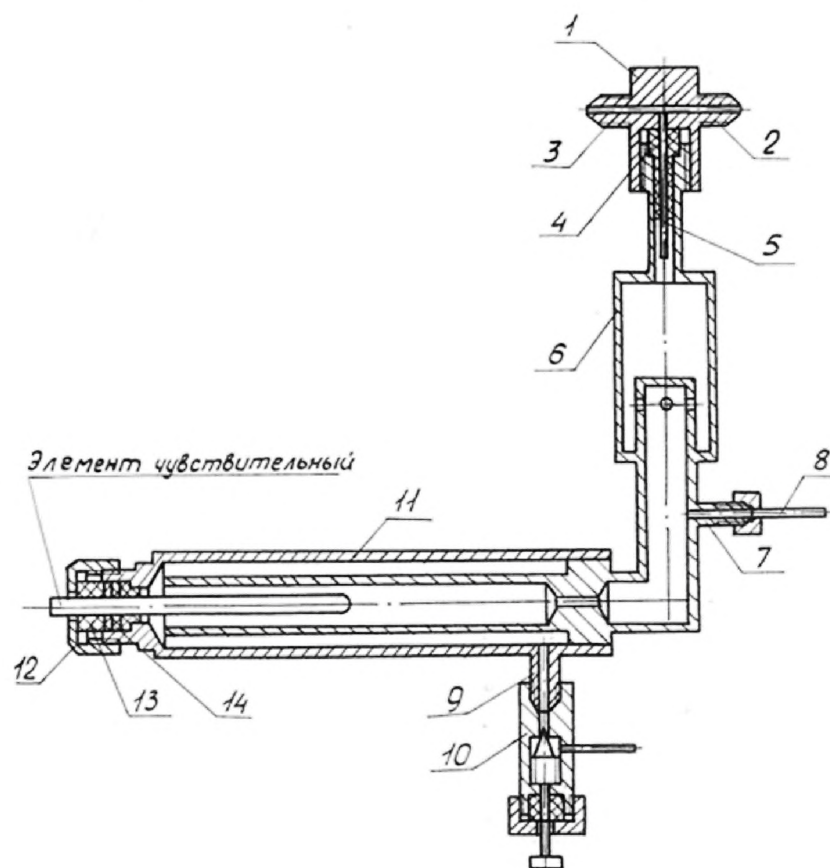


Рисунок 2 – Реактор

1 – головка штуцерная, 2 – штуцер входа пробы, 3 – штуцер выхода пробы, 4 – втулка, 5 – капилляр, 6 – испаритель, 7 – байпасный штуцер, 8 – трубка, 9 – штуцер выхода, 10 – дроссель, 11 – цилиндр, 12 – гайка, 13 – втулка, 14 – прокладка.

Чувствительный элемент (рис. 3) анализатора выполнен в виде пробирки 1 из твёрдоэлектролитной керамики состава $0,9\text{ZrO}_2 + 0,1\text{Y}_2\text{O}_3$. Этой керамике присуща при высоких температурах (выше 600°C) кислородоионная проводимость. Рабочей частью чувствительного элемента служит его доньшко, на которое с обеих сторон нанесены методом вжигания пористые платиновые электроды 3. Рабочим электродом является наружный электрод, электродом сравнения – внутренний. Токоотводы 2 от электрода выполнены в виде платиновых проволочек. Внутренний электрод омывается за счёт конвекции воздухом, который служит сравнительной средой.

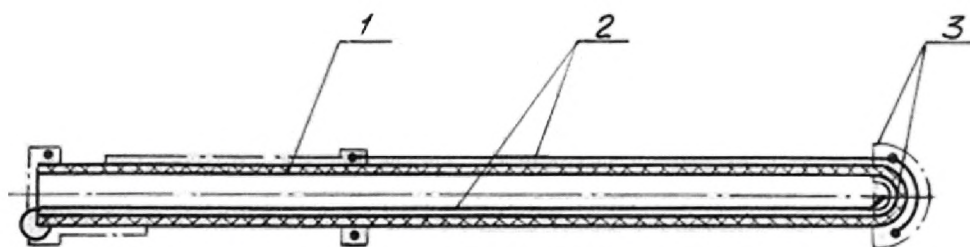


Рисунок 3 – Твёрдоэлектролитный чувствительный элемент

1 – пробирка из твёрдого электролита, 2 – токоотводы, 3 – электроды.

При работе в непрерывном режиме поступающий в прибор из трубопровода поток сточной воды проходит через сетчатый фильтр, где происходит отделение механических примесей, затем к штуцерной головке. Здесь вода разделяется на два потока: байпасный поток отводится через дроссель в дренажную линию, а остальная часть подаётся в испаритель, где вода испаряется при температуре 850...950 °С. Часть пара байпасируется, а другая часть поступает в реактор. При работе в периодическом режиме анализируемая вода из колонки поступает в штуцерную головку, откуда часть пробы идёт в испаритель, а часть через дроссель сбрасывается в дренаж.

В связи с отсутствием потребности в приборах был изготовлен экспериментальный образец, на котором обрабатывалась конструкция и реализован твердоэлектролитный метод измерения ХПК в сточных водах.

Список литературы

1. Балаханов, М.В. Методы измерения концентрации растворённого кислорода в воде / М.В. Балаханов, Е.В. Давыдова, А.А. Стахеев // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2012. – № 9. – С. 16-20.
2. Бондаренко, В.И. Современные концепции экологического нормирования допустимых сбросов веществ в водные объекты / В.И. Бондаренко, Г.А. Самбурский // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 9. – С. 70-80.
3. Кайшев, А.Ш. Оценка безопасности промышленных отходов по показателю “Химическое потребление кислорода” / А.Ш. Кайшев, Н.Ш. Кайшева, Н.А. Туховская // Фармация и фармакология. – 2015. – Т. 3. – № 2 (9). – С. 32-35.
4. Красногорская, Н.Н. и др. Способ определения экологического состояния водоемов / Н.Н. Красногорская и др. – 2013.
5. Куцева, Н.К. Нормативно-методическое обеспечение контроля качества воды / Н.К. Куцева, А.В. Карташова, А.В. Чамаев // Журнал аналитической химии. – 2005. – Т. 60. – № 8. – С. 886-893.
6. Пирог, В.П. Твердые электролиты в приборах аналитического контроля ОКБА / В.П. Пирог, Б.Ф. Кузнецов, Л.Ф. Носенко // Приборы. – 2022, №5. С 28-32.
7. Потапкин, А.Ю. Модернизация системы управления процессом очистки сточных вод / А.Ю. Потапкин, А.В. Савчиц // Наукосфера. – 2020. – № 5. – С. 123-129.
8. Орлицкая, А.О. и др. Применение автоматического весового титратора "Титриона" для анализа водопроводной воды / А.О. Орлицкая и др. // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2013. – № 5. – С. 16-20.

References

1. Balakhanov, M.V. et all. Metody izmereniya kontsentratsii rastvorennogo kislороda v vode [Methods for measuring the concentration of dissolved oxygen in water]. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie, 2012, no. 9, pp. 16-20.
2. Bondarenko, V.I., Samburskii, G.A. Sovremennye kontseptsii ekologicheskogo normirovaniya dopustimyykh sbrosov veshchestv v vodnye obekty [Modern concepts of environmental regulation of permissible discharges of substances into water bodies]. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie, 2008, no. 9, pp. 70-80.
3. Kaishev, A.Sh. et all. Otsenka bezopasnosti promyshlennykh otkhodov po pokazatelyu “Khimicheskoe potreblenie kislороda” [Assessment of industrial waste safety according to the indicator “Chemical oxygen consumption”]. Farmatsiya i farmakologiya, 2015, vol. 3, no. 2 (9), pp. 32-35.

4. Krasnogorskaya, N.N. et all. Sposob opredeleniya ekologicheskogo sostoyaniya vodoemov [Method for determining the ecological state of reservoirs]. 2013.

5. Kutseva, N.K. et all. Normativno-metodicheskoe obespechenie kontrolya kachestva vody [Regulatory and methodological support of water quality control]. Zhurnal analiticheskoi khimii, 2005, vol. 60, no. 8, pp. 886-893.

6. Pirog, V.P. et all. Tverdye elektrolity v priborakh analiticheskogo kontrolya OKBA [Solid electrolytes in OKBA analytical control devices]. Pribory, 2022, no. 5, pp. 28-32.

7. Potapkin, A.Yu., Savchits, A.V. Modernizatsiya sistemy upravleniya protsessom oчитki stochnykh vod [Modernization of the wastewater treatment process management system]. Naukosfera, 2020, no. 5, pp. 123-129.

8. Orlitskaya, A.O. et all. Primenenie avtomaticheskogovesovogo titratora "Titrona" dlya analiza vodoprovodnoi vody [Application of the automatic weight titrator "Titron" for the analysis of tap water]. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie, 2013, no. 5, pp. 16-20.

Дата поступления в редакцию 13.03.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторах

Носенко Леонид Федосеевич – заведующий сектором научно-исследовательского центра приборостроения ООО “Научно-производственное предприятие ОКБА” (ООО “НПП ОКБА”) (665821, Россия, Иркутская область, г. Ангарск, ул. 2-я Московская, стр. 33а, тел. +7 (3955)507-845).

Пирог Виктор Павлович – советник ООО “НПП ОКБА” (665821, Россия, Иркутская область, г. Ангарск, ул. 2-я Московская, стр. 33а, тел. +79500669893).

Кузнецов Борис Федорович - доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования и физики. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н., пос. Молодежный, тел. +7(902)172-33-31 e-mail: kuznetsovbfb@gmail.com).

Information about authors

Nosenko Leonid F. - Head of the Sector of the Research Center for Instrumentation of “Scientific and Production Enterprise OKBA” LLC (“NPP OKBA” LLC) (33a, 2nd Moskovskaya St., Angarsk, Irkutsk Region, Russia, 665821, tel. +7 (3955)507-845).

Pirog Victor P. – Counselor of “NPP OKBA” LLC (33a, 2nd Moskovskaya St., Angarsk, Irkutsk Region, Russia, 665821, tel. +79500669893).

Kuznetsov Boris F. - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Equipment and Physics. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. +7(902)172-33-31 e-mail: kuznetsovbfb@gmail.com).

УДК 631.363.21

РАСЧЕТ ДЛИНЫ ЗОНЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ПРИ УДАРЕ О ПЛОСКИЙ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

А.А. Смышляев

ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ
г. Барнаул, Россия

В настоящее время основным оборудованием для измельчения сыпучих материалов в комбикормовой промышленности являются молотковые дробилки, имеющие свои преимущества и недостатки. Альтернативой им выступают измельчители

центробежно-ударного принципа действия, рабочий процесс которых построен на использовании центробежного силового поля. По сравнению с молотковыми дробилками они отличаются меньшими энергозатратами и металлоемкостью, а также имеют более высокий ресурс рабочих органов. Однако неравномерность гранулометрического состава готового продукта сводит на нет все их достоинства в области измельчения зерна. В то же время в строительной, химической, керамической и других отраслях промышленности они нашли широкое применение

Поэтому актуальность приобретает разработка теоретических основ проектирования измельчителей зерна данного типа. На сегодняшний день достаточно хорошо изучен характер движения материала по разгонному диску с плоскими рабочими органами. Однако остается открытым вопрос о разработке модели для расчёта длины зоны восстановления частиц при ударе о плоский измельчающий элемент.

Для определения параметров зоны восстановления частицы рассмотрено движение зерна после первого ударного нагружения до последующей его встречи с измельчающим элементом плоской формы. Определены основные математические зависимости, описывающие траектории движения, как целых, так и разрушившихся при ударе частиц зерна. В результате расчетов, произведенных численными методами, было установлено, что для зерен, не разрушившихся в результате удара, зона восстановления варьируется в пределах 0,06...0,15 м., для вновь образовавшихся при ударе частиц – 0,015...0,03 м.

Ключевые слова: измельчение зерна, удар, ударно-центробежный измельчитель, скорость, угол, зона восстановления частицы при ударе.

CALCULATION OF LENGTH OF PARTICLE RECOVERY ZONE AT IMPACT AGAINST FLAT GRINDING ELEMENT

Smyshlyaev A.A.

FSBEI HE Altai SAU
Barnaul, Russia

Currently, the main equipment for grinding bulk materials in the feed industry are hammer mills, which have their own advantages and disadvantages. An alternative to them are grinders of the centrifugal-impact principle of operation, the working process of which is based on the use of a centrifugal force field. Compared to hammer crushers, they are characterized by lower energy consumption and metal consumption, and also have a longer service life of working bodies. However, the uneven granulometric composition of the finished product negates all their advantages in the field of grain grinding. At the same time, they are widely used in the construction, chemical, ceramic and other industries.

Therefore, the development of theoretical foundations for the design of grain grinders of this type is becoming relevant. To date, the nature of the movement of material on an accelerating disk with flat working bodies has been studied quite well. However, the issue of developing a model for calculating the length of the particle recovery zone upon impact with a flat grinding element remains open.

To determine the parameters of the particle recovery zone, the movement of the grain after the first shock loading until its subsequent encounter with a flat-shaped grinding element is considered. The main mathematical dependences describing the trajectories of movement, both whole and destroyed upon impact of grain particles, are determined. As a result of calculations made by numerical methods, it was found that for grains that did not collapse as a result of the impact, the recovery zone varies within 0.06 ... 0.15 m, for particles newly formed during the impact - 0.015 ... 0.03 m.

Keywords: grain grinding, impact, impact-centrifugal grinder, speed, angle, particle recovery zone upon impact.

Введение. На сегодняшний день основным технологическим оборудованием для измельчения сыпучих материалов, как на предприятиях комбикормовой промышленности, так и непосредственно в хозяйствах являются молотковые дробилки, имеющие свои “сильные” и “слабые” стороны. В качестве альтернативы дробилкам данной конструкции, многие исследователи предлагают измельчители ударно-центробежного принципа действия [1, 2, 6, 7, 8].

В измельчителях данного типа частицы разгоняются в центробежном силовом поле с последующим ударом о подвижные или неподвижные рабочие органы. По сравнению с молотковыми дробилками они отличаются меньшими энергозатратами и металлоемкостью, а также имеют более высокий ресурс рабочих органов [2, 7, 8].

Однако их основной недостаток – неравномерность гранулометрического состава готового продукта сводит на нет все их достоинства в области измельчения зерна. Вместе с тем в строительной, химической, керамической и других отраслях они нашли широкое применение.

Процесс измельчения зерна в них изучен недостаточно, отсутствуют методики расчета конструктивно-технологических параметров и режимов. В связи этим большую актуальность приобретает разработка теоретических основ проектирования ударно-центробежных измельчителей фуражного зерна [4, 7].

Для выполнения условий предлагаемого способа организации процесса измельчения, необходимо знать характер движения материала в рабочей камере, который определяется такими параметрами, как скорость прямого удара, абсолютная скорость вылета зерна с разгонного (первого) ротора и т.д.

На основании теоретических исследований ряда авторов [3, 5] были получены зависимости, позволяющие определять следующие параметры рабочего процесса ударно-центробежных измельчителей:

– абсолютную скорость (v_{ex} , м/с) и угол вылета (α , град.) зерна с разгонного диска:

$$v_{ex} = \sqrt{v_r^2 + v_{окр}^2 + 2v_r v_{окр} \sin \psi}; \quad (1)$$

$$\alpha = \arctg \frac{v_r \cdot \cos \psi}{v_{окр} + v_r \cdot \sin \psi}, \quad (2)$$

где v_r – относительная скорость частицы, м/с;

$v_{окр}$ – окружная скорость разгонного элемента, м/с;

ψ – угол установки разгонного элемента к радиусу ротора, град.;

– абсолютную скорость (v_{abc} , м/с) и направление отлета зерна (φ_{abc} , град.) при его соударении с измельчающим элементом отбойного ротора:

$$v_{abc} = \sqrt{[v_n(1+R)\cos \psi + Rv_{ex} \sin \varepsilon_1]^2 + (v_{ex} \cos \varepsilon_1)^2}; \quad (3)$$

$$\varphi_{abc} = \operatorname{arctg} \frac{v_{ox} \cos \varepsilon_1}{(1+R)v_n \cos \psi + R v_{ox} \sin \varepsilon_1}, \quad (4)$$

где v_n – окружная скорость измельчающего элемента, м/с;

ε_1 – угол между плоскостью лопатки и направлением скорости вылета с разгонного (предыдущего) ротора, град.:

$$\varepsilon_1 = \arcsin \left(\frac{r_1}{r_1 + \delta_1} \cdot \cos \alpha \right) - \psi, \quad (5)$$

где r_1 – радиус разгонного ротора, м;

δ_1 – радиальный зазор между разгонным и отбойным ротором, м;

Однако вопросы по определению длины зоны восстановления частицы после удара остались не раскрытыми. Исходя из этого целью исследования является разработка математической модели для расчёта длины зоны восстановления частиц при ударе о плоский измельчающий элемент в ударно-центробежных измельчителях.

Материалы и методы. Для определения величины зоны восстановления рассмотрим движение зерна после первого ударного нагружения до последующей встречи его с лопаткой. На рисунке 1 представлена схема, из которой следует, что зерно после первичного соударения с лопаткой в точке А движется в направлении и со скоростью согласно формулам (1) и (2).

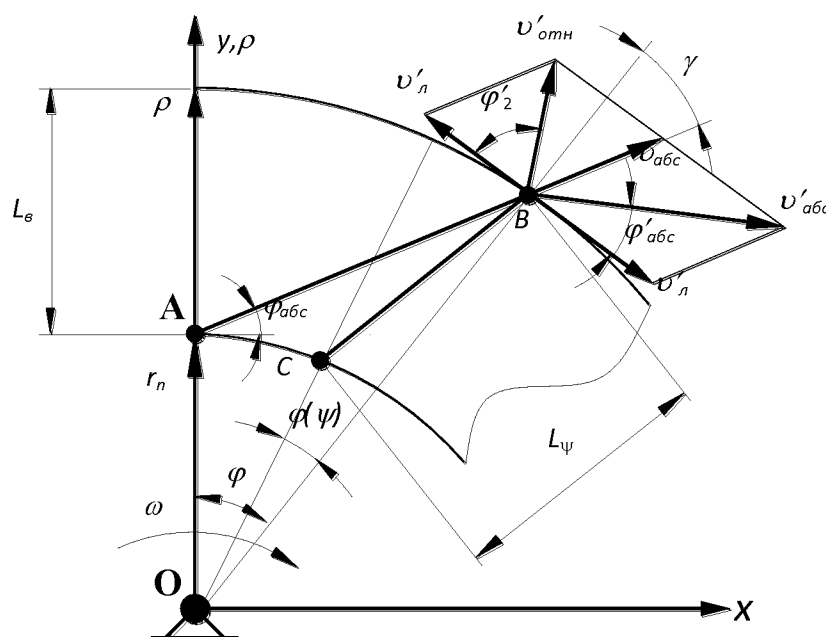


Рисунок 1 – Расчетная схема определения величины и направления скорости движения зерна после вторичного удара об измельчающий элемент встречно-вращающегося ротора ($\varphi_2 > \rho_{mp}$)

Вторичное соударение произойдет в момент, когда лопатка «догонит» отраженной зерно в какой-то точке B . Величина $L_в$ является длиной зоны восстановления.

Запишем координаты вектора скорости $v_{a\bar{b}c}$ в декартовых координатах (за начало отсчета принят центр вращения ротор O):

$$\begin{cases} x = v_{a\bar{b}c} \cdot \cos \varphi_{a\bar{b}c} \\ y = v_{a\bar{b}c} \cdot \sin \varphi_{a\bar{b}c} + r_n \end{cases} \quad (6)$$

Исходя из выражения (6) уравнение вектора скорости $v_{a\bar{b}c}$ в декартовых координатах запишется следующим образом:

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi_{a\bar{b}c} + r_n \quad (7)$$

Заменим текущую координату x и перейдем к полярным координатам:

$$\rho = \frac{AB \cdot \sin \varphi_{a\bar{b}c} + r_n}{\cos \varphi} \quad (8)$$

где ρ – полярный радиус, $\rho = y/\cos \varphi$, м;

φ – полярный угол, рад.

Выразим AB через известные элементы треугольника OAB (рис. 1):

$$AB = \frac{r_n \cdot \sin \varphi}{\cos(\varphi + \varphi_{a\bar{b}c})} \quad (9)$$

Используя тригонометрические теоремы, подставим выражение (9) в (8) и проведем соответствующие преобразования:

$$\rho = \frac{r_n \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \varphi_{a\bar{b}c} + r_n}{\cos(\varphi + \varphi_{a\bar{b}c})} \quad (10)$$

Искомая величина $L_в$ определится через полярный радиус ρ :

$$L_в = \frac{r_n \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \varphi_{a\bar{b}c} + r_n}{\cos(\varphi + \varphi_{a\bar{b}c})} - r_n \quad (11)$$

Полярный угол φ , при котором произойдет столкновение зерна с лопаткой вторично, можно определить, решив систему уравнений (12):

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \varphi = \frac{AB \cdot \cos \varphi_{a\bar{b}c}}{r_n + AB \cdot \sin \varphi_{a\bar{b}c}} = \frac{v_{a\bar{b}c} \cdot t \cdot \cos \varphi_{a\bar{b}c}}{r_n + v_{a\bar{b}c} \cdot t \cdot \sin \varphi_{a\bar{b}c}} \\ \varphi = \omega_n \cdot t \end{cases} \quad (12)$$

Тогда для момента соударения в точке B справедливо равенство:

$$\omega_n t = \operatorname{arctg} \frac{v_{a\bar{b}c} \cdot t \cdot \cos \varphi_{a\bar{b}c}}{r_n + v_{a\bar{b}c} \cdot t \cdot \sin \varphi_{a\bar{b}c}} \quad (13)$$

Определив время движения лопатки и зерна с момента отражения в точке A , можно найти φ и затем по формуле (11) выразить $L_в$. Поскольку аналитически трансцендентное уравнение (13) относительно параметра t не

имеет решения, то оно быть решено численными методами с помощью математического пакета Mathcad.

При расчетах длины зоны восстановления для лопаток, установленных под углом ψ к радиусу, можно использовать формулу (11). Однако столкновение с лопаткой произойдет раньше, чем при угле φ , определенном по формуле (12). Поэтому значение L_ψ получено, с учетом опережения соударения на угол $\varphi(\psi)$:

$$L_\psi = \frac{(r_n + L_e) \cdot \sin\left(\psi - \arcsin \frac{r_n \cdot \sin \psi}{r_n + L_e}\right)}{\sin \psi}. \quad (14)$$

Результаты исследования, их обсуждение. В результате расчетов, произведенных с помощью математического пакета MathCAD было установлено, что для зерен, не разрушившихся в результате удара, зона восстановления варьирует в пределах $L_{e*} = 0,06 \dots 0,15$ м, в зависимости от значений частот вращения роторов ω_1 и ω_2 . Величина зоны восстановления вновь образовавшихся при ударе частиц равна $L_{e**} = 0,015 \dots 0,03$ м. Изменение данного параметра происходит только в случае, когда $\omega_1 \neq \omega_2$, причем возрастание разности $(\omega_1 - \omega_2)$ соответствует увеличению зоны восстановления L_e , а убывание, наоборот – ее уменьшению.

В ходе исследования ударно-центробежного измельчителя, состоящего из трех рядов измельчающих элементов было установлено, что не разрушившиеся при первом ударе зерна отражаются сразу на третий ряд измельчающих элементов и рабочие элементы второго ряда не успевают их догнать. Частицы зерна, которые разрушились при ударе “догоняются” измельчающим элементом, разгоняются и выбрасываются на третий ряд. Об этом факте свидетельствует снимок измельчающего элемента (рис. 2), на котором отчетливо выделяются три зоны: зона первого (основного) удара А, зона повторного (догоняющего) удара Б и зона восстановления В. Особенно ярко данный факт проявляется в опытах с ячменем и горохом.

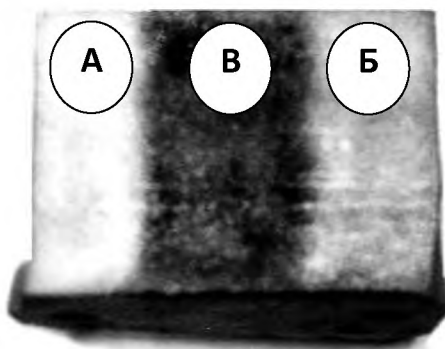


Рисунок 2 – Измельчающий элемент второго ряда:

- А – зона первичного (основного) удара;
- Б – зона повторного (догоняющего) удара;
- В – зона восстановления скорости частиц.

Выводы

1. На основании теоретических исследований движения зерна после ударного нагружения была получена зависимость для определения длины зоны восстановления частицы после ударного нагружения.

2. Теоретически рассчитаны величины зон восстановления частиц разрушившихся и не разрушившихся при ударе зерен. На основании данных значений определена оптимальная величина рабочей зоны измельчающих элементов, которая составила значение $0,02 \dots 0,025$ м.

Список литературы

1. Абросимов, А.В. Гранулометрический состав зерновой дерти, полученной после измельчения на дробилке ИЗ-0,5М / А.В. Абросимов, В.В. Пальвинский // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: Матер. Всерос. научно-практ. конф., Иркутск, 14-15 марта 2019 года. Том II. – Иркутск: Иркутский ГАУ, 2019. – С. 220-230.

2. Воронин, В.В. Пути развития ударно-центробежных измельчителей зерна / В.В. Воронин, В.И. Оробинский, А.В. Ворохобин // Прикладные вопросы физики (к 120-летию со дня рождения академиков И.В. Курчатова и А.П. Александрова): Матер. нац. научно-практ. конф., Воронеж, 20 октября 2022 года. – Воронеж: Воронежский ГАУ им. Петра I, 2022. – С. 26-32.

3. Зегжда, С.А. Теоретическая механика: учебник для бакалавров. / С.А. Зегжда, Н.Н. Поляхов, М.П. Юшко. – Москва: Изд-во "Юрайт", 2012. – 591 с.

4. Курманов, А.К. Математическая модель процесса дробления зерна в измельчителе ударно-центробежного типа / А.К. Курманов, Н.А. Камышева // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2020. – № 4. – С. 131-135.

5. Садов, В.В. Исследование траектории движения зернового материала при сходе с лопаток различной кривизны / В.В. Садов, С.А. Сорокин // Вестник Алтайского ГАУ. – 2019. – № 7(177). – С. 152-158.

6. Сабиев, У.К. Универсальный измельчитель для сельскохозяйственного производства / У.К. Сабиев, Н.С. Сергеев // Вестник Омского ГАУ. – 2019. – № 4(36). – С. 168-175.

7. Теоретическая модель процесса реализации энергетических затрат при ударном измельчении зернового сырья / Е.М. Асманкин, Ю.А. Ушаков, В.А. Шахов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2022. – Т. 36. – № 11. – С. 80-85. – DOI 10.53859/02352451_2022_36_11_80.

8. Федоренко, И.Я. Особенности механического удара в измельчителях фуражного зерна / И.Я. Федоренко, С.В. Золотарев, А.А. Смышляев // Вестник Алтайской науки (Проблемы агропромышленного комплекса). – 2001. – Т. 2. – № 1. – С. 126-128.

References

1. Abrosimov, A.V., Palvinskiy, V.V. Granulometricheskij sostav zernovoy derti, poluchennoy posle izmelcheniya na drobilke IZ-0,5M [Grain size distribution of grain sludge obtained after grinding on a crusher IZ-0,5M]. Irkutsk: Irkutsk GAU, 2019, pp. 220-230.

2. Voronin, V.V. et. all. Puti razvitiya udarno-tsentrobeznykh izmelchiteley zerna [Ways of development of shock-centrifugal grain grinders]. Voronezh: Voronezh GAU, 2022, pp. 26-32.

3. Zegzhda, S.A. et. all. Teoreticheskaya mekhanika: uchebnik dlya bakalavrov [Theoretical mechanics: a textbook for bachelors]. Moscow: Publishing House "Jurite", 2012, 591 p.

4. Kurmanov, A.K., Kamysheva, N.A. Matematicheskaya model protsessa drobleniya

zerna v izmelchitele udarno-tsentrobezhnogo tipa [Mathematical model of grain crushing process in impact-centrifugal type grinder]. Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva, 2020, no. 4, pp. 131-135.

5. Sadov, V.V., Sorokin, S.A. Issledovaniye trayektorii dvizheniya zernovogo materiala pri skhode s lopatok razlichnoy krivizny [Study of the trajectory of grain material when descending from blades of various curvatures]. Vestnik Altajskogo GAU, 2019, no. 7(177), pp. 152-158.

6. Sabiyev, U.K., Sergeev, N.S. Universalny izmelchitel dlya selskokhozyaystvennogo proizvodstva [Universal grinder for agricultural production]. Vestnik Omskogo GAU, 2019, no. 4(36), pp. 168-175.

7. Asmankin, E.M. et. all. Teoreticheskaya model protsessa realizatsii energeticheskikh zatrat pri udarnom izmelchenii zernovogo syria [Theoretical model of the process of implementation of energy costs during impact grinding of grain raw materials]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK, 2022, vol. 36, no. 11, pp. 80-85. DOI 10.53859/02352451_2022_36_11_80

8. Fedorenko, I.Ya. et. all. Osobennosti mekhanicheskogo udara v izmelchitelyakh furazhnogo zerna [Features of mechanical impact in feed grain grinders]. Vestnik Altajskoj nauki (Problemy agropromyshlennogo kompleksa), 2001, vol. 2, no. 1, pp. 126-128.

Дата поступления в редакцию 23.01.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторе

Смышляев Андрей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой математики, механики и инженерной графики инженерного факультета. ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ (656049, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98, тел. 89619964451, e-mail: an_smish_asau@mail.ru).

Information about author

Smyshlyaev Andrey A. – Candidate of Technical Sciences, Ass. Prof., Head. Department of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics of the Faculty of Engineering. FSBEI HE Altai SAU (98, Krasnoarmeisky Ave., Barnaul, Altai Region, Russia, 656049, tel. 89619964451, e-mail: an_smish_asau@mail.ru).

УДК 631.173(571.53)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ ТРАКТОРОВ ZOOMLION RS В УСЛОВИЯХ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

¹ А.В. Шистеев, ² Д.В. Бебиков

¹ ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

п. Молодежный, Иркутский р-он, Иркутская обл., Россия

² ООО “АМК”,

г. Красноярск, Красноярский край, Россия

Zoomlion heavy industry science and technology company является одним из крупнейших китайских машиностроительных заводов-изготовителей, в том числе крупным производителем строительных машин и кранов, многотоннажных грузовых машин, транспортно-технологических машин, а также сельскохозяйственных тракторов разной мощности и ценовой категории [10].

Сельскохозяйственные тракторы Zoomlion, а именно модели RS1304 и RS1604,

которые получили наибольшую популярность в Иркутской области – начали осваивать российский рынок совсем недавно. При этом современный дизайн и эргономика, управляемость и многофункциональность этих машин уже успели завоевать доверие среди пользователей, которые отмечают высокий уровень эксплуатационных качеств – оптимальная для работы в регионе мощность двигателя (тракторы серии RS оснащаются 6-ти цилиндровыми силовыми установками мощностью 130 и 160 л.с.), вместительность топливного бака (220 л, с возможностью установки увеличенного бака объемом 300 л) и универсальность в применении. Машины данной серии могут агрегатироваться с различным навесным, полунавесным и прицепным оборудованием, а также хорошо справляются с выполнением всевозможных вспомогательных операций.

Своевременное исследование ремонтных цепей, методов восстановления работоспособности тракторов Zoomlion, возникающих технических отказов в процессе нарастания наработки, обеспечит значительное сокращение времени простоя тракторов на ремонте, поскольку подбор запасных частей, доставка до места ремонта техники, построение логистических моделей обслуживания являются основными отраслевыми значимыми факторами сервисного радиуса обслуживания.

Материалы данной статьи являются частью исследований эксплуатационных показателей машин, в частности, типичных, характерных технических отказов и неисправностей при эксплуатации сельскохозяйственных тракторов марки Zoomlion в условиях Иркутской области, которые характеризуются многообразием связей между структурными подразделениями предприятий, неоднозначностью алгоритмов функционирования в дифференцированных условиях, наличием обратных структурных связей, случайностью воздействий и событий, требующих ремонтных воздействий.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, трактор, технический отказ, наработка, локализация, ремонт машин.

MAINTENANCE AND REPAIR OF TRACTORS ZOOMLION RS IN THE CONDITIONS OF THE IRKUTSK REGION

¹Shisteev A.V., ²Bebikov D.V.

¹FSBEI HE Irkutsk SAU

Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

²“AMK” LLC

Krasnoyarsk, Krasnoyarsk territory, Russia

Zoomlion heavy industry science and technology company is one of the largest Chinese machinery manufacturers, including a major manufacturer of construction machinery and cranes, heavy-duty trucks, transport technology vehicles, as well as agricultural tractors of various power and price categories.

Zoomlion agricultural tractors, namely the RS1304 and RS1604 models, which have gained the greatest popularity in the Irkutsk region, have begun to develop the Russian market quite recently. At the same time, modern design and ergonomics, controllability and versatility of these machines have already gained confidence among users who note a high level of performance – optimal engine power for operation in the region (RS series tractors are equipped with 6-cylinder power units with a capacity of 130 and 160 hp), fuel tank capacity (220 l, with the possibility of installing an enlarged tank with a volume of 300 l) and versatility in use: machines of this series can be aggregated with various mounted, semi-mounted and trailed equipment, and also cope well with the performance of all kinds of auxiliary operations.

A timely study of repair chains, methods for restoring the working capacity of Zoomlion tractors, and technical failures that occur in the process of increasing operating time will ensure

a significant reduction in the downtime of tractors during repairs, since the selection of spare parts, delivery to the place of equipment repair, and the construction of logistic service models are the main industry significant factors of the service radius of service.

The materials of this article are part or a fragment of studies of the performance of machines, in particular, typical, characteristic technical failures and malfunctions during the operation of Zoomlion agricultural tractors in the conditions of the Irkutsk region, which are characterized by a variety of relationships between structural divisions of enterprises, the ambiguity of functioning algorithms in differentiated conditions, the presence of reverse structural relationships, the randomness of impacts and events requiring repair impacts.

Keywords: agricultural machinery, tractor, technical failure, running time, localization, machine repair.

Введение. В настоящее время по соображениям высокой стоимости новой сельскохозяйственной спецтехники к вопросу выбора новой единицы техники для оснащения парка машин сельхозтоваропроизводители подходят скупулесно. Как правило, изучаются сведения сетевых информационных ресурсов, проводятся наблюдения за работой трактора в других хозяйствах, в том числе в других регионах, активно ведутся консультации с дилерами брендов и, непосредственно, собственниками машин и оборудования.

Отзывы механизаторов подчеркивают, что мощность двигателей внутреннего сгорания тракторов Zoomlion RS1304 и RS1604 позволяет комфортно работать с культиваторами, дискаторами и опрыскивателями разных марок, в том числе европейских и американских, что является необходимым условием для техники, используемой не только в Иркутской области, но и других регионах в условиях экономики замкнутого цикла. Кроме того, это имеет значение с технической стороны – в условиях ограниченности поставок запасных частей и ремонтных комплектов.

Земли сельскохозяйственного назначения в Иркутской области имеют высокий уровень засоренности ввиду многовидового разнообразия сорных растений и климата – признаков, которые обуславливают во многом эффективность всего сельскохозяйственного производства. Здесь тракторы данной марки имеют достаточный уровень адаптации для сельскохозяйственных работ с различным навесным, полунавесным и прицепным оборудованием и орудиями.

Технические характеристики тракторов, приведены в таблице 1.

Исходя из анализа конструктивных особенностей: типа и мощности ДВС, системы трансмиссии, конструкции навесного оборудования, возможностей при агрегатировании с навесным оборудованием и машинами была сформулирована цель исследования и объект наблюдения.

Цель исследования. Поддержка принятия инженерных решений ремонтных организаций, направленных на снижение вероятности отказов и значимости их последствий, общее улучшение технического состояния объекта с помощью методов, использующих результаты наблюдений за эксплуатацией тракторов в нормальных условиях.

Таблица 1 – Технические характеристики тракторов Zoomlion RS

Двигатель	
Число цилиндров/система впуска	6 цилиндров/турбонаддув
выброс выхлопных газов	Национальный стандарт III
Номинальная мощность/ Скорость вращения (об/мин)	95.6/117.6kW 2300rpm
Расход топлива	≤250g/kW.h
Емкость масляного бака	Стандартная комплектация: 220 л, опциональная комплектация: 300 л
Объем двигателя	6.5L
Коробка передач	
Тип	Механизм переключения передач при помощи шестерни с внутренними зубьями
Количество передач	16F+8R
Гидравлическая система	
Тип	Разделенного типа
Количество выходных клапанов (группа)	2 группы, по желанию можно выбрать 3 группы
Одноканальный гидравлический вытекающий поток	70L/min
Гидравлический подъемный механизм	
Способ управления глубиной обработки почвы	Позиционное регулирование, регулирование высоты, сильное давление
Максимальная подъемная сила (610 мм от концевой части)	≥35kN
Механизм навески	
Тип и категория	Трехточечная задняя подвеска, категория III
Вал отбора мощности	
Выходная мощность ВОМа	85/104kW
Скорость вращения (об/мин)	540/1000 (r/min)
Стандарт вала отбора мощности	6-зубчатый прямоугольный шлицевый вал (диаметр вала - 35)
Характеристика укомплектованного оборудования	
Длина x ширина x высота	5200×2435×3250mm
Колесная база	2640mm
Минимальное расстояние от поверхности земли	450mm

Объект исследования. Сельскохозяйственные тракторы Zoomlion модельного ряда RS, марки RS1304 и RS1604.

Предмет исследования. Технологические процессы поддержания необходимого технического уровня при продлении назначенного ресурса и срока службы сельскохозяйственных тракторов иностранного производства.

Методы исследования. Анализ типов, видов и последствий отказов является систематизированным методом исследования технических объектов или процессов, в основе которого лежит выявление возможных технических отказов, а также влияния этих отказов на функционирование объекта или процесса, окружающую среду и персонал. Применение метода наблюдения способствует повышению безотказности, снижению закупочных и эксплуатационных расходов, повышению деловой репутации завода-

изготовителя. В процессе исследования использованы также методы: сравнительный анализ и прогнозирование.

Основные результаты и обсуждение. Согласно ГОСТ Р 27.303-2021 анализ видов и последствий отказов направлен на выявление способов отказа технических объектов и способов предотвращения таких отказов при дальнейшей эксплуатации. Исследование должно представлять собой систематизированный метод идентификации видов отказов и их последствий для объекта или процесса на локальном и глобальном уровне. Кроме этого, исследование может включать в себя определение причин отказов. Виды технических отказов могут быть в дальнейшем ранжированы для использования при принятии решений об их устранении. Если ранжирование отказов включает в себя определение и учет значимости и других важных показателей последствий отказов, то анализ называют анализом видов, последствий и критичности отказов [4, 6].

При разработке форм для наблюдения [2] учитывались типы и виды отказов, а также фиксировалось место поломки или локализация по узлу машины, способы устранения и ликвидации таковых. Наблюдения проводились на базе предприятий: ООО “Новоямское”, Иркутский филиал ООО “АМК”, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ.

Наблюдения за тракторами Zoomlion RS1304, RS1604 в течение года, проведенные на базе ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ совместно с сервисным отделом дилерской обслуживающей компании ООО “АМК”, а также при непосредственном участии представителей завода-изготовителя показали, что в процессе нормальной эксплуатации в хозяйствах у машин данного модельного ряда могут возникать некоторые поломки и неисправности. При этом, тракторы данной марки, адаптированные именно для сельского хозяйства имели очень малую наработку. Поэтому можно говорить об отказах, возникающих в приработочный период использования с переходом от гарантийного обслуживания машин к пост-гарантийному, однако вероятность повторного возникновения неисправностей при этом очень мала ввиду высокого качества сборки машин. Под наблюдением находилась вся линейка машин, в количестве 12 единиц, что соответствует минимальному количеству машин и обеспечивает вероятность 0,9 [7, 9].

В ходе наблюдений фиксировалось количество выездов сервисной службы дилеров на место ремонта и обслуживания, проводился хронометраж времени восстановления работоспособности тракторов, фиксация локальных точек ремонта.

Полученная информация позволила разработать ряд ремонтно-регулирующих операций для ликвидации простоев машин серии RS (табл. 2).

Таким образом, анализу на предмет поломки и устранения подвергались все системы тракторов, включая электрическую, световую сигнализации, питания и запуска, тормозной пневматической системы [8].

Таблица 2 – Отказы и неисправности тракторов Zoomlion RS и способы устранения (фрагмент)

Тип неисправности	Причина неисправности	Способ устранения
1	2	3
Система сцепления		
1. Пробуксовка сцепления, запах гари в кабине механизатора	Наличие масляных загрязнений на фрикционных и прижимных дисках	Своевременное обнаружение, очистка бензином или обезжиривателем
	Сильный износ фрикционного диска	Замена диска сцепления на новый или восстановленный
	Недостаточное давление дисковой пружины	Замена дисковой пружины на новую
	Отсутствует свободный ход педали сцепления	Регулировка свободного хода педали в соответствии с требованиями мануала
	Деформация ведомого диска сцепления	Замена ведомого диска на новый
2. Сцепление не размыкается полностью, при переключении передач присутствуют шумы	Свободный ход педали сцепления слишком велик, величина рабочего хода очень мала	Регулировка свободного хода педали до 25-30 мм
	Коробление ведомого диска узла сцепления	Замена ведомого диска на новый
	Головки трех разъединительных рычагов находятся в разных плоскостях	Регулировка положения по требованиям мануала
3. Сильная вибрация ДВС при запуске трактора	Головки трех разъединительных рычагов находятся не в одной плоскости	Регулировка положения по требованиям мануала
	Ослаблены крепежные винты маховика и корзины (картера) сцепления	Немедленная остановка, транспортирование, ремонт со снятием КПП
Коробка переменных передач		
1. Трудности при переключении передач, отсутствие возможности переключения	Неполное выключение	Устранение неисправности согласно способу устранения неисправности сцепления
	Слишком большая длина тягового стержня блокировки переключения	Укоротить стержень путем регулировки
	Торцевая поверхность зацепляющей втулки и торец шестерни изношены или сломаны	Замена втулки и замена/восстановительный ремонт шестерни
2. Автоматическое выключение передачи	Установочная канавка вала вилки сильно изношена	Замена вала вилки на новый либо восстановление
	Недостаточное давление пружины установочного штифта	Регулировка или замена пружины установочного штифта
	Наклон вала из-за износа подшипника вала шестерни	Замена установочных подшипников

1	2	3
Задний мост		
1. Повышенный шум центральной трансмиссии	Неправильное зацепление шестерни	Замена подшипника или шестерни
	Подшипник или шестерня конической зубчатой пары повреждены	Замена вала дифференциала на новый
	Износ прокладки планетарной передачи	Замена прокладки
2. Перегрев подшипника малой конической шестерни и подшипника дифференциала	Слишком большое значение момента затяжки	Повторная регулировка момента затяжки
	Боковой зазор конической пары слишком мал	Регулировка бокового зазора конической пары
Ходовая система		
1. Сильный износ передних шин	Сильная деформация обода колеса	Корректировка/правка обода или замена на новый
	Сильный износ штифтов масляного цилиндра и рулевого кулака	Замена штифтов на новые
2. Люфт передних колес	Ослабление болтов и зажимных гаек рулевого маятникового рычага, масляного цилиндра и цапфы	Проверка, регулировка, повторное закрепление узлов ходовой системы
	Сильный износ поворотного шкворня	Замена поворотного шкворня на новый
	Нарушение схождения	Регулировка схождения
Гидравлика рулевого управления и подвесной системы		
1. Тяжелое управление рулевым колесом	Недостаточная подача масла в шестеренчатый насос, внутренняя утечка или засорение сетки фильтра в масляном баке рулевого управления	Проверка исправности насоса и очистка сетки фильтра в баке
	Усилие пружины предохранительного клапана становится слабым или стальной шар не уплотнен	Очистка предохранительного клапана или регулировка пружины
2. Невозможно выполнить подъем независимо от нагрузки	Застревание главного регулирующего клапана в нейтральном положении	Демонтаж распределителя, разбор, очистка и шлифовка клапана
	Штифт становится коротким, клапан опускания в сборе ослаблен или откручен полностью	Удалить заглушку клапана, регулировка зазора толкателя клапана / подтяжка креплений

Помимо ремонтных воздействий трактор, как и любое другое транспортное средство, нуждается в периодическом техническом обслуживании [1, 3]. Для тракторов Zoomlion RS1304, RS1604, которые нашли применение в Иркутской области и Красноярском крае (по географии дилерского логистического плеча обслуживания), были установлены и

рекомендуются для использования следующие сроки проведения технических обслуживаний, кроме ежедневных технических воздействий (табл. 3).

Таблица 3 – **Корректирование сроков технического обслуживания**

№ пп	Наименование технического обслуживания	Периодичность проведения, м-час
1	Ежедневное ТО	Каждую смену
2	ТО – 1	50
3	ТО – 2	200
4	ТО – 3	800
5	Сезонное ТО	Осень/Весна

С практической стороны, данная работа преследует цель определение рекомендаций по наиболее плавной или мягкой адаптации техники для последующей ее эксплуатации в Иркутской области, Красноярском крае, а также возможность изготовления запасных частей и принадлежностей к импортным тракторам и машинам в рамках механизма обратного инжиниринга отечественными ремонтными организациями. Такие предприятия должны иметь соответствующий опыт по осуществлению подобной деятельности: быть в состоянии выполнять сложное проектирование, иметь производственные площадки, квалифицированные кадры, метрологическое обеспечение. Кроме того, такой подход обязательно должен включать механизмы рециклинга и реновации деталей машин.

Выводы. 1. Проведенные исследования показали, что для полноценной эксплуатации тракторов необходимо определение номенклатурно-количественного состава обменного фонда по полученной таблице технических отказов с учетом того, что основные неисправности были локализованы. 2. Сравнительный анализ показателей производительности тракторов Zoomlion RS1304, RS1604 и аналогичных по мощности, например YTA-X1304, при выполнении культивации и по удельному расходу топлива [5] показал, что первый имеет преимущества по обоим показателям – на 8,4 и 10,4 % соответственно.

Список литературы

1. Аносова, А.И. Функциональная диагностика двигателей внутреннего сгорания / А.И. Аносова, П.И. Ильин, С.Н. Шуханов / Известия Международной академии аграрного образования. 2022. – № 58. – С. 10-13.

2. Бураев, М.К. Логистическая поддержка системы производственно-технической эксплуатации машинно-тракторного парка / М.К. Бураев, А.В. Шистеев // В сб.: Информационные технологии, системы и приборы в АПК. Матер. 7-й Междунар. научно-практ. конф. "Агроинфо-2018". Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Сибирский физико-технический институт аграрных проблем и др., 2018. – С. 383-386.

3. Голубев, В.В. Оптимизация параметров и режимов работы дискового пневматического высевающего аппарата / В.В. Голубев, А.С. Фирсов, Д.М. Рула //

Сельскохозяйственные машины и технологии. №2. – 2015. – С. 24-27.

4. Дмитриев, Н.Н. Становление и развитие научной школы агроэкологии Предбайкалья / Н.Н. Дмитриев, А.А. Мартемьянова, Р.В. Замашиков, Е.Ш. Дмитриева / Вестник ИрГСХА. 2021. – № 106. – С. 29-41.

5. Запасные части на сельскохозяйственную технику – Режим доступа: <https://amk24.com/zapchasti>

6. Иовлев, Г.А. Сравнение эксплуатационных свойств китайских тракторов Zoomlion и YTO / Г.А. Иовлев, В.В. Побединский, И.И. Голдина // Том 16, № 4. 2022. – С. 74-82.

7. Руководство по безопасной эксплуатации и техническому обслуживанию колесных тракторов серии RS / ОАО КСХМ Zoomlion // КНР, Хэнань, 015718099SAA00022, 2020, 133 с.

8. Селиванов, А.И. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев // М.: “Колос”, 1978. – 248 с.

9. Шистеев, А.В. Восстановление работоспособности импортной сельскохозяйственной техники с использованием сменно-обменных элементов / А.В. Шистеев, М.К. Буряев // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 3 (102). – С. 35-40.

10. Шистеев, А.В. Обеспечение работоспособности иностранных тракторов с использованием сменно-обменных элементов при техническом сервисе / автореферат дис. ... кандидата технических наук / Вост.-Сиб. гос. ун-т технологий и упр.. Иркутск, 2016.

References

1. Anosova, A.I. et all. Funktsional'naya diagnostika dvigateley vnutrennego sgoraniya [Functional diagnostics of internal combustion engines]. Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya, 2022, no. 58, pp. 10-13.

2. Buraev, M.K., Shisteev, A.V. Logisticheskaya podderzhka sistemy proizvodstvenno-tekhnicheskoy ekspluatatsii mashinno-traktornogo parka [Logistic support of the system of production and technical operation of the machine and tractor park]. 2018, pp. 383-386.

3. Golubev, V.V. et all. Optimizatsiya parametrov i rezhimov raboty diskovogo pnevmati-cheskogo vysevayushchego apparata [Agricultural machines and technologies]. Sel'skokhozyajstvennye mashiny i tekhnologii, no.2, 2015, pp. 24-27.

4. Dmitriev, N.N. et all. Stanovleniye i razvitiye nauchnoy shkoly agroekologii predbaykal'ya [Formation and development of the scientific school of agroecology of the Baikal region] Vestnik IRGSHA, 2021, no. 106, pp. 29-41.

5. Zapasnyye chasti na sel'skokhozyaystvennyuyu tekhniku [Spare parts for agricultural machinery]. <https://amk24.com/zapchasti>

6. Iovlev, G.A. et all. Sravneniye ekspluatatsionnykh svoystv kitayskikh traktorov Zoomlion i YTO [Comparison of operational properties of Chinese tractors Zoomlion and YTO]. Vol. 16, no. 4, 2022, pp. 74-82.

7. Rukovodstvo po bezopasnoy ekspluatatsii i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh traktorov serii RS [Guidelines for the safe operation and maintenance of wheeled tractors of the RS series]. China, Henan, 015718099SAA00022, 2020, 133 p.

8. Selivanov, A.I., Artemiev, Yu.N. Teoreticheskiye osnovy remonta i nadezhnosti sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Theoretical foundations of repair and reliability of agricultural machinery] Moscow: Kolos, 1978, 248 p.

9. Shisteev, A.V., Buraev M.K. Vosstanovleniye rabotosposobnosti importnoy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki s ispol'zovaniyem smenno-obmennyykh elementov [Restoration of working capacity of imported agricultural machinery using replaceable-exchange elements]. Vestnik KrasGAU, 2015, no. 3 (102), pp. 35-40.

10. Shisteev, A.V. Obespecheniye rabotosposobnosti inostrannykh traktorov s is-

pol'zovaniyem smenno-obmennyykh elementov pri tekhnicheskoye servise [Ensuring the performance of foreign tractors with the use of replaceable-exchange elements during technical service]. Autoref. disser. Cand. of Technical Sciences. – Irkutsk, 2016.

Дата поступления в редакцию 17.03.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторах

Шистеев Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры “Технический сервис и общеинженерные дисциплины”. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н., п. Молодежный, тел. 89025608844, email: drive-er@yandex.ru).

Бебиков Дмитрий Викторович – генеральный директор ООО “АМК”, официальный дилер Zoomlion по Иркутской области и Красноярскому краю (660055, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, пр-т Metallurgov 1 М, строение 4, тел 8(391) 291-11-31, email: info@amk24.com).

Information about authors

Shisteev Alexey V. – Candidate of Technical Sciences, Ass. Prof. of the Department “Technical Service and General Technical Disciplines” of the Engineering Faculty. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. 89025608844, e-mail: drive-er@yandex.ru).

Bebikov Dmitry V. – General Director of “АМК” LLC, official dealer of Zoomlion in the Irkutsk region and the Krasnoyarsk Region (4, 1M, Metallurgov avenue, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Region, Russia, 660055, tel. 8(391) 291-11 -31, email: info@amk24.com).

УДК 519.863

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ И АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

В.И. Зоркальцев

ФГБОУ ВО "БГУ"
г. Иркутск, Россия

При выборе вариантов развития и функционирования предприятий, технико-экономических систем, в том числе в аграрном производстве, нередко сталкиваются с проблемой многокритериальности, с необходимостью учета нескольких оптимизируемых параметров, находящихся в конфликтных состояниях, когда оптимальное решение по одному из них не является оптимальным по другим рассматриваемым критериям. В качестве самого общего подхода в формализации проблемы выбора в условиях многокритериальности служит понятия Парето-оптимальных решений, рассматриваемое в статье. Приводится два алгоритма вычисления Парето-оптимальных решений. Дается их экономическая интерпретация. Обсуждаются математические свойства рассматриваемых алгоритмов и решений, которые целесообразно учитывать при их использовании.

Ключевые слова: оптимизация, многокритериальность, оптимальность по Парето, свертки целевых функций, множители Лагранжа.

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION PROBLEMS AND ALGORITHMS FOR SEARCHING PARETO OPTIMAL SOLUTIONS

Zorkaltsev V.I.

FSBEI HE "BSU"
Irkutsk, Russia

When choosing options for the development and functioning of enterprises, technical and economic systems, including in agricultural production, they often face the problem of multi-criteria, with the need to take into account several optimized parameters that are in conflict states, when the optimal solution for one of them is not optimal for others. the criteria under consideration. The Pareto concept of optimal solutions, considered in the article, serves as the most general approach in formalizing the problem of choice in conditions of multicriteria. Two algorithms for calculating Pareto optimal solutions are given. Their economic interpretation is given. The mathematical properties of the considered algorithms and solutions are discussed, which should be taken into account when using them.

Keywords: optimization, multicriteria, Pareto optimality, convolutions of objective functions, Lagrange multipliers.

Введение. В экономических и инженерных задачах широкое

применение нашли модели в виде задач оптимизации, в которых требуется максимизировать или минимизировать некоторую функцию (она называется целевой функцией) на множестве допустимых значений переменных. Множество допустимых значений переменных состоит из наборов (векторов) переменных, удовлетворяющих условиям рассматриваемой задачи, задаваемых либо перечислением допустимых вариантов, либо в виде системы уравнений и неравенств относительно рассматриваемых переменных, выполнение которых означает допустимость по физическим, техническим и экономическим условиям (ограничениям) данного решения.

При осуществлении выбора наилучшего варианта из допустимых решений нередко возникает проблема многокритериальности – наличие нескольких целевых функций. Например, при выборе вариантов энергообеспечения заданного контингента потребителей электроэнергии, тепловой энергии, котельно-печным или моторным топливом требуется выбрать не только самый экономичный вариант энергоснабжения, но и вариант, обеспечивающий наиболее надежный способ энергоснабжения, а также с минимальными негативными экологическими последствиями. Причем надежность энергоснабжения может измеряться несколькими критериями в т. ч. вероятностью возникновения дефицита энергоресурсов, математическим ожиданием дефицита, математическим ожиданием экономических ущербов от дефицита [5]. И эти показатели нередко должны рассматриваться не по совокупности все потребителей, а отдельно для разных их, в том числе территориально, размещенных категорий. Какого-либо единого показателя максимизируемой надежности энергообеспечения не существует.

Большим количеством показателей измеряется экологический вред от производственной деятельности, в частности, при энергоснабжении. Это могут быть минимизируемые объемы выбросов конкретных видов вредных веществ: окислов серы, окислов азота, сажи и окислов углерода, а также многих других вредных веществ для воздушного бассейна, почвы, природных гидроресурсов. Во многих случаях целесообразно учитывать химическое взаимодействие отдельных видов выбросов.

Как правило, различные оптимизируемые целевые функции находятся в “конфликтном” состоянии – наилучшие решения по одним критериям не являются таковыми по другим. Необходима выработка “компромиссного подхода” в учете разных конфликтных критериев оптимальности. Основная цель данной статьи состоит в изложении возможных подходов к формированию таких компромиссных подходов, исходя из накопленного опыта решения конкретных многокритериальных проблем и опыта создания математических моделей. Статья является развитием данной темы в материалах лекций, прочитанных автором для молодых ученых, преподавателей и специалистов [3].

Многокритериальная задача оптимизации. Нередко при принятии экономических и иных решений с использованием оптимизационных математических моделей приходится учитывать не одну, а несколько целевых функций. Пусть $i = 1, \dots, k$ номера целевых функций $f_i(x)$, каждую из которых требуется минимизировать

$$f_i(x) \rightarrow \min, \quad x \in X, \quad i = 1, \dots, k, \quad (1)$$

где X - одно и то же во всех случаях множество допустимых решений. Напомним, что задача максимизации функции может быть представлена в виде задачи минимизации умноженной на минус единицу этой же функции. Подчеркнем также, что запись (1) нельзя считать корректной формулировкой модели, пока не определено что следует считать единым оптимумом по нескольким критериям.

При экономических решениях относительно, скажем, вариантов развития и функционирования производственных объектов в качестве критериев оптимизации могут выступить минимизация денежных затрат (при заданных объемах выпуска продукции), минимизация каким-то образом измеряемого экономического риска, минимизация вредных выбросов (различных вредных веществ в атмосферу, в водоемы, на суше), минимизация травматизма на производстве и т.д.

В редких случаях возможна ситуация, когда по всем рассматриваемым критериям имеется одно и то же оптимальное решение. Тогда это решение и будет решением данной многокритериальной задачи. Обычно критерии находятся в конфликтной ситуации – оптимальное решение по одному из них не будет оптимальным по другому критерию. Как поступать в таких случаях? Рассмотрим сначала некоторые примеры многокритериальных задач.

Пример 1. Выбор вариантов функционирования производств. Любое производство можно представлять как процесс преобразования различных видов производственных ресурсов в несколько видов продукции данного предприятия. Априори здесь имеет место многокритериальная задача – необходимо минимизировать объемы использования отдельных видов производственных ресурсов (сырья, материалов, энергоресурсов, рабочей силы, станков и оборудования) и максимизировать объемы выпуска продукции, как правило, различного вида. При этом обычно существует взаимозаменяемость отдельных видов ресурсов и отдельных видов продукции. Например, на одном и том же поле можно выращивать разные виды сельскохозяйственных культур. А это требует привлечения разного количества работающих, разные виды техники, удобрений. В чисто натуральном виде располагая только данными об объемах использования отдельных видов ресурсов и об объемах производства отдельных видов

продукции оценивать эффективно или нет данное производство, выбирать наилучшие варианты невозможно. Хорошо известно, что это успешно осуществляется с помощью денег. Соизмерение разных видов затрат и результатов это одна из главных функций денег. И в этом деньги незаменимы, хотя в некоторых социальных доктринах «разумного» переустройства общества и декларируется необходимость отказа от использования денег. Заменить их в этом нечем (как, впрочем, и в использовании денег в качестве эффективного средства обмена и накопления).

Можно напомнить, что новая власть в России в октябре 1917 года провозгласила первоначально о создании новой, безденежной экономики [1], в которой все процессы регулирования производства и распределения экономических благ должны решаться специальными уполномоченными органами на некоторых разумных принципах. Так и не удалось выяснить в чем эти разумные безденежные принципы должны состоять. Созданный механизм “военной экономики”, основанный на насильственном изъятии и централизованном распределении ресурсов привел страну к экономическому кризису. Этот кризис сменился бурными процессами восстановления и роста экономики при переходе к Новой экономической политике, основанной на использовании денежных механизмов и интересов в регулировании экономических процессов [2]. Правда, в дальнейшем, начиная с конца 20-х годов прошлого столетия экономика СССР опять в значительной мере перешла на командно-административный путь функционирования и развития, при котором денежное соизмерение затрат и результатов играло обычно второстепенную роль. Первостепенную роль играли показатели, выражающиеся в единицах объемов использования, производства и распределения конкретных видов продукции. И это была одна из причин неэффективности экономического механизма, действовавшего до конца 80-х годов прошлого века.

Пример 2. Сопоставление вариантов инвестиций в инфраструктурные сектора производства. При сопоставлении вариантов формирования и развития инфраструктурных секторов экономики, направленных на решение общественно значимых задач целесообразно исходить из целей решения этих проблем с минимальными затратами. В эти затраты входит как ежегодные текущие издержки, так и капитальные затраты на проект, которые необходимо понести в самом начале для создания нового или реконструкцию имеющегося производства. В 60-х и 70-х годах XX в. в науке СССР проходила дискуссия о способах обновления выбора наиболее эффективных вариантов капитальных вложений. Одним из результатов этого обсуждения было принятие многими ведущими специалистами, участвующими в дискуссии, в качестве основного расчетного критерия сравнения вариантов показателя приведенных затрат [6]:

$$S = EK + C, \quad (2)$$

где C – ежегодные текущие издержки в данном производстве, K – объемы требуемых начальных капитальных вложений (инвестиций), E – заданный нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (обычно в расчетах принимался равным 0,12 или в некоторых случаях - 0,08).

При сопоставлении вариантов капиталовложений по критерию приведенных затрат (2) важно было достигать сопоставимость этих вариантов по получаемому эффекту. Иногда это осуществлялось путем сопоставления приведенных затрат на единицу производимой продукции на основе использования показателя удельных приведенных затрат:

$$s = S/Q, \quad (3)$$

где Q – годовой объем производства продукции.

Отметим, что в показателе (2) стоимость продукции никак не учитывается. Более того, на базе показателя удельных приведенных затрат должны формироваться цены на продукцию, поскольку речь идет об инфраструктурных секторах экономики, как правило, относящихся к так называемым естественным монополиям.

Парето-оптимальные решения. Исходной теоретической основой различных конкретизаций многокритериальной задачи может служить понятие оптимальных по Парето решений [4]. Их называют также Парето-оптимальными решениями. В данном разделе дадим определение таких решений. Для этого сначала определим вектор $x \in X$, который не будет Парето-оптимальным решением многокритериальной задачи (1).

Определения. Данное решение не будет Парето-оптимальным решением задачи (1), если существует другое решение $y \in X$, которое по всем критериям не хуже, чем решение x

$$f_i(y) \geq f_i(x), \quad i = 1, \dots, k, \quad (4)$$

а хотя бы по одному критерию лучше,

$$f_l(y) > f_l(x), \quad (5)$$

при некотором $l \in \{1, \dots, k\}$. В таком случае вместо решения x лучше взять это решение y .

Теперь мы готовы к определению Парето-оптимального решения. Решение $x \in X$ будет **Парето-оптимальным** для многокритериальной задачи (1), если оно не является не Парето-оптимальным. Или, в развернутой форме, решение $x \in X$ является Парето-оптимальным, если не существует другого решения, $y \in X$, при котором выполняются

неравенства (4) и строгое неравенство (5), хотя бы для одной целевой функции.

Понятие Парето-оптимальное решение сужает множество вариантов, подлежащих дальнейшему рассмотрению, но не дает однозначного выбора. Парето-оптимальных решений может быть много.

Есть также проблемы с получением Парето-оптимальных решений. Ниже будет рассмотрен два возможных способа получения таких решений, при которых одновременно получаем и содержательную их интерпретацию, позволяющую Парето-оптимальные решения сопоставлять между собой.

1. Свертка целевых функций. Пусть $\lambda_i, i=1, \dots, k$ заданные положительные весовые коэффициенты. Введем функцию

$$F_{\lambda}(x) = \sum_{i=1}^k \lambda_i f_i(x), \quad (6)$$

являющуюся линейной сверткой исходных целевых функций с весами λ_i .

Обозначим

$$x(\lambda) = \arg \min \{F_{\lambda}(x) : x \in X\} \quad (7)$$

как решение задачи минимизации F_{λ} на множестве X .

Теорема. При любом наборе положительных весовых коэффициентов λ_i вектор $x(\lambda)$ является Парето-оптимальным решением задачи (1).

Доказательство можно осуществить методом от противного. Предположим, что $x(\lambda)$ не Парето-оптимальное решение. Тогда существует вектор, $y \in X$, при котором выполняются для $x = x(\lambda)$ неравенства (4), (5). Умножим правую и левую часть неравенства (4) при каждом i на величину λ_i . Поскольку λ_i величины положительные, неравенства сохраняются. Сложим полученные неравенства. С учетом того, что согласно (5) одно из неравенств (6) выполняется в строгой форме, имеем

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i x_i(\lambda) > \sum_{i=1}^k \lambda_i y_i,$$

то есть

$$F_{\lambda}(y) < F_{\lambda}(x(\lambda)).$$

Это противоречит (7). Предположение не верно. Теорема доказана.

Экономическая интерпретация. Оптимальное решение $x(\lambda)$ не изменится, если все весовые коэффициенты умножить на одно и то же положительное число, например, на число $1/\lambda_1$. Будем считать, что $\lambda_1 = 1$.

Пусть первая целевая функция f_1 характеризует стоимостной показатель, например, минимизируемые затраты в денежной форме. Тогда

$\lambda_i, i = 2, \dots, k$ будут интерпретироваться как коэффициенты перевода в стоимостную форму показателей, выражаемых критериями $f_i, i = 2, \dots, k$. Например, если функция f_i измеряет объемы выбросов каких-либо вредных веществ, то λ_i характеризует стоимостную оценку удельных ущербов – «цену» выброса единицы этого вещества.

Такая интерпретация показывает, что приведенные ранее два примера конкретных сверток целевых функций приводят именно к Парето-оптимальным решениям. Естественно, что изменение численных значений весовых коэффициентов в свертке (6) будет приводить к изменениям оптимальных решений задачи (7). При этом утверждать, что в результате варьирования численных значений весовых коэффициентов можем получить любое Парето оптимальное решение нельзя. Могут быть такие Парето оптимальные решения, которые не являются решением задачи (7).

В этом плане более универсальным является излагаемый далее другой подход к поиску конкретных Парето оптимальных решений.

2. Введение целевых функций в ограничения задачи. Рассмотрим еще один способ представления многокритериальной проблемы (1) в виде задачи одномерной оптимизации. Пусть $b_i, i = 2, \dots, k$ некоторые фиксированные параметры. Рассмотрим задачу

$$f_1(x) \rightarrow \min, x \in X, f_i(x) \leq b_i, i = 2, \dots, k. \quad (8)$$

Можно доказать, что при

$$b_i = f_i(x(\lambda)), i = 1, \dots, k,$$

где вектор положительных весовых коэффициентов λ имеет коэффициент λ_1 равным единице, решением задачи (8) будет вектор $x(\lambda)$.

В общем случае при представлении многокритериальной задачи (1) в виде однокритериальной задачи (8) параметры b_i будут соответствовать некоторым значениям λ_i в свертке (6). Уменьшение одного из значений b_i соответствует некоторому увеличению значения λ_i с тем же номером i в свертке (6). Множители λ_i в свертке (6) можно интерпретировать как некоторый аналог множителей Лагранжа ограничений задачи (7).

Можно доказать, что любое оптимальное решение задачи (8) при котором все ограничения-неравенства выполняются в виде равенства являются Парето оптимальными решениями задачи (1). При этом любое Парето оптимальное решение может быть представлено как решение задачи (8).

Список литературы

1. Борисова, Л.В. Военный коммунизм: насилие как элемент хозяйственного механизма / Л.В. Борисова. – М.: Моск. научный фонд, 2001. – 235 с.
2. Зоркальцев, В.И. Экономика СССР до и в период Великой Отечественной войны (с использованием материалов лекций Б.П. Орлова) / В.И. Зоркальцев. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. – 44 с.
3. Зоркальцев, В.И. Элементы оптимизации / В.И. Зоркальцев. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – 100 с.
4. Ногин, В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2005. – 176 с.
5. Руденко, Ю.Н. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Методы исследования / Ю.Н. Руденко, М.Б. Чельцов. – Новосибирск: Наука, 1974. – 264 с.
6. Хачатуров, Т.С. Экономическая эффективность капитальных вложений / Т.С. Хачатуров. – М.: Экономика, 1964. – 279 с.

References

1. Borisova, L.V. Voyennyu kommunizm: nasiliye kak element khozyaystvennogo mekhanizma [War communism: violence as an element of the economic mechanism]. Moscow: Mosk. nauchnyy fond, 2001, 235 p.
2. Zorkaltsev, V.I. Ekonomika SSSR do i v period Velikoy otechestvennoy voyny (s ispol'zovaniyem materialov lektsiy B.P. Orlova) [The economy of the USSR before and during the Great Patriotic War (using the materials of lectures by B.P. Orlov)]. Irkutsk: ISEM SB RAS, 2013, 44 p.
3. Zorkaltsev, V.I. Elementy optimizatsii [Elements of optimization]. Irkutsk: ISEM SB RAS, 2014, 100 p.
4. Nogin, V.D. Prinyatiye resheniy v mnogokriterial'noy srede: kolichestvennyy podkhod. [Decision making in a multicriteria environment: a quantitative approach]. Moscow: Fizmatlit, 2005, 176 p.
5. Rudenko, Yu.N., Cheltsov, M.B. Nadezhnost' i rezervirovaniye v elektroenergeticheskikh sistemakh. Metody issledovaniya [Reliability and redundancy in electric power systems. Research methods]. Novosibirsk: Nauka, 1974, 264 p.
6. Khachaturov, T.S. Ekonomicheskaya effektivnost' kapital'nykh vlozheniy [Economic efficiency of capital investments]. Moscow: Ekonomika, 1964, 279 p.

Дата поступления в редакцию 23.03.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторе

Зоркальцев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией математического моделирования. ФГБОУ ВО “БГУ” (664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, тел. +7 (3952) 52-26-29, e-mail: billing-help@bgu.ru).

Information about authors

Zorkaltsev Valery I. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory of Mathematical Modeling. FSBEI HE "BSU" (11, Lenin str., Irkutsk, 664003, tel. +7(3952) 52-26-29, e-mail: billing-help@bgu.ru).

УДК 519.862:631.559

ТРЕНДОВЫЕ МОДЕЛИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Я.М. Иваньо, В.В. Цыренжапова

ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

п. Молодежный, Иркутский р-он, Иркутская область, Россия

В продолжение исследований по возможности применения динамико-стохастических моделей для описания производственно-экономических показателей в работе рассмотрены разные случаи описания многолетних рядов урожайности сельскохозяйственных культур с помощью многоуровневых трендов. Разработанная методика справедлива для временных рядов, обладающих значимыми тенденциями и рассеянием параметров трендов. Для сильно варьирующих рядов во многих случаях применимы нелинейные модели с насыщением в виде логистической или асимптотической функции. В практике встречаются ситуации, при которых урожайность сельскохозяйственной культуры может быть описана несколькими значимыми многоуровневыми трендами. В этом случае необходимо выбрать наилучший вариант из многих. Приведены примеры, в которых временные ряды могут быть описаны многоуровневыми трендами – линейными, нелинейными с насыщением и неограниченным ростом уровней. Вид аналитических выражений с использованием метода выделения пиков и ложбин временного ряда влияет на определение благоприятных и неблагоприятных событий, их число и вероятностную оценку. Неблагоприятные события в виде уровней, располагающихся ниже тренда последовательности нижних значений, представляют собой высокие потери рассматриваемой характеристики. Ряд разностей между фактическими уровнями и значениями тренда последовательности нижних уровней можно описать с помощью закона распределения вероятностей с оценкой потерь. В качестве функции распределения предложено выражение Пирсона III типа. Таким образом, согласно полученным трендам временного ряда возможно прогнозирование с краткосрочным и среднесрочным упреждением, а также определение вероятностных потерь. Результаты прогнозирования и оценки потерь получены по данным урожайности сельскохозяйственных культур Нижнеудинского района Иркутской области за 1996-2021 гг.

Ключевые слова: временной ряд, многоуровневые тренды, вероятностная оценка, потери, урожайность сельскохозяйственных культур.

TREND MODELS IN FORECASTING AND EVALUATION OF LOSSES OF CROP YIELD

Ivanyo Ya.M., Tsyrenzhapova V.V.

FSBEI HE Irkutsk SAU

Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

In continuation of research on the possibility of using dynamic-stochastic models to describe production and economic indicators, the paper considers various cases of characterizing long-term series of crop yields using multi-level trends. The developed technique is valid for time series with significant trends and scatter of trend parameters. For highly varying series, nonlinear models with saturation in the form of a logistic or asymptotic function are in many cases applicable. In practice, there are situations in which the yield of an agricultural crop can be described by several significant multilevel trends. In this case, it is necessary to choose the best option from many. Examples are given in which time series can be described by multilevel trends - linear, non-linear with saturation and unlimited growth of levels. The type of analytical expressions using the method of selecting peaks and troughs of the time series affects the definition of favorable and unfavorable events, their number and probabilistic assessment. Adverse events in the form of levels located below the trend of the sequence of low values represent a high loss of the characteristic under consideration. A series of differences between the actual levels and the trend values of the sequence of lower levels can be described using a probability distribution law with estimated losses. The Pearson type III expression is proposed as a distribution function. Thus, according to the obtained trends of the time series, it is possible to forecast with short-term and medium-term lead, as well as a probabilistic assessment of losses. The results of forecasting and assessing losses were obtained based on the data on crop yields in the Nizhneudinsk district of the Irkutsk region for 1996-2021.

Keywords: time series, multilevel trends, probabilistic estimation, losses, crop yields.

Введение. Оценка различного рода тенденций имеет значение для выявления возможностей развития тех или иных сторон экономики региона и страны. В сельском хозяйстве актуально определение трендов для научно-технического развития и повышения конкурентоспособности [14], изменчивости экологической ситуации [10], органического аграрного производства [9] и других аспектов.

Значительный вклад в объемы получения продовольственной продукции вносят климатические факторы, которые характеризуются сильными колебаниями и резкими перепадами. В работе [13] показано влияние изменчивости климата на размещение отраслей сельского хозяйства в России, а в статье [16] рассмотрены вопросы адаптации отрасли к изменениям внешней среды. Автором [5] обращено внимание на изменчивость климатических характеристик в Восточной Сибири.

Климатические факторы, особенности сортов сельскохозяйственных культур и технологии возделывания определяют многолетнюю изменчивость урожайности. Судя по тенденциям биопродуктивности аграрных культур в передовых странах мира, временные ряды характеризуются волнообразными колебаниями роста. При этом тенденции возрастания урожайности сельскохозяйственных культур являются нелинейными.

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур отличается большим разнообразием. В работе [4] проанализированы различные методы прогнозирования показателей сельского хозяйства. Некоторые авторы применяют смешанные модели. Так, в статье [8] сделана попытка совместного использования авторегрессионного анализа и метода скользящего среднего, а авторами работы [15] предложена регрессионная модель с применением

градиентного метода оптимизации. Метод экстраполяции использован для многолетнего прогнозирования некоторых показателей сельского и лесного хозяйства России [17].

В работе [6] предложен алгоритм выделения событий на основе многоуровневых трендов, которые использованы в статье [2] для прогнозирования и планирования производства аграрной продукции в благоприятных и неблагоприятных внешних условиях. Подобные модели могут широко применяться в задачах параметрического программирования [1], а также при моделировании случайных событий с помощью метода статистических испытаний [18].

В продолжение работ, связанных с использованием многоуровневых трендов, целью статьи является описание выбора наилучших вариантов многоуровневых трендов из некоторого числа моделей для прогнозирования и оценки производственных потерь на основе временных рядов урожайности сельскохозяйственных культур. Для достижения цели решались задачи выбора многоуровневых трендов для прогнозирования и оценки потерь урожайности сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы. При подготовке статьи использованы данные по урожайности сельскохозяйственных культур муниципальных районов Иркутской области за 1996-2021 гг. Для примера выделен Нижнеудинский район.

При построении многоуровневых трендов использован метод выделения нижних и верхних уровней временного ряда, предложенный в работе [3]. Кроме того, определение трендов и оценка потерь осуществлялись согласно алгоритму, предложенному в [6]. При статистическом анализе использованы линейные и нелинейные функции с неограниченным ростом (степенная и полупологарифмическая) и насыщением (логистическая и асимптотическая). Уровень насыщения определялся как наибольшее значение ряда с добавлением точности рассматриваемой характеристики. По аналогии оценивалось наименьшее значение как сумма минимального уровня и точности характеристики.

Основные результаты. Временные ряды производственно-экономических и климатических характеристик, связанных с получением продовольственной продукции могут отличаться статистическими свойствами. Обычно климатические характеристики представляют собой случайные выборки или последовательности со значимыми невысокими коэффициентами автокорреляции. При этом автокорреляционные функции, как правило, являются убывающими.

Некоторая часть временных рядов характеризуется значимыми тенденциями роста. Вместе с тем наблюдаются случайные отклонения некоторых уровней этих рядов от значений, полученных с помощью математических моделей. Такие временные ряды предложено описывать многоуровневыми трендами [2], а значения, отклоняющиеся от них, –

вероятностными распределениями [6]. К последовательностям, которые могут быть описаны динамико-стохастическими моделями, можно отнести урожайность сельскохозяйственных культур. При этом эта характеристика, зависящая от условий внешней среды и применяемых агротехнологий, включает в себя разную степень сочетания детерминированной и случайной составляющей.

Алгоритм исследования заключался в выполнении следующих операций. Во-первых, определены ряды урожайности сельскохозяйственных культур для выделения многоуровневых трендов и статистической оценки отклонений. В качестве таковых использованы биопродуктивности пшеницы, ячменя и капусты. Объем каждой последовательности составил 26 значений.

Во-вторых, выделены последовательности нижних (НУ) и верхних (ВУ) уровней по ложбинам и пикам временного ряда [3] для построения многоуровневых трендов: по всем уровням, нижним и верхним значениям.

В-третьих, с использованием линейной и нелинейных функций подобраны значимые тренды по следующим критериям: коэффициенту детерминации (R^2), F -критерию Фишера с учетом уровня значимости α и t -статистикам Стьюдента. При использовании логистической и асимптотической функции дополнительно определяются уровень насыщения и минимальный уровень для начальных условий. В конкретных примерах эти значения задавались увеличением на 0,1 (точность определения урожайности).

В-четвертых, согласно сравнительному анализу статистических критериев и особенности динамики ряда определена наилучшая зависимость. В дополнение к выбору лучшей зависимости использован ретроспективный прогноз.

В-пятых, по разности фактических и модельных значений, полученных по трендам последовательности нижних уровней, построены выборки, описанные с помощью закона распределения Пирсона III типа [12]. Отрицательные значения представляют собой вероятные потери. Оценены два наихудших случая производства сельскохозяйственной продукции в неблагоприятных условиях.

В таблицах 1 - 3 приведены многоуровневые тренды и их статистические параметры, а также прогностические значения урожайности на 2022-2025 гг.

Таблица 1 – Многоуровневые линейные и нелинейные тренды временного ряда урожайности пшеницы по данным Нижнеудинского района за 1996-2021 гг.

Уровень	Регрессионное выражение	R^2	F -критерий Фишера	α	t -статистики Стьюдента	Прогноз по годам, ц/га			
						2022	2023	2024	2025
Весь ряд	$y=20,3/(1+e^{-0,098t})$	0,69	54,5	$1,27 \times 10^{-7}$	-7,38	18,6	18,7	18,9	19,0
ВУ	$y=20,3/(1+e^{-0,155t})$	0,93	74,1	0,00035	-8,61	20,0	20,0	20,1	20,1
НУ	$y=17,4/(1+e^{-0,118t})$	0,55	6,07	0,069	-2,46	16,7	16,8	16,8	16,9
Весь ряд	$y=0,402t+8,57$	0,60	37,3	$2,6210^{-6}$	6,11	19,6	20,0	20,4	20,8
ВУ	$y=0,374t+11,0$	0,85	27,4	0,0034	5,24	21,1	21,5	21,8	22,2
НУ	$y=0,558t+3,93$	0,77	13,2	0,022	3,64	19,0	19,5	20,1	20,6

**Серия ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Весь ряд	$y=5,65+3,54\ln t$	0,57	31,2	$9,51 \times 10^{-6}$	5,59	17,3	17,5	17,6	17,7
ВУ	$y=7,81+3,57\ln t$	0,89	19,4	0,0070	4,41	19,6	19,7	19,8	20,0
НУ	$y=-3,22+6,14\ln t$	0,88	30,6	0,0052	5,53	17,0	17,3	17,5	17,7

Для урожайности пшеницы из логистической, линейной и полулогарифмической функций предпочтение отдано второй, что обусловлено лучшими критериями точности и значимости регрессионных выражений. Кроме того, полулогарифмическая функция для последовательности нижних уровней может принимать отрицательные значения, что противоречит физическому смыслу урожайности зерновой культуры. Что касается логистической функции, то для нее тренд последовательности нижних уровней соответствует высокому уровню значимости ($\alpha = 0,069$) относительно линейной зависимости ($\alpha = 0,022$). При этом прогностические значения по этому тренду для логистической функции сильно занижены относительно линейного тренда, достигая в относительных величинах 13,6-22,2%.

Отметим, что согласно ретроспективному прогнозу, выполненному с упреждением 1, 2, 3, 4, в первом случае средняя арифметическая погрешность аппроксимации для линейной функции составляет 6,7%, что точнее по сравнению с другими моделями. При увеличении шага прогнозирования до двух все зависимости обладают близкой точностью 10,6-11,4%. Наибольшие расхождения по средней арифметической погрешности аппроксимации между ретроспективными прогнозами по разным функциям наблюдаются при упреждении 4 (9,8-17,9%). Хотя в этом случае наибольшее расхождение между фактическими значениями и уровнями модели зафиксированы для линейной зависимости, тем не менее, согласно совокупности рассмотренных критериев для прогнозирования рекомендуется использовать линейную зависимость.

По аналогичным соображениям для урожайности ячменя выбор сделан в пользу многоуровневой линейной функции (табл. 2).

Таблица 2 – Многоуровневые линейные и нелинейные тренды временного ряда урожайности ячменя по данным Нижнеудинского района за 1996-2021 гг.

Уровень	Регрессионное выражение	R^2	F -критерий Фишера	α	t -статистики Стьюдента	Прогноз по годам, ц/га			
						2022	2023	2024	2025
Весь ряд	$y=22,5/(1+e^{-0,0664t})$	0,51	26,3	$3,0 \times 10^{-5}$	-5,13	19,3	19,5	19,6	19,8
ВУ	$y=22,5/(1+e^{-0,126t})$	0,68	10,6	0,0310	-3,26	21,8	21,9	21,9	22,0
НУ	$y=15,8/(1+e^{-0,146t})$	0,7	11,7	0,0267	-3,42	15,5	15,5	15,6	15,6
Весь ряд	$y=0,426t+8,4$	0,61	37,5	$2,5 \times 10^{-6}$	6,13	19,9	20,3	20,8	21,2
ВУ	$y=0,351t+11,8$	0,77	13,3	0,022	3,64	21,3	21,6	22,0	22,3
НУ	$y=0,347t+6,7$	0,56	5,13	0,086	3,64	16,0	16,4	16,7	17,1
Весь ряд	$y=22,5-(22,5-3,4)e^{-0,074t}$	0,7	59,2	$6,3 \times 10^{-8}$	-7,69	20,2	20,4	20,5	20,7

**Серия ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

ВУ	$y=22,5-(22,5-12,4)e^{-0,095t}$	0,57	6,69	0,061	-2,59	21,7	21,8	21,9	21,9
НУ	$y=15,8-(15,8-3,4)e^{-0,151t}$	0,83	24,0	0,0081	-4,90	15,6	15,6	15,6	15,7

Согласно анализу ретроспективных прогнозов наименьшими средними арифметическими погрешностями обладает линейная функция (3-11,5%). Недостатком логистической функции является ее низкая точность, коэффициент детерминации находится ниже 0,50.

При этом расхождения прогностических значений, полученных с помощью логистической и линейной функции, колеблются от 0 до 9,3%. Результаты для линейной функции несколько выше.

Логистическая функция предлагается для прогнозирования урожайности капусты (табл. 3), что обусловлено неадекватным отображением линейными трендами разных эмпирических уровней. В частности, прогнозы высоких уровней оказались ниже прогнозов по всем уровням ряда. Кроме того, линейные тренды не учитывают замедления процесса роста рассматриваемой характеристики. Тренд степенной функции для последовательности верхних уровней обладает низким коэффициентом детерминации.

Что касается ретроспективного прогноза, то и здесь средние значения аппроксимации для логистического тренда оказались наименьшими – 2,3-5,4%

Таблица 3 – Многоуровневые линейные и нелинейные тренды временного ряда урожайности капусты по данным Нижнеудинского района за 1996-2021 гг.

Уровень	Регрессионное выражение	R^2	F - критерий Фишера	α	t - статистики Стьюдента	Прогноз по годам, ц/га			
						2022	2023	2024	2025
Весь ряд	$y=173,4+5,816t$	0,84	56,34	$9,5 \times 10^{-8}$	7,51	330,4	336,2	342,0	347,9
ВУ	$y=201+4,81t$	0,83	17,72	0,00296	4,21	330,8	335,6	340,4	345,2
НУ	$y=151+6,23t$	0,88	26,55	0,00087	5,15	319,3	325,5	331,7	337,9
Весь ряд	$y=155,5t^{0,195}$	0,54	28,61	$1,7 \times 10^{-5}$	5,35	295,7	297,8	299,8	301,8
ВУ	$y=180,3t^{0,159}$	0,49	7,81	0,023	2,80	304,4	306,2	307,9	309,5
НУ	$y=152,5t^{0,173}$	0,51	8,34	0,020	2,89	269,3	271,0	272,6	274,2
Весь ряд	$y=316,5/(1+e^{-0,160t})$	0,82	114,3	$1,3 \times 10^{-10}$	-10,69	312,3	312,9	313,4	313,9
ВУ	$y=316,5/(1+e^{-0,209t})$	0,88	67,3	$3,6 \times 10^{-5}$	-8,20	315,4	315,6	315,8	315,9
НУ	$y=306/(1+e^{-0,172t})$	0,67	18,7	0,00254	-4,32	303,1	303,6	304,0	304,3

На основе выбранных трендов построены ряды разностей между фактическими данными и трендами последовательностей нижних уровней. По этим расчетным данным построены законы распределения вероятностей Пирсона III типа и определены вероятности потерь урожайности сельскохозяйственных культур (табл. 4).

В таблице 4 приведены статистические параметры вероятностных

распределений: среднее, коэффициент вариации C_v и асимметрии C_s . В соответствии с законом распределения определены вероятности двух наибольших потерь урожайности ячменя, капусты и пшеницы относительно тренда нижних и всех уровней. Исходя из полученных результатов, наиболее вероятные потери урожайности пшеницы могут составить 20,5 и 75,8% относительно плановых значений, ячменя - 27,1 и 65,9%, а капусты 27,8 и 28,8%.

Таблица 4 – Вероятностная оценка потерь урожайности сельскохозяйственных культур на основе закона распределения Пирсона III типа по данным Нижнеудинского района за 1996-2021 гг.

Культура	Среднее	C_v	C_s	Функция	Вероятность события	Потери урожайности относительно тренда нижних уровней, ц/га	Потери урожайности относительно тренда всего ряда, ц/га
Ячмень	2,83	0,95	-0,60	Линейная	0,0117	-4,4	-6,4
					0,142	-1,1	-4,1
Капуста	-10,3	-3,24	-0,42	Логистическая	0,0335	-76,7	-81
					0,0385	-74,3	-79,5
Пшеница	2,54	1,08	-0,22	Линейная	0,0248	-3,2	-7,5
					0,0337	-2,7	-3,7

Таким образом, многоуровневые динамико-стохастические модели позволяют с некоторой точностью прогнозировать урожайность сельскохозяйственных культур и определять вероятные потери биопродуктивности. Вместе с тем вероятность оценки событий как разности фактических величин и значений трендов последовательности нижних уровней зависит от выбранной модели динамики.

Выводы. Приведен алгоритм оценки динамики временного ряда и вероятных потерь при получении аграрной продукции на основе трендов, характеризующих разные уровни.

Предложенный алгоритм можно использовать для описания рядов, обладающих динамико-стохастическими свойствами, к которым относится урожайность сельскохозяйственных культур.

При возможности выбора выражения тренда из нескольких вариантов необходим анализ критериев качества модели и особенностей временного ряда с использованием ретроспективного прогноза.

Функция тренда сильно влияет на стохастическую оценку вероятных потерь урожайности сельскохозяйственной культуры. Приведенные примеры показывают возможность применения линейной и нелинейных функций при решении задачи прогнозирования и оценки потерь.

Список литературы

1. Барсукова, М.Н. Об оптимизационных моделях сельскохозяйственного

производства: классификация и применение / М.Н. Барсукова., А.Ю. Белякова, Я.М. Иванько // В сб.: Информационные и математические технологии в научных исследованиях. Труды XI Международной конференции. – Иркутск, 2006. – С. 49-57.

2. Барсукова, М.Н. Об одной модели оптимизации производства аграрной продукции в благоприятных и неблагоприятных внешних условиях / М.Н. Барсукова, Я.М. Иванько, С.А. Петрова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 3 (19). – С. 73-85.

3. Дружинин, И.П. Динамика многолетних колебаний речного стока / И.П. Дружинин, В.Р. Смага, А.Н. Шевнин. – М.: Наука, 1991. – 176 с.

4. Евдокимова, Н.Е. Прогнозирование урожайности зерновых культур: отечественный опыт и новые возможности / Н.Е. Евдокимова // Вестник Московского гуманитарно-экономического института. – 2020. – № 2. – С. 90-105.

5. Иванько, Я.М. Изменчивость климатических характеристик Восточной Сибири и аграрное производство / Я.М. Иванько // В сб.: Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. Матер. междунар. научно-практ. конф. – Иркутск, 2009. – С. 31-38.

6. Иванько, Я.М. Об одном алгоритме выделения аномальных уровней временного ряда для оценки рисков / Я.М. Иванько, С.А. Петрова // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2022. – № 42. – С. 48-57.

7. Математические и цифровые технологии оптимизации производства продовольственной продукции / Я.М. Иванько [и др.]. – Молодежный: Изд-во Иркутский ГАУ, 2021. – 220 с.

8. Машин, В.В. Сравнительный анализ методик прогнозирования в сельском хозяйстве / В.В. Машин, Б.И. Смагин // Наука и Образование. – 2019. – Т. 2. – № 4. – С. 74.

9. Минченко, Л.А. Актуальные тренды развития органического сельского хозяйства: от теории к практике / Л.А. Минченко // Вопросы устойчивого развития общества. – 2021. – № 3. – С. 354-359.

10. Путивская, Т.Б. Экологический тренд в экономическом развитии сельского хозяйства / Т.Б. Путивская, Е.А. Подсевакина // Островские чтения. – 2022. – № 1. – С. 119-123.

11. Рогачев, А.Ф. Формирование и анализ многолетних рядов урожайности зерновых для нейросетевого прогнозирования и обоснования агротехнологических мероприятий / А.Ф. Рогачев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 1 (61). – С. 347-356.

12. Рождественский, А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик / А.В. Рождественский. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 270 с.

13. Светлов, Н.М. Влияние изменения климата на размещение отраслей сельского хозяйства России / Н.М. Светлов, С.О. Сиптиц, И.А. Романенко, Н.Е. Евдокимова // Проблемы прогнозирования. – 2019. – № 4 (175). – С. 59-74.

14. Тренды научно-технического развития и повышения конкурентоспособности сельского хозяйства России / Г.В. Федотова [и др.] // Вестник Академии знаний. – 2019. – № 32 (3). – С. 251-255.

15. Численный метод построения моделей для прогнозирования экономических показателей сельского хозяйства / Б.И. Бийбосунов [и др.] // Дневник науки. – 2020. – № 2 (38). – 15 с.

16. Шеламова, Н.А. Влияние изменения климата на сельское хозяйство и водные ресурсы / Н.А. Шеламова, К.Ю. Попова // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2018. – № 2 (35). – С. 82-89.

17. Юкиш, В.Ф. Прогнозирование показателей сельского и лесного хозяйства Российской Федерации / В.Ф. Юкиш, Т.М. Прохорова, А.А. Романова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2018. – № 2. – С. 97-101.

18. Buzina, T.S. Method of statistical tests in solving problems of food production management / T.S. Buzina, A.Yu. Belyakova, Ya.M. Ivanyo // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. – Krasnoyarsk, 2021, pp. 32051.

References

1. Barsukova, M.N. et al. Ob optimizatsionnykh modelyakh sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: klassifikatsiya i primeneniye [On optimization models of agricultural production: classification and application]. Irkutsk, 2006, pp. 49-57.

2. Barsukova, M.N. et al. Ob odnoy modeli optimizatsii proizvodstva agrarnoy produktsii v blagopriyatnykh i neblagopriyatnykh vneshnikh usloviyakh [On one model of optimizing the production of agricultural products in favorable and unfavorable external conditions]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii, 2020, no. 3 (19), pp. 73-85.

3. Druzhinin, I.P. et al. Dinamika mnogoletnikh kolebaniy rechnogo stoka [Dynamics of long-term fluctuations of river runoff]. Moscow: Nauka, 1991, 176 p.

4. Yevdokimova, N.E. Prognozirovaniye urozhaynosti zemovykh kul'tur: otechestvennyy opyt i novyye vozmozhnosti [Forecasting the yield of grain crops: domestic experience and new opportunities]. Vestnik Moskovskogo gumanitarno-ekonomicheskogo instituta, 2020, no. 2, pp. 90-105.

5. Ivanyo, Ya.M. Izmenchivost' klimaticheskikh kharakteristik Vostochnoy Sibiri i agrarnoye proizvodstvo [Variability of climatic characteristics of Eastern Siberia and agricultural production]. Irkutsk, 2009, pp. 31-38.

6. Ivanyo, Ya.M., Petrova, S.A. Ob odnom algoritme vydeleniya anomal'nykh urovney vremennogo ryada dlya otsenki riskov [On one algorithm for selecting anomalous levels of a time series for risk assessment]. Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki, 2022, no. 42, pp. 48-57.

7. Ivanyo, Ya.M. et al. Matematicheskiye i tsifrovyye tekhnologii optimizatsii proizvodstva prodovol'stvennoy produktsii [Mathematical and digital technologies for optimizing food production]. Molozhezhnyy, 2021, 220 p.

8. Mashin, V.V., Smagin, B.I. Sravnitel'nyy analiz metodik prognozirovaniya v sel'skom khozyaystve [Comparative analysis of forecasting methods in agriculture]. Nauka i Obrazovanie, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 74.

9. Minchenko, L.A. Aktual'nyye trendy razvitiya organicheskogo sel'skogo khozyaystva: ot teorii k praktike [Actual trends in the development of organic agriculture: from theory to practice]. Voprosy ustojchivogo razvitiya obshchestva, 2021, no. 3, pp. 354-359.

10. Putivskaya, T.B., Podsevatkina, Ye.A. Ekologicheskyy trend v ekonomicheskom razvitiy sel'skogo khozyaystva [Ecological trend in the economic development of agriculture]. Ostrovskie chteniya, 2022, no. 1, pp. 119-123.

11. Rogachev, A.F. Formirovaniye i analiz mnogoletnikh ryadov urozhaynosti zemovykh dlya neyrosetevogo prognozirovaniya i obosnovaniya agrotekhnologicheskikh meropriyatiy [Formation and analysis of long-term series of grain yields for neural network forecasting and substantiation of agrotechnological measures]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie, 2021, no. 1 (61), pp. 347-356.

12. Rozhdestvenskiy, A.V. Otsenka tochnosti krivyykh raspredeleniya gidrologicheskikh kharakteristik. [Estimation of the accuracy of distribution curves of hydrological characteristics]. L.: Gidrometeoizdat, 1977, 270 p.

13. Svetlov, N.M. et al. Vliyaniye izmeneniya klimata na razmeshcheniye otrasley sel'skogo khozyaystva Rossii [Influence of climate change on the distribution of agricultural industries in Russia]. Problemy prognozirovaniya, 2019, no. 4 (175), pp. 59-74.

14. Fedotova, G.V. et al. Trendy nauchno-tekhnicheskogo razvitiya i povysheniya konkurentosposobnosti sel'skogo khozyaystva Rossii [Trends in scientific and technological

development and increasing the competitiveness of Russian agriculture]. Vestnik Akademii znaniy, 2019, no. 32 (3), pp. 251-255.

15. Biybosunov, B.I. et al. Chislennyy metod postroyeniya modeley dlya prognozirovaniya ekonomicheskikh pokazateley sel'skogo khozyaystva [Numerical method of constructing models for predicting the economic indicators of agriculture]. Dnevnik nauki, 2020, no. 2 (38), 15 p.

16. Shelamova, N.A., Popova, K.Yu. Vliyaniye izmeneniya klimata na sel'skoye khozyaystvo i vodnyye resursy [Influence of climate change on agriculture and water resources]. Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom hozyajstve, 2018, no. 2 (35), pp. 82-89.

17. Yukish, V.F. et al. Prognozirovaniye pokazateley sel'skogo i lesnogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii [Forecasting indicators of agriculture and forestry in the Russian Federation]. Ekonomika i biznes: teoriya i praktika, 2018, no. 2, pp. 97-101.

Дата поступления в редакцию 24.03.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторах

Иваньо Ярослав Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский район, п. Молодежный, тел. 8(3952)237491, e-mail: iasa_econ@rambler.ru).

Цыренжапова Валентина Вячеславовна – аспирант кафедры информатики и математического моделирования, институт экономики, управления и прикладной информатики. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный, тел. 8(950)1411589, e-mail: tsyrenzhapova_v@mail.ru).

Information about authors

Ivanyo Yaroslav M. – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Informatics and Mathematical Modeling of the Institute of Economics, Management and Applied Informatics. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. 8(3952)237491, e-mail: iasa_econ@rambler.ru).

Tsyrenzhapova Valentina V. – PhD-student of the Department of Informatics and Mathematical Modeling, Institute of Economics, Management and Applied Informatics. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. 8(950)1411589, e-mail: tsyrenzhapova_v@mail.ru).

УДК 631.173

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТУРБОМАШИН ПОВЫШЕННОГО РЕСУРСА

О.В. Репецкий

ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

Существует множество численных методов для решения задач статического, динамического и ресурсного состояния элементов турбомашин. Среди них можно назвать метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод конечных элементов (МКЭ) и

др. Метод конечных разностей требует применения обобщенных координат, что усложняет уравнения; метод граничных элементов приводит к системе уравнений, содержащей значения искомых функций только на границе рассматриваемой области, а не внутри, что не позволяет выполнить анализ сложного объемного НДС и проанализировать ситуацию в зоне локальных концентраций. Среди всех известных численных методов в данной работе применяется МКЭ, реализованный в многочисленных программах инженерного анализа. К его достоинствам относятся: возможность учета сложной геометрии; легкость задания различных граничных условий; простота учета нескольких материалов в одной конструкции; возможность уточнения решения в сложных местах конструкции путем сгущения сетки конечных элементов в местах концентрации напряжений; легкая программируемость; возможность стыковки с существующими пакетами программ CAD/CAE систем и т.д.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию энергетических, транспортных, нефте-газо-химических и др. видов турбомашин. Целью работы является разработка и развитие математических моделей, численно-экспериментальных методов и программного обеспечения для компьютерного моделирования геометрически сложных и высоконагруженных деталей роторных систем, определяющих на 90% эксплуатационный ресурс всей турбины. Решение данной проблемы, даже в первом приближении, позволяет еще на стадии проектирования конструкций спрогнозировать ресурс машины при эксплуатационных условиях нагружения.

Другой задачей данной научной работы является разработка математических моделей для управления и оптимизации вибрационного спектра вышеназванных механических систем для повышения ресурса при проектировании создаваемых турбин или продления срока службы турбин, находящихся в эксплуатации. Разработаны новые математические модели для динамического нагружения рабочих лопаток, анализа чувствительности вибрационных характеристик к изменению геометрии и оптимизации ресурсных характеристик путем введения преднамеренной расстройки параметров для наиболее нагруженных и ответственных деталей турбин – рабочих лопаток роторных систем. Математическое моделирование данной комплексной научной проблемы на основе созданных и уже известных математических моделей, численных методов и комплексов программ позволяет оперативно и с минимальными финансовыми затратами рассмотреть десятки и сотни вариантов конструкции и выбрать оптимальный вариант для данной задачи. Этот вариант может использоваться при проектировании и доводке новых механических систем или продлении ресурса уже эксплуатируемых турбин.

Ключевые слова: рабочая лопатка, турбомашина, метод конечных элементов, математическое моделирование.

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING BASED ON THE FINITE ELEMENT METHOD TO CREATE OF TURBOMACHINES OF INCREASED RESOURCE

Repetckii O.V.

FSBEI HE Irkutsk SAU
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

There are many numerical methods for solving problems of the static, dynamic and resource state of turbomachine elements. Among them are the finite difference method, the boundary element method, the finite element method (FEM), etc. The finite difference method requires the use of generalized coordinates, which complicates the equations; The boundary element method leads to a system of equations containing the values of the desired functions only at the boundary of the area

under consideration, and not inside, which does not allow one to perform an analysis of a complex volumetric SSS and analyze the situation in the zone of local concentrations. Among all known numerical methods, in this work, we use the FEM implemented in numerous engineering analysis programs. Its advantages include: the ability to take into account complex geometry; ease of setting various boundary conditions; ease of accounting for several materials in one design; the possibility of refining the solution in difficult places of the structure by thickening the mesh of finite elements in places of stress concentration; easy programmability; the possibility of docking with existing software packages of CAD / CAE systems, etc.

This work is devoted to mathematical modeling of power, transport, oil and gas chemical and other types of turbomachines. The aim of the work is the development and development of mathematical models, numerical-experimental methods and software for computer simulation of geometrically complex and highly loaded parts of rotor systems, which determine 90% of the operational life of the entire turbine. The solution of this problem, even in the first approximation, makes it possible to predict the life of the machine under operating loading conditions even at the stage of designing structures.

Another objective of this scientific work is the development of mathematical models for controlling and optimizing the vibration spectrum of the above-mentioned mechanical systems in order to increase the resource in the design of turbines being created or to extend the life of turbines in operation. New mathematical models have been developed for dynamic loading of rotor blades, analysis of the sensitivity of vibration characteristics to changes in geometry, and optimization of resource characteristics by introducing a deliberate detuning of parameters for the most loaded and critical parts of turbines - rotor system rotor blades. Mathematical modeling of this complex scientific problem based on the created and already known mathematical models, numerical methods and software packages allows you to quickly and with minimal financial costs consider tens and hundreds of design options and choose the best option for this problem. This option can be used when designing and fine-tuning new mechanical systems or extending the life of already operating turbines.

Keywords: rotor blade, turbomachine, finite element method, mathematical modeling.

Введение. Решение выше изложенных задач без математического моделирования и компьютерного анализа путем натурального эксперимента – крайне трудоемкая и дорогостоящая процедура. Например, стоимость изготовления одной современной рабочей лопатки может превышать стоимость автомобиля среднего класса, а экспериментальные стенды – это сложнейшие механические комплексы, требующие значительных финансовых затрат на их создание и работу [1, 8].

Для математического моделирования рабочих лопаток и других высоконагруженных элементов энергетических и транспортных турбомашин с целью анализа их ресурсных характеристик необходимо решить следующий комплекс взаимосвязанных задач [1-4, 5, 8, 9, 10]:

- 1) разработка или развитие математических моделей, численных методов и программного обеспечения с учетом эксплуатационных нагрузок при экспериментальной верификации адекватности созданных инструментов анализа [1, 10];
- 2) компьютерный анализ статических, динамических и ресурсных характеристик;
- 3) разработка рекомендаций по повышению долговечности и эксплуатационной надежности.

Общая диаграмма для решения поставленных задач [8] имеет вид (рис. 1).

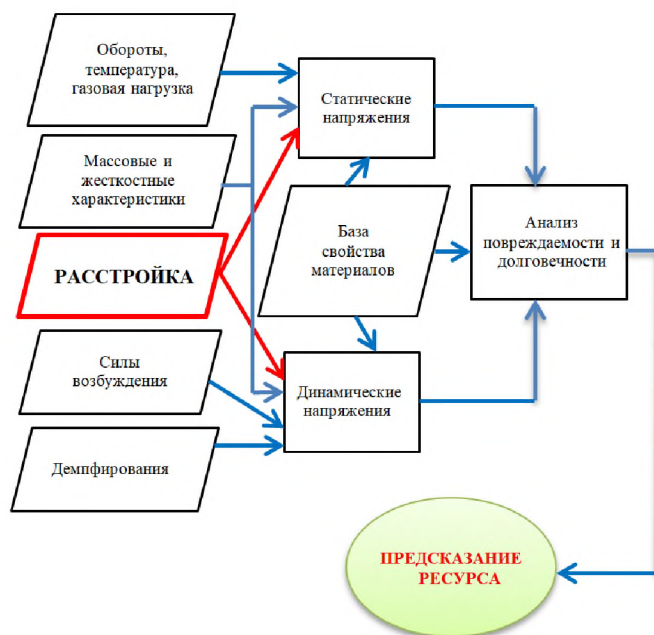


Рисунок 1 – Общая диаграмма для решения поставленных задач

Математическое моделирование. Статическое напряженно-деформированное состояние (статические напряжения) определяется в данной работе по формуле:

$$([K_E] + [K_G] + [K_R]) \cdot \{\delta\} = \{F_\Omega\} + \{F_T\} + \{F_G\}$$

Собственные частоты и формы колебаний вычисляются:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + ([K_E] + [K_G] + [K_R])\{\delta\} = 0$$

где $\{\delta\}$ – вектор перемещений, $[K_E]$ и $[M]$ – матрицы упругой жесткости и массы, соответственно, $[K_G]$ – матрица геометрической жесткости, зависящая от скорости и температуры, $[K_R]$ – дополнительная матрица жесткости, возникающая в результате вращения, $\{F_\Omega\}$, $\{F_T\}$, $\{F_G\}$ – векторы, соответствующие силам от вращения, температуры и давления газа соответственно, $[C]$ – матрица демпфирования.

В настоящее время для решения задач статического НДС и собственных колебаний широко применяются известные программные комплексы CAD/CAE, например ANSYS – коммерческая комплексная программа, которая представляет собой профессиональный инструмент для расчета статических и динамических характеристик конструкции, поэтому автор решает данные задачи с помощью комплексной программы ANSYS. Для расчета статического напряженно-деформированного состояния использован блок ANSYS STATIC, для решения задачи собственных частот и форм колебаний – блок ANSYS MODAL.

Анализ собственных частот и форм колебаний важен для построения резонансной диаграммы и ухода от опасных резонансных режимов работы, особенно для первых, наиболее опасных форм колебаний. В данной работе представлена резонансная диаграмма лопатки академического рабочего колеса [10] в диапазоне 0-100 оборотов в секунду для первых шести форм колебаний (рис. 2).

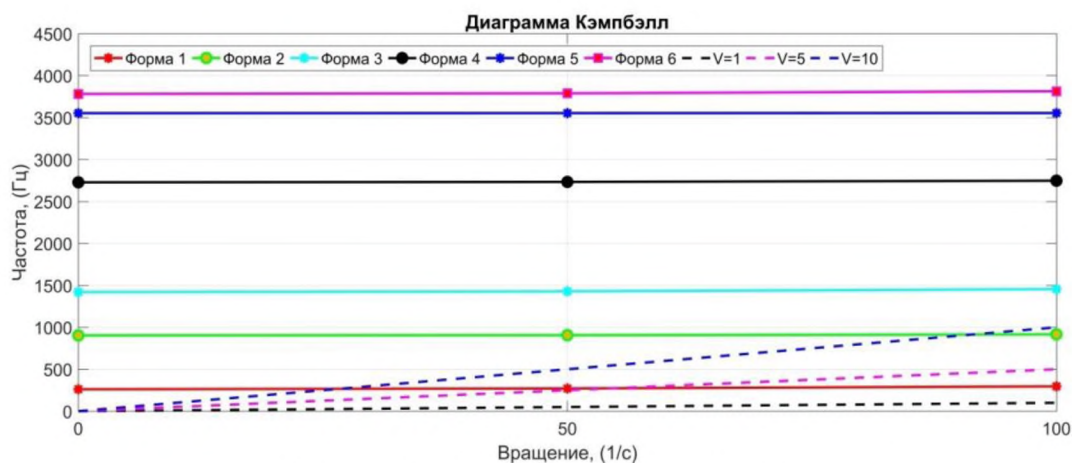


Рисунок 2 – Диаграмма Кэмпбэлла

Для отстройки от резонансов важно понимать расположение зон чувствительности, которые позволяют целенаправленно воздействовать на конструкцию для изменения и оптимизации вибрационного спектра. С этой целью предложена математическая модель, метод решения и пакет программ для выполнения и исследования зон чувствительности, которые помогают отстроиться от опасных резонансов.

Настоящий алгоритм реализован в виде оригинального авторского пакета программ BLISK_SENLIFE, которые зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615564 и № 2021612208).

Расчет вынужденных колебаний и динамических напряжений имеет вид:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = F(t)$$

где $F(t)$ – переменная во времени нагрузка от парциальности подвода пара или газа. В настоящей работе создана математическая модель возбуждения, представленная на рисунке 3. Предложено учитывать возбуждение лопатки через сопловое нагружение.

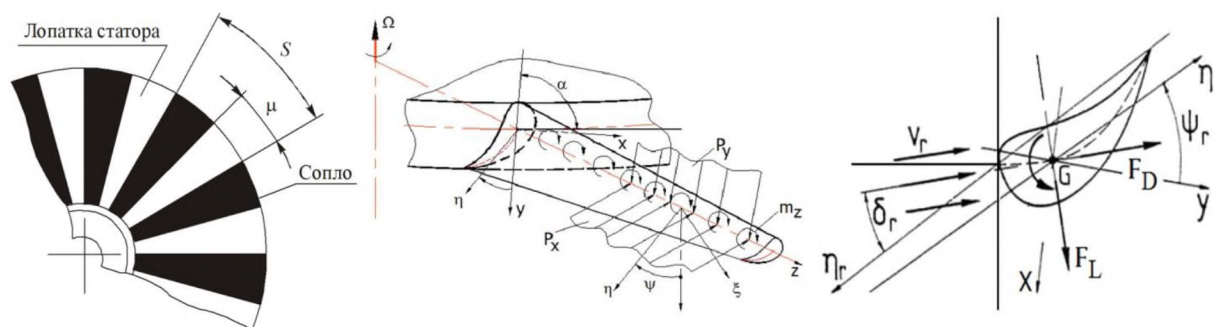


Рисунок 3 – Математическая модель лопатки под воздействием газодинамических сил

После расчета вынужденных колебаний и динамических напряжений от времени можно использовать алгоритмы схематизации напряжений, например, “метод дождя” и гипотезы повреждаемости (“Пальмгрен-Майнер” или др.), чтобы получить результаты многоциклового усталости и предсказать ресурс конструкции [5, 8].

В настоящем исследовании разработаны и применены, как оригинальные математические модели, методики и комплексы программ (BLISK_SENLIFE, BLADIS+ и др.), так и известные программные системы, такие как ANSYS.

Для экспериментального подтверждения адекватности разработанных лично автором математических моделей, методов решения и созданных программ выполнено оригинальное авторское экспериментальное исследование [10] с помощью системы измерения (лазерный сканирующий виброметр) в Бранденбургском техническом университете (БТУ).

Результаты расчета. В дальнейшем на примере академического рабочего колеса проведен численный анализ статических, динамических и ресурсных характеристик. Выявлены новые закономерности формирования изолиний чувствительности (рис. 4), получено хорошее согласование численных и экспериментальных данных, что позволяет распространить разработанные математические модели, методики и комплексы программ на исследование введения влияния преднамеренной расстройки как академических, так и реальных турбин. Анализ распределения функций чувствительности демонстрирует, что изолинии чувствительности свободных колебаний от дополнительных масс концентрируются на узловых линиях форм колебаний и приводят, как правило, к увеличению частоты (красные точки). А зоны с дополнительными массами, уменьшающими колебания, находятся за пределами узловых линий.

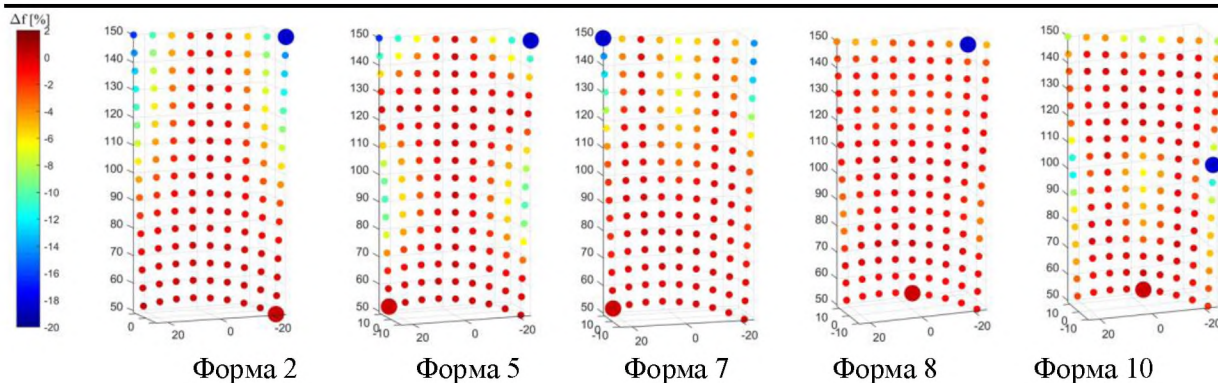


Рисунок 4 - Анализ чувствительности лопаток академического рабочего колеса

Для того, чтобы проанализировать влияния различных геометрических и жесткостных параметров и разработать рекомендации по увеличению ресурса турбин, проведены комплексные исследования долговечности рабочего колеса без и с учетом преднамеренной расстройки по оригинальным блочным моделям, предложенным в работах [9, 10]. Основные результаты исследований долговечности академического колеса с учетом преднамеренной расстройки параметров, вносимой в систему путем изменения геометрических и механических характеристик лопаток показаны в таблице 1 и на рисунке 5.

Таблица 1 – Результаты расчета долговечности с различными вариантами оптимизированных блочных моделей

Вариант	Случай геометрического и механического изменения	Номер блочной модели	Долговечность (в циклах)	$\Delta \bar{N}$ (%)
1	R5-R1	2	$1,7065 \cdot 10^6$	+19,4
2	R5-R3	2	$1,4577 \cdot 10^6$	+2,0
3	R5-R7	3	$1,4205 \cdot 10^6$	-0,6
4	$H_1 = 1,1 \cdot H_0$	1	$1,4327 \cdot 10^6$	+0,3
5	$H_2 = 0,9 \cdot H_0$	2	$1,5601 \cdot 10^6$	+9,2
6	Среза ($t=30\text{мм}$, $\alpha = 8^\circ$)	1	$1,4859 \cdot 10^6$	+4,0
7	Среза ($t=15\text{мм}$, $\alpha = 60^\circ$)	2	$1,3680 \cdot 10^6$	-4,2
8	4 отверстия с левой стороны пера	1	$1,4859 \cdot 10^6$	+4,0
9	4 отверстия с правой стороны пера	3	$1,5528 \cdot 10^6$	+8,7
10	Материал: Сталь - Титан	1	$1,6722 \cdot 10^6$	+17,0
11	Материал: Сталь - Титан	2	$1,6611 \cdot 10^6$	+16,2 7
12	Материал: Сталь – Титан	3	$1,5552 \cdot 10^6$	+8,86

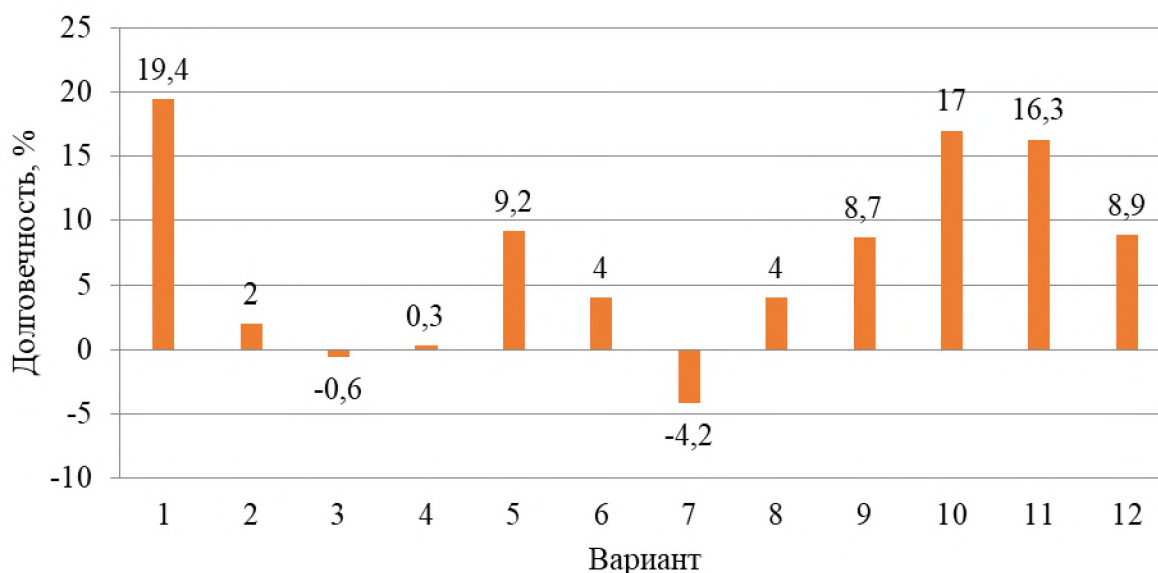


Рисунок 5 – График долговечности колеса при разных блочных моделях

На основе результатов расчета долговечности академического колеса с преднамеренной расстройкой выявлен оптимальный вид расстройки с изменением радиуса закругления нижнего края лопатки для $R=1$ мм (вторая блочная модель с 3-мя лопатками в блоке). Долговечность академического колеса с преднамеренной расстройкой в этом случае увеличивается на 19,4%.

Для создания конструкций с повышенной долговечностью, впервые предложена, математическая модель, численная методика и авторская программа для оптимального введения преднамеренной расстройки, реализованной в виде пакета программ INTENTIONAL MISTUNING [5, 10].

Этот блок позволяет выявить оптимальный вариант влияния преднамеренной расстройки на долговечность рабочего колеса, вносимой в систему путем изменения механических и геометрических характеристик лопаток. По результатам исследования в данной работе вариант оптимизации преднамеренной расстройки по изменению толщины лопатки дает максимальное увеличение долговечности академического колеса в сравнении с исходным колесом на 30,6%, показан в таблице 2 и на рисунке 6.

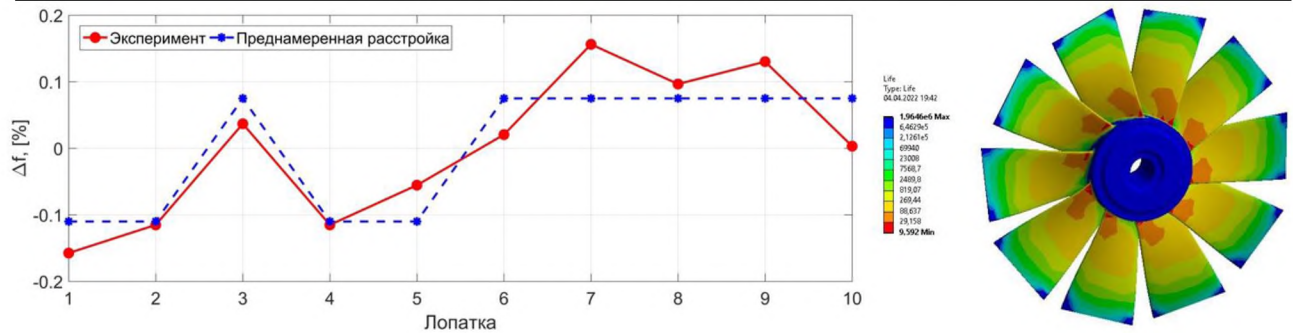


Рисунок 6 – Оптимизация долговечности от введения преднамеренной расстройки

Таблица 2 – Результаты оптимизации долговечности по геометрическим изменениям

Вариант	Случай геометрического изменения	Долговечность (в циклах)	$\Delta \bar{N}$ (%)
0	Без изменения	$1,4286 \cdot 10^6$	0
1	Толщина лопатки (-0,1% и +0,07%)	$1,8657 \cdot 10^6$	+30,6
2	Радиус перехода пера лопатки в обод диска (-0,18 мм и +0,16 мм)	$1,8215 \cdot 10^6$	+27,5
3	Скос верхней кромки лопатки ($t=7$ мм, $\alpha=8^\circ$ и $t=3$ мм, $\alpha=60^\circ$)	$1,7780 \cdot 10^6$	+24,5

Выполненная верификация математических моделей, методик и программ на академическом рабочем колесе, позволили автору распространить их на реальную конструкции турбины фирмы Rolls-Royce. Расчет чувствительности частот колебаний реального рабочего колеса выполнен с учетом изменения массы, а результат анализа чувствительности представлен на рисунке 7.

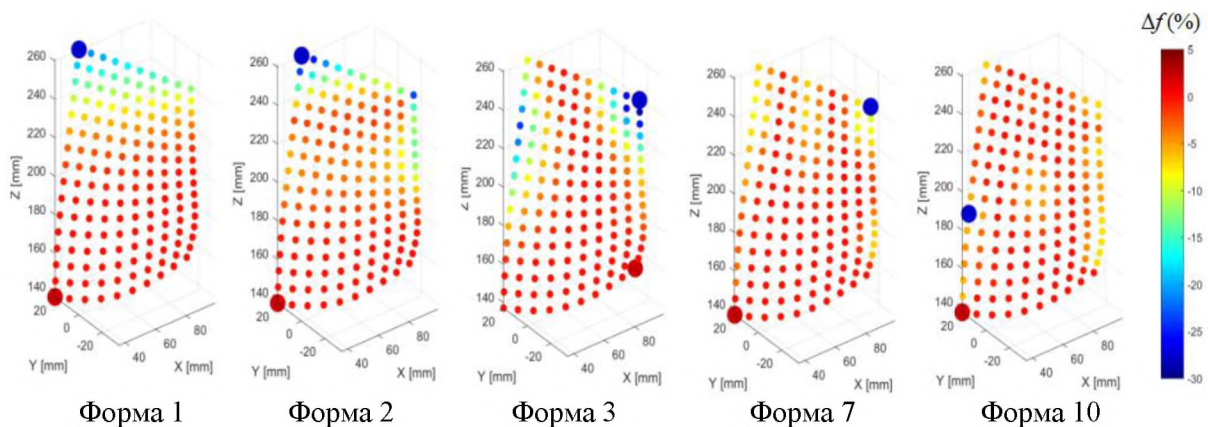


Рисунок 7 – Расчет анализа чувствительности от массы лопатки Rolls – Royce

Исследование чувствительности реального рабочего колеса позволяет определить области самого большого влияния изменения массы лопаток на

собственные частоты колебаний при резонансах. Видно, что минимальная чувствительность частоты к изменению массы лопатки находится на периферии пера лопатки в зоне входной кромки, а максимальная чувствительность частоты находится в корне лопатки.

Проведены расчеты собственных частот колебаний и долговечности колеса с расстройкой параметров, вызванной разной массой лопаток (2,11 и 5,0 г), присоединенной на периферии пера лопаток в сравнении с экспериментом, выполненным в БТУ (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты расчета долговечности с расстройкой параметров (в циклах)

Форма колебаний	Тип 1 (2,11 г)		Тип 2 (5,0 г)	
	Собственные частоты (Гц)			
	МКЭ	Эксп.	МКЭ	Эксп.
1	387,55	399,44	353,24	354,71
2	1141,2	1247,8	983,70	1001,9
3	1735,9	1697,2	1678,8	1487,3
7	4230,2	4380,5	4163,1	3466,5
10	6237,0	6380,0	6189,3	6046,9
Долговечность	1,6694·10 ⁶		1,3532·10 ⁶	

Заключение. Использование разработанной комплексной методики математического моделирования, объединяющей большое количество оригинальных и известных математических моделей, методов и комплексов программ, а также полученных результатов настоящей работы позволяет повысить ресурсные характеристики турбин при создании новых конструкций на стадии проектирования и доводки или проанализировать их эксплуатационную надежность с возможностью продления ресурса.

На следующем этапе исследований будет рассматриваться влияние расстройки **аэродинамических** сил за счет преднамеренной расстройки геометрических параметров направляющих лопаток статора и анализ долговечности рабочих лопаток турбомашин [6, 7].

Список литературы

1. Еловенко, Д.А. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, О.В. Репецкий, Д.В. Татаринцов // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD (Байкальский государственный университет экономики и права). – 2010. – № 1. – С. 11-19.
2. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
3. Костюк, А.Г. Динамика и прочность турбомашин / А.Г. Костюк – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
4. Мяченков, В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / В.И. Мяченков – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
5. Нгуен, В.В. Исследование ресурсных характеристик механических систем на примере реального рабочего колеса турбомашин с учетом чувствительности / В.В.

Нгуен // Сб. научных тезисов очно-заочной научно-практ. конф., посвящ. Дню Российской науки. Иркутск: Изд-во Иркутский ГАУ. – 2023. – Т. 1. – С. 53-54.

6. Репецкий, О.В. Математическое моделирование видов преднамеренной расстройки осевых и радиальных рабочих колес турбомашин / О.В. Репецкий // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. Матер. XI Междунар. научно-практ. конф. Иркутск, – 2022. – С. 318-327.

7. Репецкий, О.В. Цифровые и математические технологии в моделировании преднамеренной аэродинамической расстройки турбомашин / О.В. Репецкий // Цифровые технологии в науке, образовании и производстве. – 2022 – С. 52-53.

8. Хайман, Б. Мехатроника: компоненты, методы, примеры / Б. Хайман, В. Гердт, К. Попп, О.В. Репецкий // Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2010. – 602 с.

9. Beirow, B. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning / B. Beirow, A. Kühhorn, F. Figashevsky, A. Bornhorn, O. Repetckii // Proceed. of ASME Turbo Expo. – 2019. – № 1 (141). – GT2018-76584. – 8 p.

10. Repetckii, O.V. B. Sensitivity analysis regarding the impact of intentional mistuning on blisk vibrations / O.V. Repetckii, V.V. Nguyen, B. Beirow // Proceedings of the International Conference on Wave Mechanics and Vibrations (WMVC 2022). – 2022. – P. 408-415.

References

1. Yelovenko, D.A. et all. Eksperimental'noye issledovaniye modeli avtoklava dlya gidrotermal'nogo sinteza mineralov [Experimental study of an autoclave model for hydrothermal synthesis of minerals]. Vestnik Baykal'skogo soyuza stipendiatov DAAD (Baykal'skiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i prava), 2010, no. 1, pp. 11-19.

2. Kogayev, V.P. et all. Raschety detaley mashin i konstruktsiy na prochnost' i dolgovechnost' [Calculations of machine parts and structures for strength and durability]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 224 p.

3. Kostyuk, A.G. Dinamika i prochnost' turbomashin [Dynamics and strength of turbomachines]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007, 476 p.

4. Myachenkov, V.I. Raschety mashinostroitel'nykh konstruktsiy metodom konechnykh elementov [Calculations of machine-building structures by the finite element method]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 520 p.

5. Nguyen, V.V. Issledovaniye resursnykh kharakteristik mekhanicheskikh sistem na primere real'nogo rabocheho koleasa turbomashiny s uchetom chuvstvitel'nosti [Study of resource characteristics of mechanical systems on the example of a real impeller of a turbomachine, taking into account sensitivity]. Irkutsk, 2023, vol. 1, pp. 53-54.

6. Repetskiy, O.V. Matematicheskoye modelirovaniye vidov prednamerennoy rasstroyki osevykh i radial'nykh rabochikh koleas turbomashin [Mathematical modeling of types of intentional detuning of axial and radial impellers of turbomachines]. Irkutsk, 2022, pp. 318-327.

7. Repetskiy, O.V. Tsifrovyye i matematicheskiye tekhnologii v modelirovanii prednamerennoy aerodinamicheskoy rasstroyki turbomashin [Digital and mathematical technologies in the simulation of deliberate aerodynamic detuning of turbomachines]. Tsifrovyye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve. 2022, pp. 52-53.

8. Khayman, B. et all. Mekhatronika: komponenty, metody, primery [Mechatronics: components, methods, examples]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2010, 602 p.

Дата поступления в редакцию 15.03.2023, дата принятия к изданию 29.03.2023.

Сведения об авторе

Репецкий Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, проректор по международным связям. ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ (664038, Россия, Иркутская обл.,

Иркутский р-он, п. Молодежный, тел. +7 3952 237438, e-mail: repetckii@igsha.ru).

Information about author

Repetckii Oleg V. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for international relations. FSBEI HE Irkutsk SAU (Molodezhny, Irkutsk distrikt, Irkutsk region, Russia, 664038, tel. +73952237438, e-mail: repetckii@igsha.ru).

Требования
к статьям, публикуемым в электронном научно-практическом журнале
“Актуальные вопросы аграрной науки”

Условия опубликования статьи

1. Представленная для публикации статья должна быть актуальной, обладать новизной, содержать постановку задач (проблем), описание основных результатов исследования, полученных автором, выводы.
2. Соответствовать правилам оформления.
3. Автор может опубликовать одну статью в полугодие и два раза в год в соавторстве.

Правила оформления статьи

1. Статья направляется в редакцию журнала по адресу: 664038, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, редакция научно-практических журналов, зам. главного редактора, ауд. 229, e-mail: bugaev@mail.ru), тел. 8(3952)237491, 89500904493.
2. Статья представляется в бумажном и электронном виде в формате Microsoft Word. Бумажный вариант должен полностью соответствовать электронному. При наборе статьи необходимо учитывать следующее: форматирование по ширине; поля: справа и слева – по 23 мм, остальные – 20 мм, абзацный отступ – 10 мм.
3. Текст статьи должен быть тщательно вычитан и подписан автором, который несет ответственность за научно-теоретический уровень публикуемого материала. 4. Нумерация страниц обязательна.

Структура статьи

1. УДК размещается в левом верхнем углу: полужирный шрифт, размер – 12 пт.
2. Название статьи (ПРОПИСНЫМИ БУКВАМИ), полужирный шрифт, 14 кегль, межстрочный интервал – 1.0.
3. И.о. фамилия автора, полужирный шрифт, 12 кегль.
4. Название организации, кафедры, 12 кегль, межстрочный интервал – 1.0.
5. Аннотация статьи должна отражать основные положения работы и содержать от 200 до 250 слов (шрифт – Times New Roman, размер – 12 пт, интервал – 1.0).
6. После аннотации располагаются ключевые слова (шрифт – Times New Roman, курсив, размер – 12 пт.).
7. Далее: пункты 1, 2, 3, 4, 5, 6 дублируются на английском языке.
8. Основной текст статьи – шрифт Times New Roman, размер – 14 пт., межстрочный интервал – 1.0 пт.
9. В конце статьи размещается список литературы (по алфавиту) на русском языке, оформленный в соответствии с ГОСТ 7.1 - 2003.
10. Далее – транслитерация всего списка литературы.
11. Ссылки на литературу приводятся в тексте в квадратных скобках.
12. Благодарность(и) или указание(я) на какие средства выполнены исследования, приводятся в конце основного текста после выводов (шрифт Times New Roman, 12 пт.).
13. Оформление графиков и таблиц согласно стандарту (ГОСТ 7.1 - 2003).
14. Набор формул осуществляется в MicrosoftEquation в версии не ниже 3.0.
15. Сведения об авторе(ах): фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, место работы (место учебы или соискательство), контактные телефоны, e-mail, почтовый индекс и адрес учреждения.

Сопроводительные документы к статье

1. Заявление от имени автора (ров) на имя главного редактора научно-практического

журнала “Актуальные вопросы аграрной науки”, внутренняя и внешняя рецензии на статью. Сопроводительное письмо от организации, в которой работает автор (ы).

2. Для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук необходима рекомендация, подписанная лицом, имеющим ученую степень и заверенная печатью учреждения. В рекомендации отражается актуальность раскрываемой проблемы, оценивается научный уровень представленного материала и делаются выводы о возможности опубликования статьи в научно-практическом журнале “Актуальные вопросы аграрной науки”.

Регистрация статей

1. Поступившая статья регистрируется в общий список по дате поступления.
2. Автор(ы) извещаются по e-mail или по контактному телефону о публикации статьи(ей) в соответствующем выпуске.
3. Зам. главного редактора в течение 7 дней уведомляет автора(ов) о получении статьи.

Порядок рецензирования статей

1. Научные статьи, поступившие в редакцию, проходят рецензирование.
2. Формы рецензирования статей:
 - внутренняя (рецензирование рукописей статей членами редакционной коллегии);
 - внешняя (направление на рецензирование рукописей статей ведущим специалистам в соответствующей отрасли).
3. Зам. главного редактора определяет соответствие статьи профилю журнала, требованиям к оформлению и направляет ее на рецензирование специалисту (доктору или кандидату наук), имеющему наиболее близкую к теме статьи научную специализацию.
4. Сроки рецензирования в каждом отдельном случае определяются зам. главного редактора с учетом создания условий для максимально оперативной публикации статьи.
5. В рецензии должны быть освещены следующие вопросы:
 - соответствует ли содержание статьи заявленной в названии теме;
 - насколько статья соответствует современным достижениям научно-теоретические мысли;
 - доступна ли статья читателям, на которых она рассчитана с точки зрения языка, стиля, расположения материала, наглядности таблиц, диаграмм, рисунков и т.д.;
 - целесообразна ли публикация статьи с учетом ранее выпущенной по данному вопросу научной литературы;
 - в чем конкретно заключаются положительные стороны, а также недостатки; какие исправления и дополнения должны быть внесены автором;
 - вывод о возможности опубликования данной рукописи в журнале: “рекомендуется”, “рекомендуется с учетом исправления отмеченных рецензентом недостатков” или “не рекомендуется”.
6. Рецензии заверяются в порядке, установленном в учреждении, где работает рецензент.
7. В случае отклонения статьи от публикации редакция направляет автору мотивированный отказ.
8. Статья, не рекомендованная рецензентом к публикации, к повторному рассмотрению не принимается. Текст отрицательной рецензии направляется автору по электронной почте, факсом или обычной почтой.
9. Наличие положительной рецензии не является достаточным основанием для публикации статьи. Окончательное решение о целесообразности публикации принимается редакционной коллегией.
10. После принятия редколлегией решения о допуске статьи к публикации зам. главного редактора информирует об этом автора и указывает сроки публикации.

11. Оригиналы рецензий хранятся в редакции журнала.

Порядок рассмотрения статей

1. Представляя статью для публикации, автор тем самым выражает согласие на размещение полного ее текста в сети Интернет на официальных сайтах научной электронной библиотеки (www.elibrary.ru) и научно-практического журнала “Актуальные вопросы аграрной науки”.

2. Статьи принимаются по установленному графику:

- в № 1 (март) – до 1 января текущего года;
- в № 2 (июнь) – до 1 апреля текущего года;
- в № 3 (сентябрь) – до 1 июня текущего года;
- в № 4 (декабрь) – до 1 сентября текущего года.

В исключительных случаях, по согласованию с редакцией, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, не более, чем на три недели.

3. Поступившие статьи рассматриваются редакционной коллегией в течение месяца.

4. Редакционная коллегия правомочна отправить статью на дополнительное рецензирование.

5. Редакционная коллегия правомочна осуществлять научное и литературное редактирование поступивших материалов, при необходимости сокращать их по согласованию с автором, либо, если тематика статьи представляет интерес для журнала, направлять статью на доработку автору.

6. Редакционная коллегия оставляет за собой право отклонить статью, не отвечающую установленным требованиям оформления или тематике журнала.

7. В случае отклонения представленной статьи редакционная коллегия дает автору мотивированное заключение.

8. Автор(ры) в течение 7 дней получают уведомление о поступившей статье. Через месяц после регистрации статьи, редакция сообщает автору(рам) о результатах рецензирования и о плане публикации статьи.

Подробную информацию об оформлении статей можно получить по e-mail: iymex@rambler.ru.

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

“АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ АГРАРНОЙ НАУКИ”

Выпуск 46
март

Литературный редактор – В.И. Тесля
Технический редактор – Н.В. Спиридонова
Перевод – П.Г. Асалханов

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 070444 от 11.03.98 г.
Дата выхода: 31.03.2023 г.
Почтовый адрес редакции:
664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский район, п. Молодежный.
Тел. (3952) 237-491