

электронный научно-практический журнал
ELECTRONIC SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

актуальные вопросы аграрной науки

ACTUAL ISSUES
OF AGRARIAN SCIENCE

выпуск 3(52)
сентябрь
VOLUME 3(52)
SEPTEMBER

ISSN: 2411-6483

МОЛОДЁЖНЫЙ 2024



Электронный научно-практический журнал
**“Актуальные вопросы аграрной
науки”**

2024 Выпуск 3 (52)

Electronic scientific-Practical journal

“Actual issues of agrarian science”

2024 Volume 3 (52)

Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки” зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Регистрационный номер Эл №ФС77-76761 от 06 сентября 2019 года.

Учредитель: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ.

DOI 10.51215/2411-6483-2024-52

Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”, 2024, выпуск 3 (52), сентябрь.

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

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

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

Ответственный секретарь: И.В. Наумов – д.т.н.

Члены редакционного совета: *ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ:* С.Н. Шуханов, д.т.н.; В.Н. Хабардин, д.т.н.; О.В. Репецкий, д.т.н.

Иные организации: *Россия:* Байкальский государственный университет: В.И. Зоркальцев, д.т.н. Иркутский государственный университет путей сообщения Ю.М. Краковский, д.т.н.

Монголия: Монгольский государственный аграрный университет: Гомбо Гантулга, к.т.н.

Республика Узбекистан: Ташкентский государственный аграрный университет: Ш. Жаникулов, к.т.н.

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

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Регистрационный номер Эл № ФС77 – 76761 от 06 сентября 2019 г.

URL: <http://agronauka.igsha.ru/>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования электронной библиотеки 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.

Статьи проверены с использованием Интернет-сервиса “Антиплагиат”.

Учредитель – ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ.

ISSN 2411-6483

Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”, 2024, issue 3 (52), September. It is edited under the decision of the Scientific Council of the Irkutsk State Academy of Agriculture since November, 2011.

Chief editor: Ya.M. Ivanyo – Doctor of Technical Sc.

Deputy chief editor: M.K. Buraev – Doctor of Technical Sc.

Executive secretary: I.V. Naumov – Doctor of Technical Sc.

The members of the editorial board: *FSBEI HE Irkutsk SAU:* **S.N. Shukhanov** – Doctor of Technical Sc.; **V.N. Khabardin** – Doctor of Technical Sc.; **O.V. Repetsky** – Doctor of Technical Sc.

Other organizations: *Russia:* Baikal State University: **V.I. Zorkaltsev**, Doctor of Technical Sc.

Irkutsk State Transport University IrGUPS: **Yu.M. Krakovsky** – Doctor of Technical Sc.

Mongolia: Mongolian State Agrarian University: **Gombo Gantulga**, Candidate of Technical Sc.

Republic of Uzbekistan: Tashkent State Agrarian University: **Sh. Zhanikulov**, Candidate of Technical Sc.

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.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications.

Certificate El № FS77 – 76761. Registration date: 06.09.2019.

URL: <http://agronauka.igsha.ru/>

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

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.

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

The founder – FSBEI HE Irkutsk SAU.

ISSN 2411-6483

СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АГРОИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

- Егоров И.Б., Поздняков Н.А., Шистеев А.В., Бураев М.К.* Газодинамическое напыление изношенных поверхностей деталей машин 8
- Наумов И.В., Соболева А.Э.* К вопросу об уровне аварийности в электрических сетях ПАО “Россети Волга” 19
- Сусликов И.А., Кузьмин А.В.* К вопросу повреждения клубней картофеля от воздействия ударных нагрузок 31
- Шелехов И.Ю., Бугаев В.А., Пиксаев Д.А., Алтухов И.В.* Энергоэффективные методы отопления зданий сельскохозяйственного назначения 39

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Белякова А.Ю., Бузина Т.С., Иваньо Я.М.* Прикладные аспекты применения математического моделирования в сельском хозяйстве региона 49
- Куликов В.В., Куцый Н.Н.* Параметрический синтез регулятора с переменной структурой с использованием критерия со штрафной функцией на основе ошибки системы 62
- Петров А.В.* Цифровые двойники – цифровые тени – цифровые двойники 73
- Репецкий О.В., Нгуен Ван Мань* Увеличение усталостной прочности рабочих колес турбомашин путем использования блочных моделей направляющих лопаток статора 82

CONTENS

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AGRO-ENGINEERING SYSTEMS

- Egorov I.B., Pozdnyakov N.A., Shisteev A.V., Buraev M.K.* Gas-dynamic spraying of worn surfaces of machine parts 8
- Naumov I.V., Soboleva A.E.* On the issue of the causes of accidents in electrical networks (using the example of PJSC Rosseti Volga) 19
- Suslikov I.A., Kuzmin A.V.* On the issue of damage to potato tubers from the impact of shock loads 31
- Shelekhov I.Yu., Bugaev V.A., Piksaev D.A., Altukhov I.V.* Energy efficient methods of heating agricultural buildings 39

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING, MANAGEMENT, MATHEMATICAL MODELING

- Belyakova A.Yu., Buzina T.S., Ivanyo Ya.M.* Applied aspects of application of mathematical modeling in agriculture of the region 49
- Kulikov V.V., Kutsy N.N.* Parametric synthesis of a regulator with a variable structure using a criterion with a penalty function based on a system error 62
- Petrov A.V.* Digital twins – digital shadows – digital twins 73
- Repetckii O.V., Nguyen Van Manh* Increasing the fatigue strength of turbomachine working blades by using block models of stator guide vanes 82



МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АГРОИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AGRO-ENGINEERING SYSTEMS

DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-8-18
УДК 631.362

Научная статья

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

И.Б. Егоров, Н.А. Поздняков, А.В. Шистеев, М.К. Бураев

*Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия*

Аннотация. Приведены сведения о применении метода холодного газодинамического напыления (ХГДН) при восстановлении деталей машин при техническом сервисе. В данное время при осуществлении процесса холодного газодинамического напыления, в основном, находят применение порошки, изготовленные на основе разных цветных металлов. Такое положение усложняет возможность восстановления узлов и агрегатов машин, которые могут служить повторно после соответствующей токарной и термической обработки. Частицы металлического порошка деформируются при ударе, передавая кинетическую энергию и самому телу – “подложке”, закрепляясь на восстанавливаемой детали, что позволяет провести дальнейшую обработку детали, чтобы максимально снизить многие недостатки традиционных методов термического распыления. Любой процесс нанесения металла, в классическом виде, может вызывать остаточные напряжения слоев металла, термическую деформацию с отклонением от размеров, подплавление подложки, кристаллизацию, испарение металла. Однако при использовании технологии напыления холодным газодинамическим способом, прогнозируется значительное улучшение общего качества восстановления – ввиду того, что частицы используемого порошка, получая ускорение совместное со струей газа, скорость которой превышает скорость звука, подается, когда сырье, то есть металлический порошок имеет температуру ниже температуры плавления распыляемого порошка. В этом направлении использование порошков на основе железа будет более практичным, такой способ поможет значительно увеличить количество деталей, которые можно использовать повторно или размещать в обменных фондах предприятий сельскохозяйственного профиля. Коэффициент теплового расширения используемого порошка должен располагаться в максимальной близости к материалу подложки, которая является стальной.

Ключевые слова: ремонт, напыление детали, скорость частицы, струя газа, порошки на железоуглеродистой основе.

Для цитирования: Егоров И.Б., Поздняков Н.А., Шистеев А.В., Бураев М.К. Газодинамическое напыление изношенных поверхностей деталей машин. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3 (52):8-18. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-52-8-18.

GAS-DYNAMIC SPRAYING OF WORN SURFACES OF MACHINE PARTS

Igor B. Egorov, Nikita A. Pozdnyakov, Alexey V. Shisteev, Mikhail K. Buraev

Irkutsk state agricultural university named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

Abstract. The article provides information on the application of the cold gas-dynamic spraying (CGDS) method for the restoration of machine parts during technical service. Currently, the cold gas-dynamic spraying process mainly uses powders made from various non-ferrous metals. This situation complicates the possibility of restoring machine units and assemblies that can be used repeatedly after appropriate turning and heat treatment. Particles of metal powder are deformed upon impact, transferring kinetic energy to the body itself - the "substrate", fixing on the restored part, which allows for further processing of the part in order to minimize many of the disadvantages of traditional thermal spraying methods. Any process of metal application, in its classical form, can cause residual stresses in metal layers, thermal deformation with deviation from dimensions, melting of the substrate, crystallization, and evaporation of the metal. However, when using cold gas-dynamic spraying technology, a significant improvement in the overall quality of restoration is predicted – due to the fact that the particles of the powder used, accelerating together with the gas jet, the speed of which exceeds the speed of sound, are supplied when the raw material, that is, the metal powder, has a temperature below the melting point of the sprayed powder. In this regard, the use of iron-based powders will be more practical, this method will help to significantly increase the number of parts that can be reused or placed in the exchange funds of agricultural enterprises. The coefficient of thermal expansion of the powder used should be located as close as possible to the substrate material, which is steel.

Keywords: repair, spraying of a part, particle speed, gas jet, iron-carbon powders.

For citation: Egorov I.B., Pozdnyakov N.A., Shisteev A.V., Buraev M.K. Gas-dynamic spraying of worn surfaces of machine parts. *Electronic scientific-practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 3 (52):8-18. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-52-8-18.

Введение. При использовании техники для сельскохозяйственного производства в условиях хозяйств или иными словами – нормальной эксплуатации детали машин, оборудования постоянно подвержены механическому и химическому (коррозионному) изнашиванию [1, 10]. В связи с чем, зачастую, возникает необходимость восстановления той или иной детали, элемента различными технологиями, в том числе применяются метод холодного газодинамического напыления [7, 8].

Метод холодного газодинамического напыления создан на основе эффекта, который был открыт в конце прошлого века и заключался в том, что твёрдые частицы, движущихся скоростью, превышающей скорость звука, при столкновении с поверхностью могут на ней закрепиться ввиду значительного подогрева при ударе.

Процесс нанесения покрытия включает в себя следующие этапы:

- 1) нагрев сжатого газа (воздуха);
- 2) подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока;
- 3) подачу в этот поток порошкового материала;
- 4) ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха;
- 5) направление его на поверхность обрабатываемого изделия (рис. 1) [2, 3, 5].

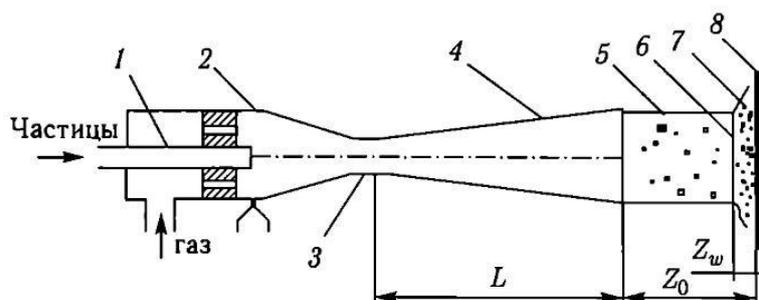


Рисунок 1 – Газодинамическое напыление частиц

1 – трубка ввода частиц в форкамеру; 2 – форкамера; 3 – критическое сечение, 4 – сверхзвуковая часть сопла (L), 5 – участок свободной струи (Z_0), 6 – головная ударная волна, 7 – сжатый слой (Z_w), 8 – поверхность подложки

Figure 1 – Gas-dynamic particle spraying

1 – particle inlet tube into the pre-chamber; 2 – pre-chamber; 3 – critical section, 4 – supersonic part of the nozzle (L), 5 – free jet section (Z_0), 6 – bow shock wave, 7 – compressed layer (Z_w), 8 – substrate surface

Ускоренные сверхзвуковым газовым потоком частицы, после достижения скорости выше скорости звука направляются на подложку, при столкновении с которой, происходит фиксация частиц на ней – до формирования сплошного покрытия. С подложкой вступают во взаимодействие нерасплавленные частицы, при этом обладающие очень высоким скоростным показателем. Далее в момент касания каждой металлической частицы с твердой поверхностью подложки происходит их пластическая деформация с образованием химических и структурных связей в пятне контакта [4, 13].

На современном производстве можно встретить разные модификации наплавочного оборудования. При этом именно для напыления холодным газодинамическим способом подходят лишь модели: Димет-405 (рис. 2) и Димет-412 (рис. 3), имеющие ручное или автоматизированное управление при нанесении металлических покрытий [9, 11, 12].

Оборудование делает возможным осуществление струйно-абразивной обработки восстанавливаемой поверхности перед нанесением самого покрытия. Оборудование состоит из следующих узлов:

- порошковые питатели;
- напылитель;

- блок управления;
- участок подготовки воздуха.

Необходимый уровень давления сжатого воздуха – для обеспечения устойчивой работы установки, составляет 0.65-1.15 МПа, минимальный показатель по расходу воздуха должен быть в пределах 0.3-0.4 м³/минуту, напряжение питания 220/380 В. Покрытие, в основе которого используется алюминиевый порошок, будет расходоваться со скоростью 1-6 г/мин [11, 14].

Фрагменты области применения технологии и оборудования ХГДН показаны на рисунках 2 - 4:



Рисунок 2 – Приборы для холодного газодинамического напыления
а) прибор “Димет-405”; б) прибор “Димет-412”

Figure 2 – Devices for cold gas dynamic spraying
a) the device "Dimet-405"; b) the device “Dimet-412”



Рисунок 3 – Устранение трещины пастели блока цилиндров напылением

Figure 3 – Removal of cracks in the pastel of the cylinder block by spraying

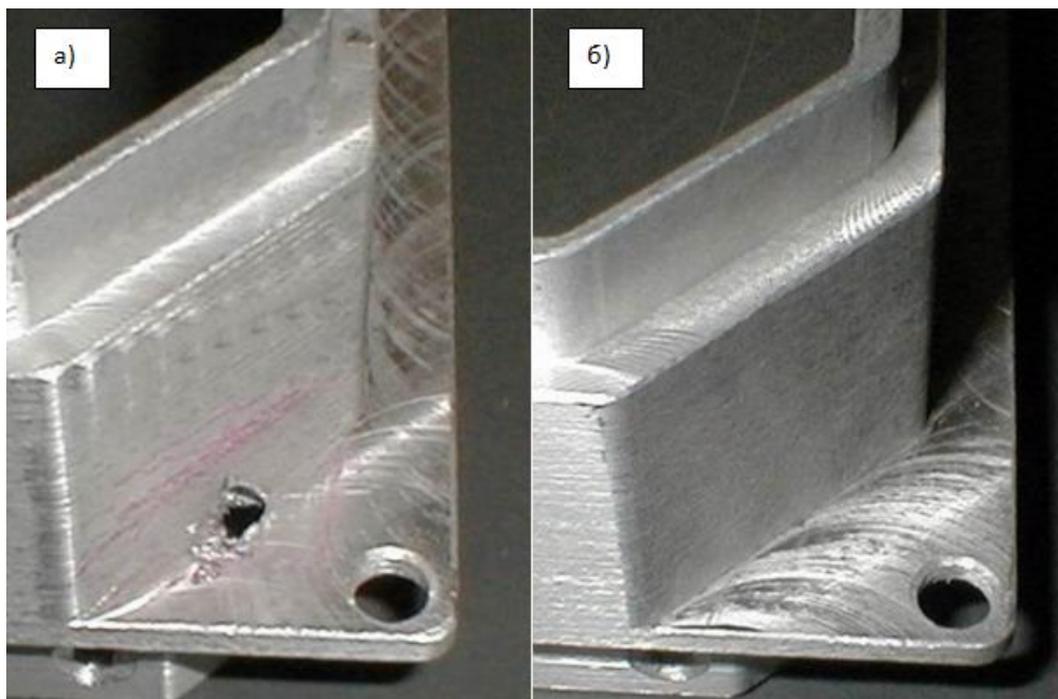


Рисунок 4 – Доработка дефектов литых деталей
а) до ремонта; б) после ремонта

Figure 4 – Revision of defects in cast parts
a) before repair; b) after repair

Технология холодного газодинамического напыления является инновационным методом восстановления деталей и компонентов сельскохозяйственной техники, тракторов, автомобилей и оборудования. Этот метод позволяет восстанавливать изношенные поверхности без применения высоких температур, что помогает сохранить свойства материалов и продлить срок службы изделий. Исследование этой технологии представляет большую ценность для промышленности и сельского хозяйства, так как может способствовать снижению расходов на ремонт и обслуживание техники. Кроме того, в условиях резкого повышения требований к импортозамещению, использование холодного газодинамического напыления может стать ключевым элементом в обеспечении надежности и долговечности отечественного оборудования [9, 13, 14]. Так, современные методы ремонта и используемые технологии восстановления очень редко используют холодное газодинамическое напыление, как основной метод для восстановления рабочих поверхностей коленчатых валов, например, или опорных катков гусеничных машин, поскольку на предприятиях нет достаточного уровня оснащения необходимым сварочным оборудованием, отсутствует практический опыт и навык работников [6]. В связи с этим, во главе угла, в настоящей научной статье, в качестве одной из приоритетных задач ставится значительное увеличение области применения таких технологий в процессе осуществления восстановительных процедур отдельных элементов, участков

деталей транспортно-технологических машин, в том числе применяемых и в отрасли АПК [4, 15].

Цель исследования: обоснование возможности применения установки Димет-405 при ремонтном восстановлении элементов и участков стальных деталей тракторов и автомобилей в сельском хозяйстве.

Материалы и методы исследования. В процессе формирования материалов научной работы использованы математические расчетные методы, использованы данные, которые были получены путем изучения технической литературы, данные справочников.

В качестве теоретической основы принято условие, что в момент соударения частиц металла о поверхность подложки происходит пластическое изменение слоя, что значительно увеличивает плотность покрытия, снижает показатели его пористости, увеличивает, в целом, когезионную прочность. Слой покрытия, как композитный материал, представляет собой металлическую основу – включающую в себя, имеющие большую твердость, чем металл основы, частицы [9, 12].

Также при проведении исследований использованы анализ априорной информации о технологии ХГДН металлических частиц на поверхность изношенных деталей и метод металлографии.

Результаты и обсуждение. Таким образом, качество напыления должно определяться по следующим показателям: адгезия, когезия, микротвердость и пористость [5]. Для теплонагруженных стальных деталей также предъявляется требование, чтобы напыленный участок имел коэффициент теплового расширения максимально близкий к таковому у материала подложки во избежание отрыва напыленного слоя при знакопеременных тепловых нагрузках.

Композитные порошки на основе алюминиевой пудры могут отвечать в той или иной степени требованиям по прочности за счет своего состава, в котором, как правило, присутствует армирующий компонент, например, корунд Al_2O_3 [5, 12]. Тепловое же расширение у напыленного композитного слоя и у подложки, материалом которой в 90% случаев является сталь, будет отличаться, что делает невозможным применение существующей технологии ХГДН для восстановления теплонагруженных стальных деталей. Возможность использования порошков на основе железа необходимо оценивать с точки зрения понимания процесса образования покрытия при ХГДН.

Теория процесса такова, что разгон частицы металлического порошка до скорости, уровня сверхзвука, которая составляет около 600 - 1200 м/с, делает возможным накопление кинетической энергии на выходе из сопла. Далее при соударении с подложкой кинетическая энергия превращается во внутреннюю, сопровождается выделением тепла, благодаря чему частица расплавляется и фиксируется на поверхности восстанавливаемого участка или детали [8, 15].

Параметры, оказывающие основное влияние на скорость холодного газодинамического напыления: температура нагрева газа (t , $^{\circ}\text{C}$), давление газа на входе (p , МПа) и расход порошка по массе (кг/ч).

В свою очередь, температура газа, осуществляющего доставку частиц к детали, а, следовательно, и температура самих частиц напыляемого порошка (T , $^{\circ}\text{C}$), в совокупности являются управляемыми переменными.

Тогда, температура плавления металла порошка ($T_{\text{плав}}$, $^{\circ}\text{C}$), масса частицы порошка (m , кг) и удельная теплоёмкость металла порошка (c , Дж/кг $^{\circ}\text{C}$), учитываются, как неуправляемые переменные.

Таблица 1 – Влияние факторов на процесс напыления

Table 1 – Influence of factors on the spraying process

Основной параметр производительности	Тип факторов	Параметры процесса напыления		
Скорость напыления	Управляемые	температура газа, осуществляющего доставку частиц к детали	температура частиц	кинетическая энергия частиц
	Неуправляемые	температура плавления металла порошка	масса частицы порошка	удельная теплоёмкость металла порошка

Далее, применяя закон сохранения энергии для неупругого удара, делаем вывод:

$$Ek_1 = Ek_2 + Q, \quad (1)$$

где Ek_1 – кинетическая энергия частицы

$$Ek_1 = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса частицы порошка, кг;

v – скорость частицы, м/с;

Q – общее кол-во теплоты, Дж;

Ek_2 – кинетическая энергия системы после соударения частицы порошка о подложку;

$Ek_2=0$, т.к. напыляемая деталь никуда не двигается и её скорость равна 0.

Из вышеуказанных формул следует вывод о том, что кинетическая энергия частицы должна полностью перейти в теплоту

$$Ek_1 = Q, \quad (3)$$

где Q – это количество теплоты, необходимое для нагрева частицы порошка до температуры плавления $T_{\text{плав}}$. Для алюминия $T_{\text{плав}}=660^{\circ}\text{C}$, для железа – 1539°C .

$$Q = c \cdot m \cdot (T_{\text{плав}} - T_0), \quad (4)$$

где c – удельная теплоёмкость металла порошка, Дж/кг $^{\circ}\text{C}$;

Для алюминия $C = 920$ Дж/кг $^{\circ}\text{C}$; а для железа $C = 460$ Дж/кг $^{\circ}\text{C}$.

Следовательно, уравнение баланса энергии примет вид:

$$\frac{mv^2}{2} = c \cdot m \cdot (T_{\text{плав}} - T_0), \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура, $T_0 \approx 100^\circ\text{C}$ [2].

Разделим обе части уравнения на переменную массы m , получим:

$$\frac{v^2}{2} = c\Delta T. \quad (6)$$

Отсюда,

$$v = \sqrt{2c\Delta T}. \quad (7)$$

Подставим значения теплоёмкости для порошка на основе алюминия и железа в формулу (7), находим скорость частицы в момент соударения:

$$v_{\text{Al}} = \sqrt{2 \cdot 920 \cdot 560} = 1015,1 \text{ м/с},$$
$$v_{\text{Fe}} = \sqrt{2 \cdot 460 \cdot 1439} = 1150,6 \text{ м/с}.$$

Изучая полученные результаты, можно сделать вывод, что процесс плавления металлических частиц порошка, содержащего железо, может быть успешно осуществлён при увеличении скорости разгона частиц на 13% по сравнению с аналогичными показателями при использовании порошка, содержащего алюминий. Разница в скоростях соударения частиц с подложкой находится в пределах диапазона, который может быть достигнут с помощью установки Димет-405, в отличие от более современных аналогов [6, 11].

Выводы. 1. Результаты исследования показывают, что технология холодного газодинамического напыления может быть использована для восстановления деталей, узлов и агрегатов, повреждённых трещинами, сколами и другими дефектами. Это позволяет увеличить вероятность повторного использования деталей при ремонте машин и оборудования.

2. Технология нанесения покрытия с ускорением частиц порошка на основе железа до такой скорости, при которой они расплавляются при ударе о поверхность, может быть реализована с помощью установки Димет-405.

3. Установка требует унификации для напыления порошков на основе железа при наращивании изношенных поверхностей стальных деталей.

Список литературы

1. Аносова, А.И. Метод уточнения потребностей запасных частей при техническом сервисе машин / А.И. Аносова, М.К. Бураев, С.Ю. Луговнин, А.В. Шистеев // Engineering Studies. – 2018. – Т. 10, № 3-2. – С. 646-652. – EDN AUWFOO.
2. Басов, А.А. О возможности использования технологии “холодного” газодинамического напыления теплопроводного порошкового материала для обеспечения теплового контакта между элементами конструкции / А.А. Басов, М.А. Ключкова, И.Д. Махин // Космическая техника и технологии. – 2014. – №3 (6). – С. 64-70.
3. Белоусов, И.В. К повторному использованию деталей при ремонте машин / И.В. Белоусов, М.К. Бураев // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: Матер. междунар. научно-практ. конф. молодых ученых, п. Молодежный, 16-17 марта 2023 года. – п. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2023. – С. 334-341. – EDN AXFBUP.
4. Бураева, Г.М. К методике оценки задержек в технологических процессах ремонта машин / Г.М. Бураева, И.В. Белоусов, А.В. Шистеев, М.К. Бураев // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2023. – № 48. – С. 8-16. – EDN KTRIGV.

5. Геращенко, Д.А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом “холодного” газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al–Sn+Al₂O₃. Дисс. на соиск.уч.степени к.т.н. 05.16.09 / Геращенко Дмитрий Анатольевич; [Место защиты: Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" – ФГУП]. – Санкт-Петербург, 2015. – 172 с.
6. Гусев, А.А. К обоснованию технического сервиса машинно-тракторного парка крестьянско-фермерских хозяйств / А.А. Гусев, М.К. Бураев, А.В. Шистеев // Вестник КрасГАУ. – 2016. – № 8(119). – С. 110-114. – EDN WCYUYN.
7. Ерохин, М.Н. Диффузионные покрытия в ремонтном производстве / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. – 124 с.
8. Ключев, О.Ф. Технология газодинамического нанесения покрытий / О.Ф. Ключев, А.И. Каширин, А.В. Школкин, Т.В. Буздыгар // Применение покрытий // Сварщик, Ч. 2. – 2003. – № 5. – С. 24-27.
9. Козлов, И.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) / И.А. Козлов, К.А. Лещев, А.А. Никифоров, С.А. Демин // Труды ВИАМ. – 2020. – № 8(90). – С. 77-93. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93. – EDN WVBSVT.
10. Орыщенко, А.С. Производство изделий из современных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными компонентами / А.С. Орыщенко, Ю.В. Загашвили, В.И. Кулик // Инновации. – 2007. – № 12. – С. 94-98.
11. Руководство по эксплуатации “ДИМЕТ Модель 405” Д405 РЭ. Обнинский центр порошкового напыления. – 32 с.
12. Тулинов, А.Б. Применение металлополимерных композитов для устранения дефектов горного оборудования / А.Б. Тулинов, М.С. Островский // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 27-31.
13. Черноиванов, В.И. Перспективы применения нанотехнологий как прорывного фактора повышения качества обслуживания и ремонта машин / В.И. Черноиванов // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2011. – №2. – С. 3-10.
14. Шистеев, А.В. Проблемы технического сервиса агропромышленного комплекса байкальского региона / Бураев М.К., Шистеев А.В., Бураева Г.М., Аносова А.И. // Вестник ВСГУТУ. – 2022. № 3 (86). – С. 56-62.
15. Application of galvanic zinc-iron coating in the repair of transport and technological machines / D.M. Rozhkov, E.V. Eltoshkina, P.I. Ilyin, O.A. Svirbutovich // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1022. – P. 181-193. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.181. – EDN NFFDJU.

References

1. Anosova, A.I. Metod utochneniya potrebnosti zapasnyh chastej pri tekhnicheskom servise mashin [A way to achieve the goal of personnel reserve with technical support of the Mahin service]. Engineering research, 2018, vol. 10, no. 3-2, pp. 646-652. – EDN AUFU.
2. Basov, A.A. et all. O vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnologii «kholodnogo» gazodinamicheskogo napyleniya teploprovodnogo poroshkovogo materiala dlya obespecheniya teplovogo kontakta mezhdru elementami konstruksii [On the possibility of using the technology of "cold" gas-dynamic spraying of heat-conducting powder material to ensure thermal contact between structural elements]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2014, no. 3 (6), pp. 64-70.
3. Belousov, I.V., Buraev, M.K. K povtornomu ispol'zovaniyu detaley pri remonte mashin [On the reuse of parts in the repair of machines]. Molodezhny, 2023, pp. 334-341.
4. Buraeva, G.M. et all. K metodike ocenki zaderzhek v tekhnologicheskikh processah remonta mashin [To the methodology for assessing delays in technological processes of machine repair]. “Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki”, 2023, no. 48, pp. 8-16. – EDN KТPIGV.
5. Gerashchenkov, D.A. Razrabotka tekhnologicheskogo protsesssa naneseniya pokrytiy metodom “kholodnogo” gazodinamicheskogo napyleniya na osnove armirovannykh poroshkov

sistemy Al–Sn+Al₂O₃. [Development of a technological process for applying coatings by the method of "cold" gas-dynamic spraying based on reinforced powders of the Al-Sn+Al₂O₃ system]. Cand.Diss., St. Petersburg, 2015, 172 p.

6. Gusev, A.A. et al. K obosnovaniyu tekhnicheskogo servisa mashinno-traktornogo parka krest'yansko-fermerskih hozyajstv [To substantiate the technical service of the machine and tractor park of peasant farms]. Vestnik KrasGAU, 2016, no. 8(119), pp. 110-114. – EDN WCYUYH.

7. Erokhin, M.N., Kazancev, S.P. Diffuzionnyye pokrytiya v remontnom proizvodstve [Diffusion coatings in repair production]. Moscow, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education MGAU, 2006, 124 p.

8. Klyuev, O.F. et al. Tekhnologiya gazodinamicheskogo naneseniya pokrytij [Technology of gas-dynamic application of coatings]. Primenenie pokrytij. Svarshchik, vol. 2, 2003, no. 5, pp. 24-27.

9. Kozlov, I.A. et al. Kholodnoye gazodinamicheskoye napyleniye pokrytij (obzor) [Cold gas-dynamic spraying of coatings (review)]. Trudy VIAM, 2020, no. 8 (90), pp. 77-93. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93. – EDN WVBSVT.

10. Oryshchenko, A.S. et al. Proizvodstvo izdeliy iz sovremennykh kompozitsionnykh materialov, modifitsirovannykh nanorazmernymi komponentami [Production of products from modern composite materials modified with nanosized components]. Innovacii, 2007, no. 12, pp. 94-98.

11. Rukovodstvo po ekspluatatsii “DIMET Model' 405” D405 RE. [Operation manual "DIMET Model 405" D405 RE]. Obninskij tsentr poroshkovogo napyleniya, 32 p.

12. Tulinov, A.B., Ostrovskij, M.S. Primeneniye metallopolimernykh kompozitov dlya ustraneniya defektov gornogo oborudovaniya [Application of metal-polymer composites to eliminate defects in mining equipment]. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika, 2013, no. 3, pp. 27-31.

13. Chernoiyanov, V.I. Perspektivy primeneniya nanotekhnologiy kak proryvnogo faktora povysheniya kachestva obsluzhivaniya i remonta mashin [Prospects for the use of nanotechnology as a breakthrough factor in improving the quality of machine maintenance and repair]. Sel'skohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont, 2011, no. 2, pp. 3-10.

14. Shisteev, A.V. et al. Problemy tekhnicheskogo servisa agropromyshlennogo kompleksa baykal'skogo regiona [Problems of technical service of the agro-industrial complex of the Baikal region]. Vestnik VSGUTU, 2022, no. 3 (86), pp. 56-62.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the planning, execution and analysis of this study. All authors of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

История статьи / Article history

Дата поступления в редакцию / Received: 29.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 08.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторах

Егоров Игорь Борисович – ассистент кафедры “Эксплуатация машинно-тракторного парка, безопасность жизнедеятельности и профессиональное обучение” инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская

область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел. 89041209854, e-mail: igoresha.98@mail.ru.
ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-4907-4648>.

Поздняков Никита Андреевич – аспирант кафедры “Технический сервис и общепромышленные дисциплины” инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел. 89041209854, e-mail: igoresha.98@mail.ru.
ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0006-3076-2446>.

Шистеев Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры “Технический сервис и общепромышленные дисциплины” инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел. 83952237431, e-mail: drive-er@yandex.ru.
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8117-1263>.

Бураев Михаил Кондратьевич – доктор технических наук, профессор кафедры “Технический сервис и общепромышленные дисциплины” инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел. 83952237431, e-mail: buraev@mail.ru.
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5028-7511>.

Information about authors

Igor B. Egorov – assistant of the department “Operation of the machine and tractor fleet, life safety and professional training” of the engineering faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 89041209854, e-mail: igoresha.98@mail.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-4907-4648>.

Nikita A. Pozdnyakov – postgraduate student of the department “Technical service and general engineering disciplines” of the engineering faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 89041209854, e-mail: igoresha.98@mail.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0006-3076-2446>.

Alexey V. Shisteev – candidate of technical sciences, associate professor of the department of “Technical service and general technical disciplines” of the Engineering faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 83952237431, e-mail: drive-er@yandex.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8117-1263>.

Mikhail K. Buraev – doctor of technical sciences, professor of the department of “Technical service and general technical disciplines” of the Engineering faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 83952237431, e-mail: buraev@mail.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5028-7511>.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-19-30

УДК 621.3.11

Научная статья

К ВОПРОСУ ОБ УРОВНЕ АВАРИЙНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПАО “РОССЕТИ ВОЛГА”

^{1,2}И.В. Наумов, ²А.Э. Соболева

¹ Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

Аннотация. Целью статьи является аналитическая оценка уровня повреждаемости в электрических сетях ПАО “Россети Волга” при транспорте электрической энергии по воздушным линиям электропередачи. Представлена структурная характеристика пяти филиалов компании, а также произведена количественная оценка произошедших аварийных отключений в электрических сетях этих филиалов. На основании анализа последствий аварийных отключений в этих сетях, произведена классификация интенсивности событий отказов и определено процентное соотношение отказов различной интенсивности по величине недоотпуска электрической энергии потребителям. Произведен анализ основных причин произошедших аварийных отключений в различных временных интервалах. В качестве исходных данных использованы материалы по техническому состоянию электрических сетей компании, опубликованные в открытой печати. При написании статьи использовались общенаучные *методы* численного анализа, позволяющие производить оценку интенсивности последствий аварийных отключений, а также методологические основы оценки уровня эффективности электроснабжения. Для расчета и визуализации исследуемых величин использовались технологии MATLAB, Excel. Произведенные исследования позволили установить степень повреждаемости исследуемых электрических сетей ПАО “Россети Волги”, основные причины этих повреждений, а также уровень интенсивности исследуемых отказов в электрических сетях. Полученные *результаты* могут представлять интерес для научных работников и инженерно-технических специалистов электросетевых компаний, занимающихся исследованиями в области уровня надежности электроснабжения. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы руководством компании ПАО “Россети Волга” при разработке противоаварийных мероприятий на определенную перспективу.
Ключевые слова: перерывы электроснабжения, недоотпуск электроэнергии, интенсивность отказов, причины возникновения отказов

Для цитирования: Наумов И.В., Соболева А.Э. К вопросу об уровне аварийности в электрических сетях ПАО “Россети Волга”. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3(52):19-30. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-19-30.

ON THE ISSUE OF THE CAUSES OF ACCIDENTS IN ELECTRICAL NETWORKS (USING THE EXAMPLE OF PJSC ROSSETI VOLGA)

^{1,2} Igor V. Naumov, ² Alina E. Soboleva

¹ Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, *Irkutsk, Russia*

Abstract. The purpose of the article is an analytical assessment of the level of damage in the electrical networks of PJSC “Rosseti Volga” during the transportation of electric energy via overhead power lines. The structural characteristics of five branches of the company are presented, and a quantitative assessment of the emergency shutdowns that occurred in the electrical networks of these branches is made. Based on the analysis of the consequences of emergency shutdowns in these networks, a classification of the intensity of failure events is made and the percentage of failures of different intensity by the amount of undersupply of electric energy to consumers is determined. An analysis of the main causes of the emergency shutdowns that occurred in different time intervals is made. The initial data are materials on the technical condition of the company's electrical networks published in the open press. When writing the article, general scientific methods of numerical analysis were used, which allow assessing the intensity of the consequences of emergency shutdowns, as well as methodological foundations for assessing the level of efficiency of power supply. MATLAB and Excel technologies were used to calculate and visualize the studied values. The conducted research allowed to establish the degree of damage of the studied electrical networks of PJSC “Rosseti Volga”, the main causes of these damages, as well as the level of intensity of the studied failures in electrical networks. The obtained results may be of interest to scientists and engineering and technical specialists of electric grid companies engaged in research in the field of the level of reliability of power supply. In addition, the obtained results can be used by the management of PJSC “Rosseti Volga” in developing emergency response measures for a certain period.

Keywords: power supply interruptions, undersupply of electricity, failure intensity, causes of failures.

For citation: Naumov I.V., Soboleva A.E. On the Issue of the Causes of Accidents in Electrical Networks (Using the Example of PJSC Rosseti Volga). *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 3(52):19-30. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-19-30.

Введение. Транспортировка электроэнергии (ЭЭ) является сложной, многоплановой задачей, решение которой является наиболее важным критерием оценки эффективности обеспечения этой энергией всех уровней электропотребления, как при товарном производстве, так и при обеспечении жизнедеятельности граждан. При этом поиск путей совершенствования передачи ЭЭ характеризуют наиболее ответственную функцию электроэнергетической отрасли – сокращение всех видов ущерба в результате возникающих несанкционированных отказов при электроснабжении. Особенностью электроснабжения в Российской Федерации, по сравнению с другими странами, является транспортировка ЭЭ на очень большие расстояния, что сопровождается комплексом дополнительных задач, связанных с поиском

технических решений, направленных на повышение уровня надежности и безопасности электроснабжения. При этом особое внимание должно быть обращено на техническое состояние сетей, которое к настоящему времени достигает критического уровня. Подавляющее большинство линий электропередачи по всем субъектам электросетевого распределения, занимающихся процессом доставки ЭЭ потребителю построено более 50 лет назад. Современное сетевое строительство ЛЭП различных уровней номинального напряжения производится крайне недостаточно. При этом уровень износа по отдельным электросетевым компаниям превышает 70%. В целом по опубликованным данным на 01.01.2020 г. износ основного электросетевого оборудования (ЛЭП и ПС) по ПАО “Россети” составил 53.1%; по ПАО “ФСК ЕС” – 52.2% [7]. Кроме того, следует учитывать и тот факт, что спрос на электрическую энергию постоянно увеличивается. Так по ЕЭС России потребность в ЭЭ к концу 2027 г. оценивается в размере 1159.905 млрд. кВт·ч, что больше объема потребления электрической энергии 2020 г. на 126.187 млрд. кВт·ч. [5]. При этом необходимо учитывать и продолжающуюся специальную военную операцию, требующую значительных энергетических затрат для производства гигантского количества военной продукции.

По данным [1], в 2023 г., выработка ЭЭ всеми электростанциями ЕЭС России составила 1134 млрд. кВт·ч (на 1.1% выше, чем в 2022 г.), при этом электропотребление в этом же году составило 1121.6 млрд. кВт·ч (на 1.4% более, чем в 2022 г.).

Соответственно все возрастающая потребность в ЭЭ требует и более качественных мероприятий, предотвращающих минимизацию возможных ущербов, возникающих в результате несанкционированных отключений. Таким образом, аналитическая оценка происходящих несанкционированных отказов в различных электросетевых структурах Российской Федерации может быть весьма полезна руководству электросетевых компаний при разработке планов противоаварийных мероприятий.

В связи со сказанным целью статьи является анализ повреждаемости, основных причин аварийных ситуаций и последствий этих аварий в электрических сетях одного из структурных подразделений ПАО “Россети” – ПАО “Россети Волги”. К задачам, поставленным для достижения указанной цели, относятся следующие: анализ изменения количества аварийных отключений (отказов) и их последствий, анализ причин этих отказов, превентивная оценка повреждений на краткосрочную перспективу.

В качестве объекта исследования принято 5 филиалов ПАО “Россети Волги”: электрические сети Оренбургэнерго (ОЭ) – 1 компания; Саратовские распределительные сети (СарРС) – 2 компания; Самарские распределительные сети (СРС) – 3 компания; Пензенские распределительные сети (ПРС) – 4 компания и Ульяновские распределительные сети (УРС) – 5 компания.

Характеристика объекта исследования. Общая площадь территорий, по которым указанные компании транспортируют ЭЭ по своим сетям,

составляет 359.1 тыс. км², из них на долю электрических сетей 1-й компании приходится 34.45, на долю 2-й – 28.18, 3-й – 14.93, 4-й – 12.08 и 5-й – 10.36%. Общее количество населения, получающее ЭЭ по указанным сетям, составляет 9754.1 чел. (рис.1).

Общая протяженность линий электропередачи (ЛЭП) всех уровне номинального напряжения составляет, соответственно: электрических сетей (ЭС) ОЭ – более 48 тыс. км. [9]; ЭС САРРС – 70507 км [6]; ЭС СРС – 9799.4 км [3]; ЭС ПРС – 46725.44 км [4] и ЭС УРС – 9186 км [8]. При этом нормативный срок эксплуатации электросетевой структуры рассматриваемых компаний, превысило, соответственно: для ЭС ОЭ – 71.27% и 72.94%; для СРС – 36.2% и 21.82%, для ПРС – 79.4% и 49.9% и для УРС – 70.9% и 59.67% всего электрооборудования.¹ Таким образом, уровень износа и старения основного оборудования весьма существенен.



Рисунок 1 - Территориальное расположение ПАО “Россети Волга”

Figure 1 – Territorial location of PJSC “Rosseti Volga”

Тем не менее, баланс по передачи электрической энергии в сетях исследуемых компаний за период 2020-2024 гг. показывает значительные объемы транспорта ЭЭ по электрическим сетям исследуемых филиалов ПАО “Россети Волга” (рис. 2).

Характеристика повреждаемости ПАО “Россети Волга”. Уровень повреждаемости исследуемых электрических сетей произведен на основе опубликованной информации в открытой печати [2]. Анализ (рис. 3) показал, что за весь исследуемый период в исследуемых ЭС произошло всего 67240 аварийных отключений. При этом на долю ОЭ приходится 42.88% (28836 отк.); САР РС – 11.82% (7949 отк.); СРС – 21.15% (14221 отк.); ПРС – 15.9% (10696 отк.) и УРС – 8.24% (5538 отк.).

Самым “повреждаемым” месяцем года за исследуемый период для

¹ Первая цифра соответствует электросетевому оборудованию (трансформаторные подстанции и коммутационные устройства); вторая – линиям электропередачи

сетей ОЭ является июнь – 10.64% всех повреждений; для СарРС: декабрь – 18.9%; для СРС: декабрь – 12.27%; для ПРС: октябрь – 38.39% и УРС: апрель – 10.65%.

Рассмотрим какова ситуация с последствиями аварийных отключений за рассматриваемый период в исследуемых сетях.

На рисунке 4 представлены зависимости изменения количества недоотпущенной ЭЭ в результате произошедших отказов.

Следует отметить, что уровень недоотпуска для представленных компаний (кроме компании ОЭ) исследовался в более обширных временных промежутках. Так, для СарРС и СРС – с 2018 по 2022 гг., для ПРС и УРС – 2018-2023 гг.

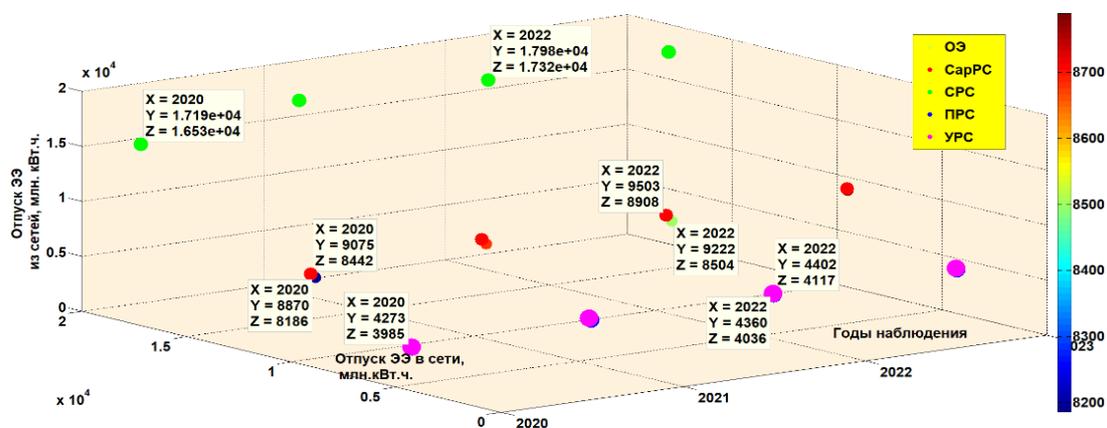


Рисунок 2 – Баланс по передаче ЭЭ по сетям исследуемых компаний

Figure 2 – Balance of electricity transmission across the networks of the companies under study

Общий объем недоотпущенной потребителям ЭЭ в электрических сетях рассматриваемых компаний за указанные периоды времени, составил 8275.5518 тыс. кВт.ч.

При этом, на долю ОЭ приходится 17.8% всего недоотпуска, на долю СарРС – 22.56%, СРС – 25.42%, ПРС – 17.83% и УРС – 16.39%. Как видно электрические сети компании СРС по последствиям отказов находятся на первом месте. При этом, сети ОЭ, имеющие наибольшую повреждаемость (почти 43% всех отключений) по величине недоотпуска ЭЭ занимают предпоследнее место. Вместе с этим следует отметить, что за весь период наблюдений в исследуемых ЭС произошло два случая, когда возникшие аварийные отключения повлекли за собой недоотпуск ЭЭ более 100 тыс. кВт.ч. Такие события отказов произошли в сетях компании СРС: январь 2018 г. (358.109308 тыс. кВт.ч.), февраль 2018 г. (105.723041 тыс. кВт.ч.); в сетях СарРС – март 2022 г. (131.9 тыс. кВт.ч.) и сети ОЭ – апрель 2023 г. (293.4 тыс. кВт.ч.). Такие отказы, повлекшие гигантский ущерб от перерыва электроснабжения, можно назвать супер-интенсивными отказами (*Super intensive failure*). Безусловно, это достаточно большая редкость, но при анализе повреждаемости ЭС встречаются и высокоинтенсивные отказы

(High-intensity failure), в результате которых перерыв электроснабжения приводит к недоотпуску ЭЭ от 10 тыс. кВт.ч до 100 тыс. кВт.ч. За весь период наблюдения по всем сетям произошло 57 таких отказа, в результате которых недоотпуск электроэнергии составил 1316.37137 тыс. кВт.ч.

Таким образом из всего количества отказов за исследуемый период (67240 отк.), повлекших общий недоотпуск ЭЭ почти 8276.6 тыс. кВт.ч, на долю всего 0,0855% высокоинтенсивных, *HIF*-отказов приходится почти 16% все недопоставленной электроэнергии., а с учетом всего 4 *SIF* – отказов эта величина составляет уже 26.65%.

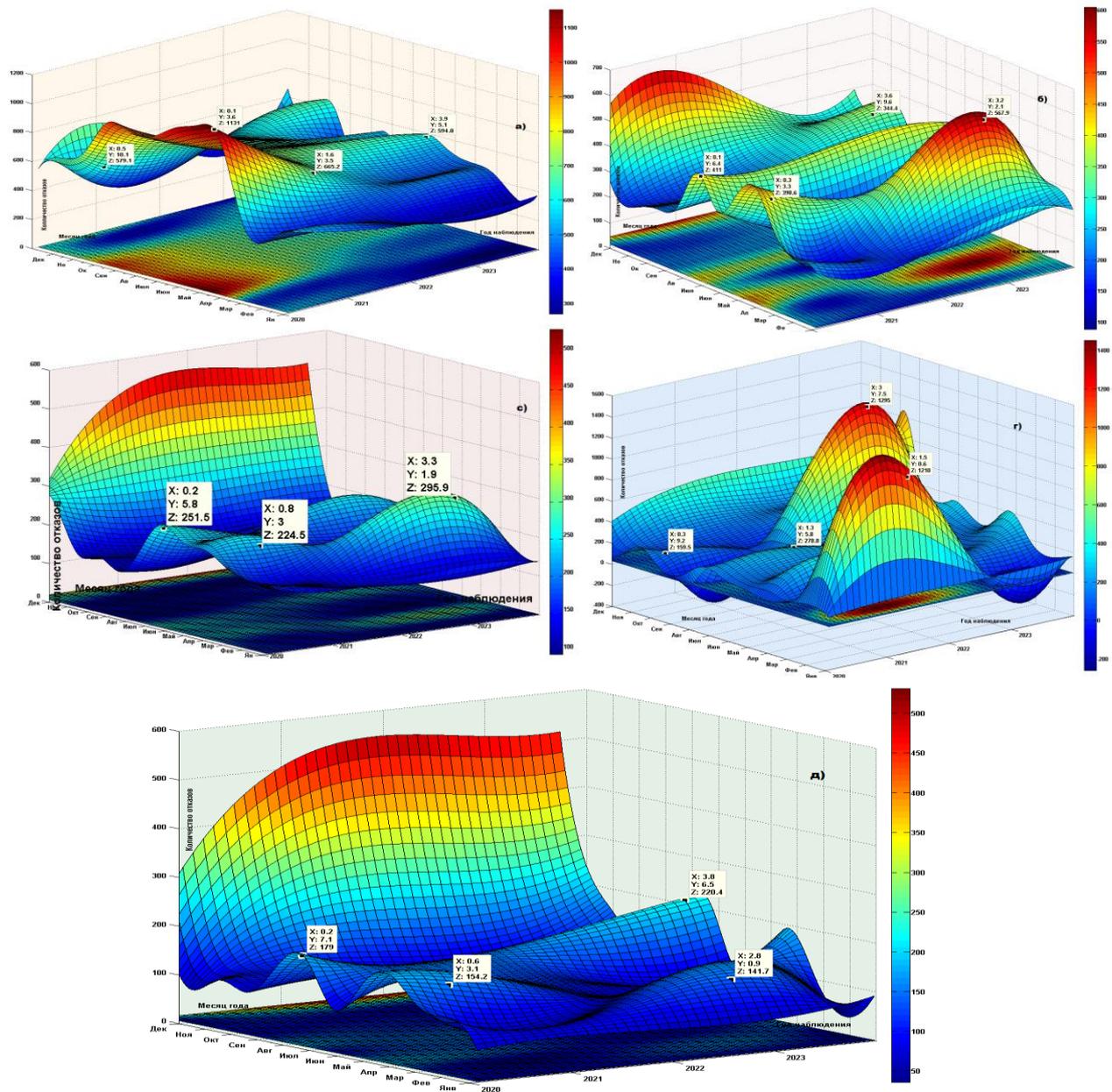


Рисунок 3 – Изменение количества отказов в сетях ПАО “Россети Волга” за 2020-2023 гг.: а) ОЭ, б) СарРС, в) СРС, г) ПРС, д) УРС

Figure 3 – Change in the number of failures in the networks of PJSC “Rosseti Volga” for 2020-2023: а) OE, б) SarRS, в) SRS, д) PRS, д) URS

На этот факт, по моему мнению, руководство компании ПАО “Россети Волга” должен обратить внимание.

Изучение причин возникновения аварийных отключений, позволило установить, что основными группами причин, объединяющих несколько совокупных событий, являются следующие:

1 – несоблюдение технического обслуживания: несвоевременное выявление и устранение дефектов, а также неудовлетворительное техническое состояние оборудования (старение изоляции, потеря механической прочности провода, изменение свойств матер. и т.д);

2 причина – наброс посторонних предметов на ВЛ, проезд крупногабаритной техники;

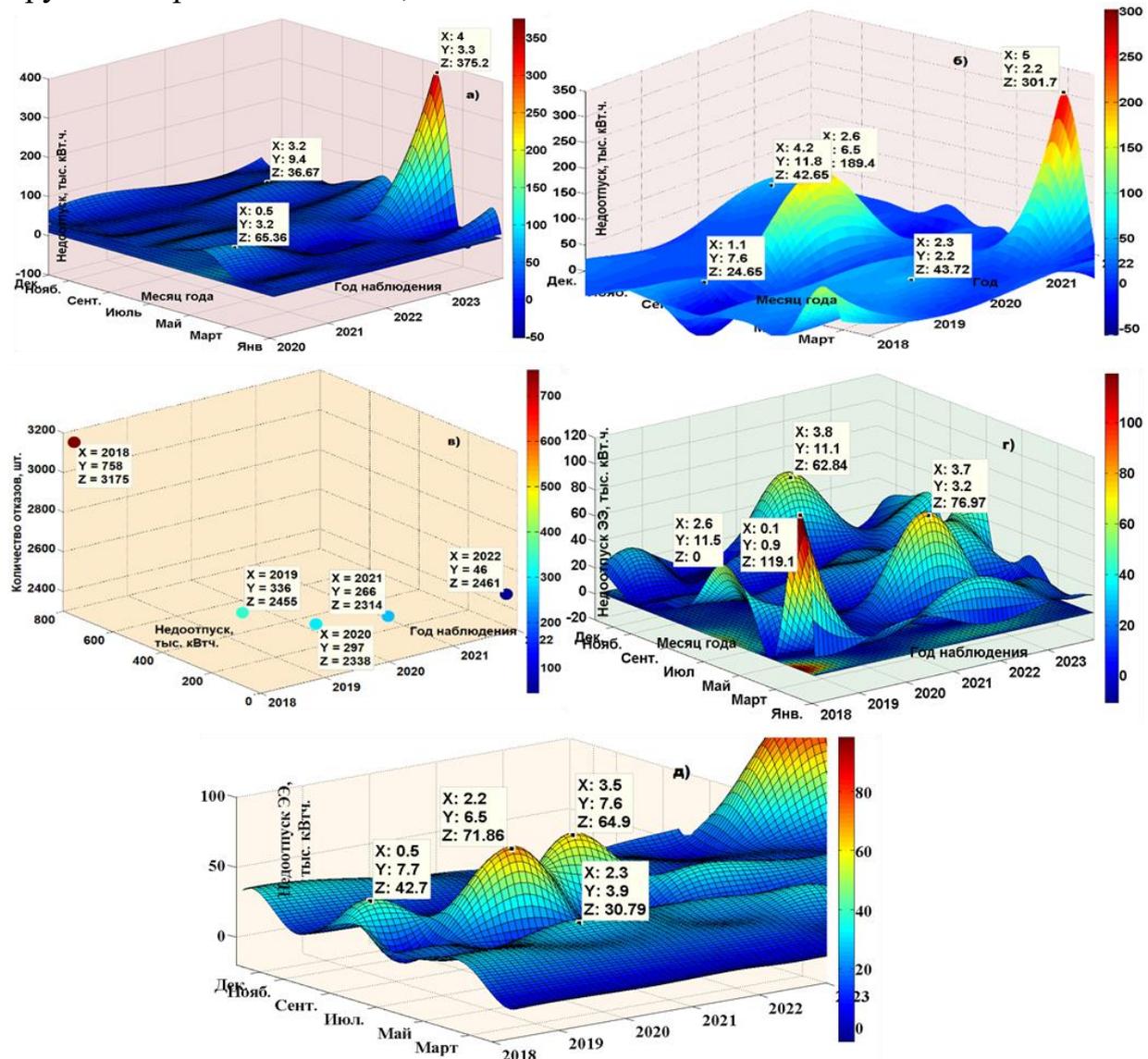


Рисунок 4 – Изменение количества недопоставленной электроэнергии по электрическим сетям ПАО “Россети Волги” за период 2018-2023 гг.

Figure 4 – Change in the amount of undelivered electricity across the electric networks of PJSC “Rosseti Volga” for the period 2018-2023.

3 – воздействие организаций, участвующих в тех-нологическом процессе: отключение (повреждение) оборудования потребителей электрической энергии;

4 – воздействие животных и птиц, попадание инородных предметов;

5 – воздействие повторяющихся стихийных явлений: ветровые нагрузки, атмосферные перенапряжения, гроза;

6 причина – недостатки конструкции, не выявленные причины.

В качестве примера изменения состоявшихся событий отказов, рассмотрим причины аварийных отключений для филиала компании ПАО “Россети Волга” – Ульяновских распределительных сетей (рис. 5).

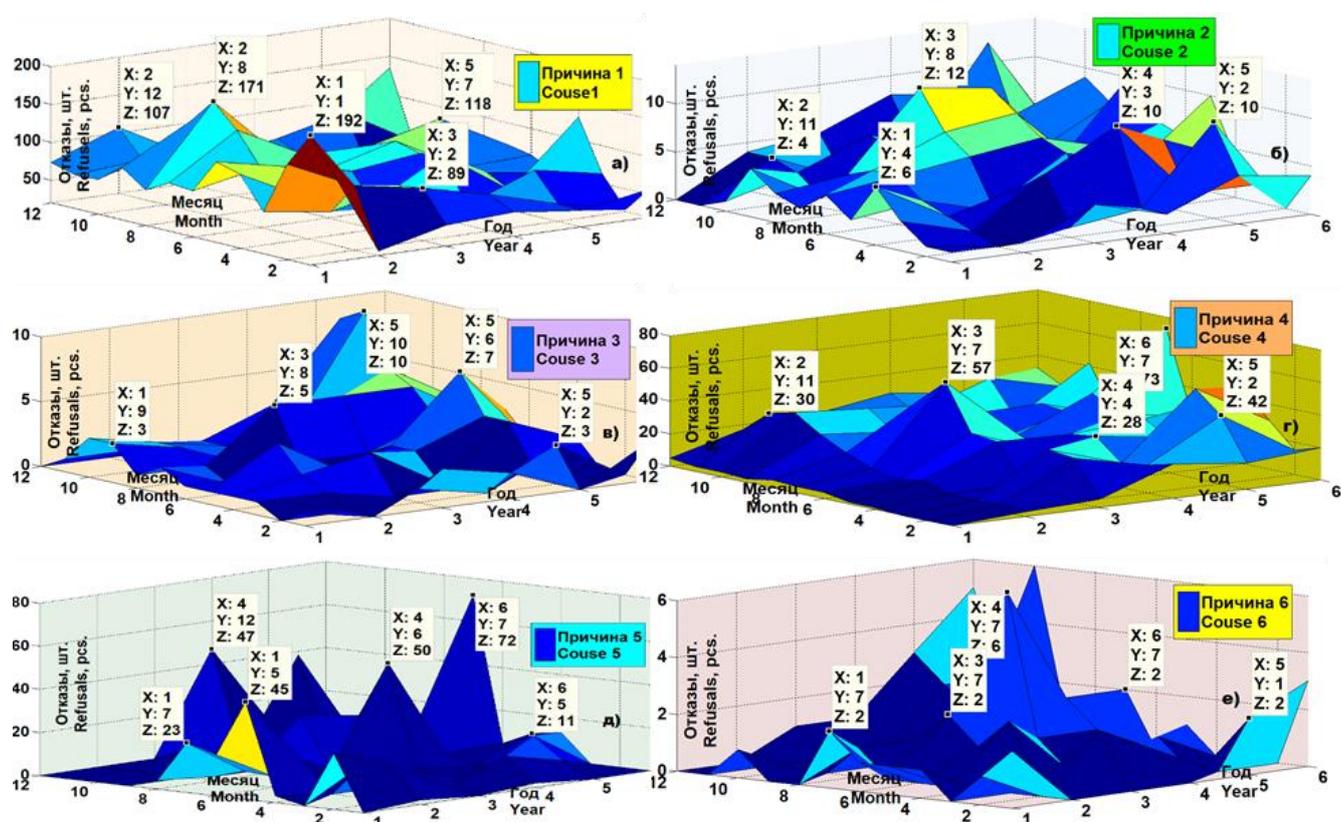


Рисунок 5 – Изменение количества отказов по установленным причинам в электрических сетях Ульяновских распределительных сетей за период

Figure 5 – Change in the number of failures due to established reasons in the electrical networks of the Ulyanovsk distribution networks for the period

Анализ повреждаемости УРС по причинам произведен за период 2018-2023 гг. На рисунке 5 отмечено: порядковое изменение чисел по оси “X” от 1 до 6 соответствует изменению по годам – с 2018 по 2023 гг., а изменение чисел по оси “Y” от 1 до 12 – соответствующему изменению по месяцам года с января по декабрь.

Анализ полученных диаграмм показал следующее. За период 2018-2023 гг. всего произошло 8306 событий отказов. При этом наибольшее количество (68.64%) произошло по *первой* причине, совокупные характеристики так или иначе связаны с износом основных элементов электрических сетей. Из общего количества отказов по этой причине (5701 шт.) произошло в 2018 и 2019 гг. – 20.8% и 21%, соответственно. В последующие годы отказы по этой причине распределились следующим образом: 2020 – 15.2%; 2021 – 15.96%; 2022 – 13.16%; 2023 – 13.86%. При этом наиболее “повреждаемыми” месяцами года по этим причинам является весенне-летний период (апрель, май, июнь, июль и август). Усредненное количество повреждений, приходящихся на долю каждого месяца для этого периода, составляет 9.34% (в среднем по 532 отк.).

Общее снижение отказов по этой причине свидетельствует о том, что руководство компании уделяет значительное внимание проведению запланированных ПАМ, что выражается в своевременной замене изношенных конструктивных частей элементов электрических сетей, а также производства реконструкционных работ, связанных с перетяжкой проводов воздушных ЛЭП, регулированием стрел провеса, а также выравнивания опор ЛЭП.

Второй по значимости группой являются причины, связанные с загрязнением электроустановок продуктами жизнедеятельности животных и птиц, (*четвертая* группа причин). На долю этих причин приходится почти 18% всех отказов (1495 событий). При этом менее всего таких отказов приходилось на 2018 г. – 1.87% (28 отк.), а более всего в 2023 г. – 26.15% (391 шт.). Наибольшее количество повреждений по этой причине происходило в *июле* месяце (13.51% – 202 отказа), наименьшее – в *январе* (4.35% – 65 отк.).

Аналогичный анализ произведен для остальных компаний, в результате которого установлено, что наибольшее количество отказов произошло по 5 группе, а минимальное по 6 группе причин.

Выводы. 1. Уровень повреждаемости исследуемых электрических сетей компании ПАО “Россети Волга” во многом зависит от состояния электрических сетей филиалов. Определяющим является период эксплуатации исследуемых сетей, который в большинстве превышает нормативный срок эксплуатации более, чем на 65%.

2. Разработка противоаварийных мероприятий руководством компании не всегда согласуется с анализом предшествующей информации о состоянии функционирования электрических сетей. Этот вывод вытекает из повторяющихся особенностей аварийных отключений по каждой из исследуемых филиалов компании.

3. Наибольшее внимание руководства ПАО должно быть обращено на последствия суперинтенсивных отказов и отказов повышенной интенсивности. Поскольку установленное количество недопоставленной

электроэнергии в период таких отказов может достигать более 25% всего недоотпуска за весь период наблюдений.

4. Наиболее значимой причиной возникновения отказов в исследуемых электрических сетях является группа событий, связанных с повторяющимися стихийными явлениями.

Список литературы

1. Годовой отчёт Публичного акционерного общества “Россети Волга” за 2023 год. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rossetivolga.ru/i/files/2024/6/21/go_osseti_volga_2023.pdf (дата обращения: 19.09.2024).

2. Наумов, И.В. Особенности электропередачи в распределительных электрических сетях (на примере филиала ПАО “Россети Волги” – “Ульяновские распределительные сети”) / И.В. Наумов // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – Том 9. – №1 (35). – С. 118-126. DOI: 1710.25744/genb.2024.55.33.017.

3. Наумов, И.В. Причины аварийности в распределительных электрических сетях (на примере филиала ПАО “Россети Волги” – “Саратовские распределительные сети”) / И.В. Наумов // Надежность и безопасность энергетики. – 2024. – Т.17, № 2. – С. 88-97.

4. Наумов, И.В. Прогностическая оценка функционального состояния электрических сетей (на примере филиала ПАО “Россети Волги” – “Самарские распределительные сети”) / И.В. Наумов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2024. – Т.17. – №1. – С. 92-106.

5. Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2021-2027 годы / Приказ Министерства энергетики Российской Федерации №88 от 26 февраля 2021 г. [Электронный ресурс]. – Режим допуска: <https://www.rosseti-sib.ru/potrebitelyam/territory/obshchie-dannye-po-pokazatelyam-avariynosti-v-setyakh-do-1-kv/> (дата обращения: 08.02.2024).

6. ПАО “Россети Волга”. Техническое состояние сетей. Режим доступа: <https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/territoriy/filialoaoom/tehnichesk/> (дата обращения: 21.09.2024).

7. Репетюк, С.В. Экспертно-аналитическая записка по теме: “Электросетевой комплекс Российской Федерации: анализ состояния и организационная структура” /С.В. Репетюк // [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://em.ranepa.ru/files/docs/research/2020_133_ex_sum_1.pdf (дата обращения: 08.02.2024).

8. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Пензенской области [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pandia.ru/text/77/499/5412-2.php> (дата обращения: 21.05.2024).

9. Энергосистема Оренбургской области. Обосновывающие материалы. [Электронный ресурс].

References

1. Godovoj otchyot Publichnogo akcionernogo obshchestva “Rosseti Volga” za 2023 god [Annual report of Public Joint Stock Company Rosseti Volga for 2023]. https://www.rossetivolga.ru/i/files/2024/6/21/go_osseti_volga_2023.pdf (date of application: 19.02.2024).

2. Naumov, I.V. Osobennosti elektroperedachi v raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah (na primere filiala PAO “Rosseti Volgi” – “Ul'yanovskie raspredelitel'nye seti”) [Features of power transmission in distribution electric networks (on the example of the branch of PJSC Rosseti Volga – Ulyanovsk Distribution Networks)]. Groznenskiy estestvennonauchnyj byulleten', vol. 9, no.1 (35), pp. 118-126. DOI: 1710.25744/genb.2024.55.33.017.

3. Naumov, I.V. Prichiny avarijnosti v raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah (na primere filiala PAO “Rosseti Volgi” – “Saratovskie raspredelitel'nye seti”) [Causes of accidents in distribution electric networks (using the example of a branch of PJSC Rosseti Volga - Saratov Distribution Networks)]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 88-97.

4. Naumov, I.V. Prognosticheskaya ocenka funkcional'nogo sostoyaniya elektricheskikh setej (na primere filiala PAO “Rosseti Volgi” – “Samarskie raspredelitel'nye seti”) [Prognostic assessment of the functional state of electric networks (on the example of the branch of PJSC Rosseti Volga - Samara Distribution Networks)]. ZHurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii, 2024, vol.17, no. 1, pp. 92-106.

5. Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya Edinoj energeticheskoy sistemy Rossii na 2021-2027 gody [On approval of the scheme and program for the development of the Unified Energy System of Russia for 2021-2027]. <https://www.rosseti-sib.ru/potrebitelyam/territoriy/obshchie-dannye-po-pokazatelyam-avariynosti-v-setyakh-do-1-kv/> (date of issue: 08.02.2024).

6. PAO “Rosseti Volga”. Tekhnicheskoe sostoyanie setej [PJSC Rosseti Volga. The technical condition of the networks]. <https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/territoriy/filialoam/tehnichesk/> (date of application: 21.09.2024).

7. Repetyuk, S.V. Ekspertno-analiticheskaya zapiska po teme: “Elektrosetevoj kompleks Rossijskoj Federacii: analiz sostoyaniya i organizacionnaya struktura” [Expert and analytical note on the topic: "The electric grid complex of the Russian Federation: analysis of the state and organizational structure"]. https://em.ranepa.ru/files/docs/research/2020_133_ex_sum_1.pdf (date of application 08.02.2024).

8. Skhema i programma perspektivnogo razvitiya elektroenergetiki Penzenskoj oblasti [Scheme and program for the long-term development of the electric power industry of the Penza region]. <https://pandia.ru/text/77/499/5412-2.php> (date of application: 21.05.2024).

9. Energosistema Orenburgskoj oblasti. Obosnovyuyushchie materialy [The energy system of the Orenburg region. Substantiating materials]. [electronic resource].

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе полученных данных. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the planning, execution and analysis of this study. All authors of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

История статьи / Article history

Дата поступления в редакцию / Received: 26.09 2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 08.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторах

Сведения об авторе:

Наумов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского и Иркутского национального исследовательского технического университета, засл. раб. ВО РФ.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 89246088990, e-mail: professornaumov@list.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4767-0127>.

Соболева Алина Эдуардовна – студентка 3 курса Института энергетики ИРНИТУ.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “Иркутский национальный исследовательский технический университет”, 664074, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Information about the authors:

Igor V. Naumov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky and Irkutsk National Research Technical University, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, pos. Molodezhny, tel. 89246088990, e-mail: professorsnaumov@list.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4767-0127>.

Alina E. Soboleva – 3rd year student of the Institute of Energy, Irkutsk National Research Technical University.

Contact information: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk Region, Russia, Irkutsk, 83 Lermontov str.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-31-38

УДК 631.33.021

Научная статья

К ВОПРОСУ ПОВРЕЖДЕНИЯ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

И.А. Сусликов, А.В. Кузьмин

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

Аннотация. Рассматриваемый вопрос – это комплексная проблема, которая должна быть подвергнута теоретическому анализу с целью выявления значимых факторов, что в дальнейшем приведет к снижению потерь. Наиболее опасны потемнения мякоти, которые являются результатом ударов с рабочими органами. Это подчеркивает значимость ударных нагрузок на клубень. В клубне при ударе появляются волны деформаций мякоти, состоящих из двух составляющих: вертикальной и горизонтальной. Вертикальная – это деформации сжатия и направлена по оси клубня, а горизонтальная – это деформация расширения в поверхностных слоях клубня. В итоге мы имеем непростую картину давлений. При свободном падении клубня его максимальная потенциальная энергия будет равна сумме кинетической энергии клубня в начале удара и работы силы тяжести. Взаимодействие клубней с органами для сепарации представляет несвободный удар. В качестве основы для исследования процессов, которые происходят внутри клубня при несвободном ударе, можно представить как систему в виде однородного упругого стержня. Повреждаемость клубней зависит не только от воспринимаемых ими ударных нагрузок, но и от особенностей сорта, таких как форма, внутреннее строение, степень зрелости и других.

Ключевые слова: картофель, волны Релея, повреждаемость клубней, ударные нагрузки.

Для цитирования: Сусликов И.А., Кузьмин А.В. К вопросу повреждения клубней картофеля от воздействия ударных нагрузок. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3(52):31-38. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-52-31-38.

ON THE ISSUE OF DAMAGE TO POTATO TUBERS FROM THE IMPACT OF SHOCK LOADS

Ivan A. Suslikov, Aleksandr V. Kuzmin

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

Abstract. The issue under consideration is a complex problem that should be subjected to theoretical analysis in order to identify the most significant factors, which will further lead to a decrease in losses. The most dangerous are darkening of the pulp, which are the result of impacts with working bodies. This emphasizes the importance of impact loads on the tuber. In the tuber, upon impact, waves of pulp deformations appear, consisting of two components: vertical and horizontal. The vertical is the compression deformation and is directed along the tuber axis, and the horizontal is the expansion deformation in the surface layers of the tuber. As a result, we have a complex picture of pressures. During a free fall of a tuber, its maximum potential energy will be equal to the sum of the kinetic energy of the tuber at the beginning of the impact and the work of gravity. The interaction of tubers with separation organs is a non-free impact. As a basis for studying the processes that occur inside the tuber during a non-free impact, we can imagine a system in the form of a homogeneous elastic rod. The damageability of tubers depends not only on the impact loads they can withstand, but also on the characteristics of the variety, such as shape, internal structure, maturity, etc.

Key words: potato, Rayleigh waves, tuber damage, impact loads.

For citation: Suslikov I.A., Kuzmin A.V. On the issue of damage to potato tubers from the impact of shock loads. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 3 (52):31-38. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-52-31-38.

Введение. В настоящее время в РФ происходит определенный прогресс в сельскохозяйственной отрасли для внедрения современных достижений науки в процессы производства, переработки и реализации продукции. Например, в Иркутской области проводятся исследования по разработке и применению моделей оптимизации производства растениеводческой продукции [7, 8, 10, 14, 15]. Кроме того, осуществляются исследования в картофелеводстве региона [3]. Картофель – это распространенная сельскохозяйственная культура, как для России, так и для других стран [1, 5, 16]. В России картофелем занято более 1000000 га и производится более 30 млн тонн продукции [2]. Картофель собирают с помощью специальных машин в сложных условиях, которые не способствуют эффективности уборки картофеля. Данные различных исследований показывают [11, 12], что эффективность сепарации недостаточна и сопровождается повреждаемостью клубней. Повреждение клубней – комплексная проблема, которая должна быть подвергнута теоретическому анализу с целью выявления наиболее значимых факторов, что в дальнейшем приведет к снижению механических потерь на практике.

Целью работы является выявления наиболее значимых факторов повреждений клубней картофеля от ударных нагрузок.

Материалы и методы. Объект исследований представляет собой технологический процесс уборки картофеля. Нами сделан анализ литературы и внимательно рассмотрены процессы повреждения клубней.

Результаты исследования. Повреждения клубней представлены в виде вмятин и различных разрезов. Встречаются также обдир кожуры, вырывы, потемнения мякоти и другие виды повреждений. Согласно данным литературы [12, 16], большая часть повреждений бывает в виде потемнений мякоти глубиной до 5 мм (рис.). Потемнения мякоти клубней происходят в результате окисления полифенолов, которые имеются в клубне, при ударных механических повреждениях [16]. Такие клубни имеют меньший срок хранения, больше подвержены болезням, ухудшаются их пищевые качества.

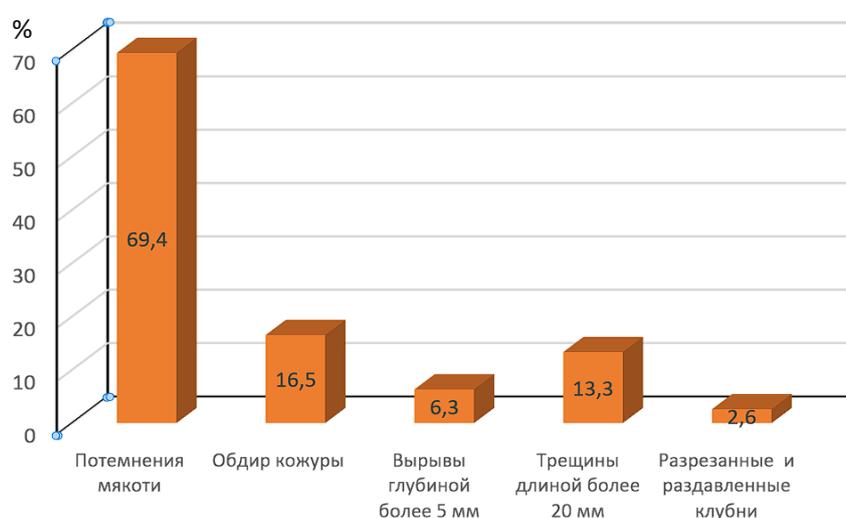


Рисунок 1 – Процентное соотношение видов повреждений клубней, встречающихся при уборке картофеля с помощью комбайна

Figure – The percentage of types of damage to tubers encountered when harvesting potatoes using a combine harvester

На перепадах и на сепарирующих органах повреждаются до 95% всех поврежденных клубней [11]. Это подчеркивает значимость величины ударов по клубню.

В исследованиях различных авторов [4, 11] представлено, что при уборке комбайном клубень подвергается в среднем 7 статическим и 84 динамическим нагрузкам. Таким образом, исследование динамических взаимодействий клубней с рабочими органами во время уборки является необходимым для понимания того, как происходит повреждение клубня картофеля.

Согласно данным В.Г. Гагулиной [5], во время удара в клубне мы имеем два вида деформаций мякоти.

Это происходит за счет различной плотности слоев клубня, а именно, внешнего и сердцевины. В результате удара возникает сложное поле давлений, которое изменяется не только от точки к точке, но и в каждой

точке. Также имеет место отражение волны сжатия от поверхности контакта тел. Поверхностями контакта являются наружные оболочки, сосудистые пучки, стенки клеток и крахмальные зерна. В результате ударных волн появляются пластические волны деформации. Весь процесс, таким образом, можно изучать.

А.И. Бжезовская [2] предлагает клубень представлять в виде системы, подверженной свободным колебаниям. Тогда при горизонтальном ударе формула определения максимальной силы взаимодействия между телами P_{\max} будет иметь следующий вид:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\delta},$$

где ε_{\max} – максимальная деформация двух тел,

δ – деформация при единичной нагрузке на клубень

Максимальная потенциальная энергия Π_{\max} , в этом случае, будет равна:

$$\Pi_{\max} = \frac{1}{2} P_{\max} \varepsilon_{\max}.$$

Окончательно получим:

$$\Pi_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}^2}{\delta}.$$

При свободном падении клубня его максимальная потенциальная энергия будет равна сумме кинетической энергии клубня в начале удара и работа силы тяжести в процессе деформации:

$$\Pi_{\max} = T + G\varphi_{\text{дин}},$$

где $\varphi_{\text{дин}}$ – максимальная динамическая деформация

G – сила тяжести.

Окончательно получим:

$$\Pi_{\max} = \frac{\varphi_{\text{дин}}^2}{2\delta}.$$

Максимальная же динамическая деформация будет равна:

$$\varepsilon_{\max} = \varphi_{\text{ст}} + \sqrt{\varphi_{\text{ст}}^2 + 2\delta T}.$$

Тогда максимальная сила удара P_{\max} будет равна:

$$P_{\max} = \frac{\varphi_{\text{дин}}}{\delta} = G + \sqrt{G_{\text{ст}}^2 + \frac{2T}{\delta}}.$$

Рассмотренные расчеты выше актуальны для тех моментов времени, когда клубни движутся на перепадах от одного рабочего органа к другому. Если рассматривать движения клубней на сепарирующих рабочих органах, то тут наблюдается явления несвободного удара.

По данным литературы [2], в качестве основы для исследования процессов, которые происходят внутри клубня при несвободном ударе, можно представить как систему в виде однородного упругого стержня. За время $\Delta t = \frac{T}{4}$, когда изгиб достигнет величины s , поперечная деформация будет распространена, как вверх, так и вниз на длину l . Скорость удара в этом случае будет равна:

$$v = \omega s,$$

где ω - частота колебаний.

Тогда скорость распространения деформации будет равна:

$$c = \omega l.$$

Отсюда, скорость удара с учетом скорости распространения деформации будет равна:

$$vc = \omega^2 sl.$$

Сила P в данном случае сообщается только массе полуволны, поэтому

$$P = \frac{1}{2} m \omega^2 s,$$
$$m = 2\gamma F l,$$

где γ – плотность, F – площадь поперечного сечения.

Следовательно:

$$P = 2\gamma F l \omega^2 s = \gamma F c \omega.$$

Следует отметить, что повреждаемость клубней зависит не только от воспринимаемых ими ударных нагрузок, но и от площади контакта, особенностей сорта - форма, внутреннее строение, степень зрелости, упругость и многих других [9, 11, 12, 13]. Поэтому исследование повреждаемости клубней в каждом отдельном случае будет иметь свои особенности.

Вывод. Анализ процесса механических повреждений клубней при ударе может быть рассмотрен разными способами, например, как система, совершающая свободные колебания, так и система, состоящая из одного или нескольких упругих стержней, испытывающих несвободный удар. При этом необходимо учитывать характеристики сорта, а именно форма, степень зрелости и другие факторы.

Список литературы

1. Актуальные проблемы и приоритетные направления развития картофелеводства / А.В. Коршунов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2018. №3 (32). – С. 12-20. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-problemy-i-prioritetnye-napravleniya-razvitiya-kartofelevodstva> (дата обращения: 17.09.2024).
2. Бжезовская, А.И. Исследование сопротивления клубней картофеля механическим повреждениям, вызываемыми динамическими нагрузками: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / А.И. Бжезовская. – Минск, 1970.
3. Бурлов, С.П. Бабр – перспективный сорт картофеля / С.П. Бурлов, Н.И. Большешапова // В сб.: Климат, экология и сельское хозяйство Евразии: матер. XII междунар. научно-практ. конф. п. Молодежный, 2023. – С. 21-27.
4. Верещагин, Н.И. Динамические характеристики клубней картофеля / Н.И. Верещагин // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ, 2007. – № 3. – С. 69-76.
5. Гагулина, В.Г. Исследование причин повреждения клубней картофеля при посадке вычерпывающим аппаратом и изыскание способов их снижения: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / В.Г. Гагулина. – Ленинград, 1980.
6. Девяткина, Л.Н. Производство картофеля: глобальные и национальные дискуссии / Л.Н. Девяткина. – Вестник НГИЭИ, 2018. – № 5 (84). – С. 122-134. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_34908652_97586800.pdf – 18.09.2024.
7. Иваньо, Я.М. Моделирование потенциала производства растениеводческой продукции в условиях неопределенности / Я.М. Иваньо, Л.С. Ананьев // Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”, 2024. – 2 (51). – 47-59. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-47-59.
8. Иваньо, Я.М. Об оптимизации размещения посевов сельскохозяйственных культур в изменчивых условиях внешней среды / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, М.Н. Полковская // Научно-практический журнал “Вестник ИрГСХА”. 2022; 4 (111). – С.19-30.
9. Кушнарев, А.Г. Картофель в Забайкалье / А.Г. Кушнарев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 232 с.
10. Мартемьянова, А.А. Ценогическая активность горца растопыренного в совместных агрофитоценозах Предбайкалья / А.А. Мартемьянова, Ш.К. Хуснидинов, Н.Н. Дмитриев // Научно-практический журнал “Вестник ИрГСХА”, 2022;4 (111). – С. 31-41.
11. Остроумов, С.С. Направления развития картофелеуборочных машин с целью снижения повреждаемости картофеля / С.С. Остроумов, А.В. Кузьмин, М.К. Бураев. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2014. – 227 с.
12. Остроумов, С.С. Результаты полевых испытаний нового картофелеуборочного комбайна / С.С. Остроумов // Вестник ИрГСХА. – 2009. – Вып. 36. – С. 86-92.
13. Петров, Г.Д. Картофелеуборочные машины / Г.Д. Петров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с.
14. Поляков, Г.Н. Комплекс машин и орудий для возделывания зерновых культур в ранних сроках посева / Г.Н. Поляков, С.Н. Шуханов, А.В. Косарева, Д.А. Яковлев // Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”, 2024 – 2(51) – С. 26-35. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-26-35.
15. Поляков, Г.Н., Совершенствование технологии и технических средств возделывания зерновых культур / Г.Н. Поляков, С.Н. Шуханов, А.В. Косарева // Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”, 2023 – 3(48). – С. 25-33. DOI 10.51215/2411-6483-2023-(3)48-25-33.
16. Саврасова, Н.Р. Анализ контактного динамического взаимодействия клубня картофеля с поверхностью / Н.Р. Саврасова. – Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – № 1-2. – С. 493-498. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kontaktного-dinamicheskogo-vzaimodeystviya-klubnya-kartofelya-s-poverhnostyu/viewer> – 28.09.2024.

17. Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minobrnauki.gov.ru/about/deps/dkdovssn/federalnaya-nauchno-tekhnicheskaya-programma-razvitiya-selskogo-khozyaystva-na-2017-2025-gody/> (дата обращения: 18.09.2024).

References

1. Aktual'nye problemy i prioritetye napravleniya razvitiya kartofelevodstva [Actual problems and priority areas for the development of potato growing]. <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-problemy-i-prioritetnye-napravleniya-razvitiya-kartofelevodstva> (date of access: 09/17/2024).

2. Bzhezovskaya, A.I. Issledovanie soprotivleniya klubnej kartofelya mekhanicheskim povrezhdeniyam, vyzyvayemymi dinamicheskimi nagruzkami [Study of resistance of potato tubers to mechanical damage caused by dynamic loads]. Cand.Diss., Minsk, 1970.

3. Burlov, S.P., Bolsheshapova, N.I. Babr – perspektivnyj sort kartofelya [Babr is a promising potato variety]. Molodezhny, 2023, pp. 21-27.

4. Vereshchagin, N.I. Dinamicheskie karakteristiki klubnej kartofelya [Dynamic characteristics of potato tubers]. Vestnik FGOU VPO MGAU, 2007, no. 3, pp. 69-76.

5. Gagulina, V.G. Issledovanie prichin povrezhdeniya klubnej kartofelya pri posadke vycherpyvayushchim apparatom i izyskanie sposobov ih snizheniya [Study of the causes of damage to potato tubers during planting with a scooping device and finding ways to reduce them]. Cand.Diss., Leningrad, 1980.

6. Devyatkina, L.N. Proizvodstvo kartofelya: global'nye i nacional'nye diskusy [Potato production: global and national discuss]. https://elibrary.ru/download/elibrary_34908652_97586800.pdf – 18.09.2024.

7. Ivan'o, Ya.M., Ananyev, L.S. Modelirovanie potentsiala proizvodstva rastenievodcheskoj produkcii v usloviyax neopredelennosti [Modeling the potential of crop production under conditions of uncertainty]. “Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki”, 2024, no. 2 (51), pp. 47-59. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-47-59.

8. Ivano, Ya.M. et all. Ob optimizacii razmeshcheniya posevov sel'skohozyajstvennyh kul'tur v izmenchivyh usloviyakh vneshnej sredy [On optimizing the placement of crops in variable environmental conditions]. Vestnik IrGSHA, 2022; no.4 (111), pp. 19-30.

9. Kushnarev, A.G. Kartofel` v Zabajkal'e [Potatoes in Transbaikalia]. Novosibirsk: Nauka, 2003, 232 p.

10. Martemyanova, A.A. et all. Cenoticheskaya aktivnost' gorca rastopyrennogo v sovместnyh agrofитocenozah Predbaikal'ya [Cenotic activity of the mountaineer spread in the joint agrophytocenoses of the Pre-Baikal region]. Vestnik IrGSHA, 2022, no. 4 (111), pp. 31-41.

11. Ostroumov, S.S. et all. Napravleniya razvitiya kartofeleuborochnykh mashin s cel'yu snizheniya povrezhdaemosti kartofelya [Directions for the development of potato harvesting machines to reduce potato damage]. Irkutsk, 2014, 227 p.

12. Ostroumov, S.S. Rezul'taty` polevy`x ispy`tanij novogo kartofeleuborochnogo kombajna [Results of field tests of a new potato harvester]. Vestnik IrGSHA, 2009, n. 36, pp. 86-92.

13. Petrov, G.D. Kartofeleuborochny`e mashiny` [Potato harvesters]. Moscow: Mechanical Engineering, 1984, 320 p.

14. Polyakov, G.N. et all. Kompleks mashin i orudij dlya vozdeley`vaniya zernovy`x kul'tur v rannix srokax poseva [A complex of machines and tools for cultivating grain crops in the early stages of sowing]. “Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki”, 2024, no. 2(51), pp. 26-35. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-26-35.

15. Polyakov, G.N. et all. Sovershenstvovanie texnologii i texnicheskix sredstv vozdeley`vaniya zernovy`x kul'tur [Improvement of technology and technical means of cultivation of grain crops].

“Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki”, 2023, no. 3(48), pp. 25-33. DOI 10.51215/2411-6483-2023-(3)48-25-33.

16. Savrasova N.R. Analiz kontaktnogo dinamicheskogo vzaimodejstviya klubnya kartofelya s poverhnost'yu [Analysis of contact dynamic interaction of potato tuber with surface]. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kontaktnogo-dinamicheskogo-vzaimodeystviya-klubnya-kartofelya-s-poverhnostyu/viewer> – 09/28/2024.

17. Federal'naya nauchno-tehnicheskaya programma razvitiya sel'skogo hozyajstva na 2017-2025 gody [Federal scientific and technical program for the development of agriculture for 2017-2025]. <https://minobrnauki.gov.ru/about/deps/dkdovssn/federalnaya-nauchno-tehnicheskaya-programma-razvitiya-selskogo-khozyaystva-na-2017-2025-gody/> (date of access: 09/18/2024)

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the planning, execution and analysis of this study. All authors of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

История статьи / Article history

Дата поступления в редакцию / Received: 30.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 10.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторах

Сусликов Иван Александрович – аспирант кафедры “Технический сервис и общетеоретические дисциплины” инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел. 89041379149, e-mail: markovnik1998@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-5018-4027>

Кузьмин Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры “Технический сервис и общетеоретические дисциплины” инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел. 89503835361, e-mail: Kuzmin_burgsha@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5669-2232>

Information about authors

Suslikov Ivan Aleksandrovich – postgraduate student of the department of “Technical service and general technical disciplines” of the Engineering faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. tel. 89041379149, email: markovnik1998@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-5018-4027>

Kuzmin Aleksandr Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the department of “Technical service and general technical disciplines” of the Engineering faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. tel. 89503835361, email: Kuzmin_burgsha@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5669-2232>



DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-39-48

УДК 62-65

Научная статья

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

¹И.Ю. Шелехов, ¹В.А. Бугаев, ¹Д.А. Пиксаев, ²И.В. Алтухов

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет
г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты применения современных методов отопления в зданиях сельскохозяйственного назначения. Показано, что для увеличения эффективности работы систем отопления целесообразно применять теплоаккумуляционный метод обогрева с отопительными приборами инфракрасного действия. Исследования проводились в здании, которое занимается переработкой сельскохозяйственной продукции и состоит из трех помещений: цех переработки, склад и комната для персонала. Для этого использовался измерительный стенд, созданный на основе прибора фирмы “ОВЕН” ТРМ-138. Результаты измерений конвертировались в графический вид с помощью программного обеспечения “OWEN PROCES SMANAGER (OPM)”. При проведении исследований измерялась температура воздушной среды и температура радиационного излучения для того, чтобы определить параметры теплоощущений человека, находящегося в данном помещении. Во время экспериментов контролировались параметры ограждающих конструкций и теплоёмких предметов, находящихся в помещении. Натурные исследования показали, что при использовании данного метода улучшаются параметры микроклимата на 30–45% и снижаются энергетические затраты более, чем на 40%. Внедрение новых технических решений, которые создаются на основе последних научных достижений российских ученых, помогут не только снизить энергетические затраты при содержании и обслуживании помещений сельскохозяйственного назначения, но и обеспечат благоприятные условия труда. Применение инновационных методов отопления, методик расчёта таких систем при проектировании инженерных коммуникаций в зданиях сельскохозяйственного назначения требует подготовки специалистов способных применять на практике современные технологии и технические средства.

Ключевые слова: энергетические затраты, здания сельскохозяйственного назначения, энергоэффективность, инфракрасное отопление, теплоёмкость, параметры теплоощущений.

Для цитирования: Шелехов И.Ю., Бугаев В.А., Пиксаев Д.А., Алтухов И.В. Энергоэффективные методы отопления зданий сельскохозяйственного назначения. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3 (52):39-48. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-39-48.

ENERGY EFFICIENT METHODS OF HEATING AGRICULTURAL BUILDINGS

¹Igor Yu. Shelekhov, ¹Vladislav A. Bugaev, ¹Dmitry A. Piksaev, ²Igor V. Altukhov

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk Region, Russia

Abstract. The article presents the results of applying modern heating methods in agricultural buildings. It is shown that in order to increase the efficiency of heating systems, it is advisable to use the heat accumulation heating method with infrared heating devices. The studies were conducted in a building that processes agricultural products and consists of three rooms: a processing shop, a warehouse, and a staff room. For this purpose, a measuring stand based on the “OWEN” TRM-138 device was used. The measurement results were converted into a graphical form using the OWEN PROCES SMANAGER (OPM) software. During the studies, the air temperature and the temperature of radiation were measured in order to determine the parameters of heat sensations of a person in a given room. During the experiments, the parameters of enclosing structures and heat-intensive objects located in the room were monitored. Field studies have shown that using this method improves microclimate parameters by 30–45% and reduces energy costs by more than 40%. The introduction of new technical solutions, which are created on the basis of the latest scientific achievements of Russian scientists, will help not only to reduce energy costs in the maintenance and servicing of agricultural premises, but will also provide favorable working conditions. The use of innovative heating methods, calculation methods for such systems in the design of utility lines in agricultural buildings requires training specialists capable of applying modern technologies and technical means in practice.

Keywords: energy costs, agricultural buildings, energy efficiency, infrared heating, heat capacity, heat sensation parameters.

For citation: Shelekhov I.Yu., Bugaev V.A., Piksaev D.A., Altukhov I.V. Energy efficient methods of heating agricultural buildings. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 3 (52):39-48. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-39-48.

Введение. Здания сельскохозяйственного назначения отличаются своей спецификой по отношению к зданиям, применяемых для производства промышленной продукции. В течение рабочего времени в зданиях сельскохозяйственного назначения необходимо поддерживать усредненные параметры микроклимата, при которых работники не испытывают дискомфорта при выполнении своих трудовых обязанностей, при этом, не оказывается негативное воздействие на перерабатываемые сельскохозяйственные продукты.

Целью данного исследования является улучшения микроклимата и снижение затрат на отопления сельскохозяйственных помещений. При оценке стоимости перерабатываемой продукции львиная доля финансовых затрат расходуется на обслуживание и эксплуатацию производственных

помещений: освещение, отопление, водоснабжение и канализация. При этом затраты на отопление преобладают над другими энергетическими затратами, поэтому, необходимо внедрять энергосберегающие мероприятия в этой области. С учетом того, что, в соответствии Российского законодательства, производственный процесс осуществляется в течение 8 часов и в этот период времени необходимо поддерживать заданный температурный режим. В течение последующих 16 часов в здании нет обслуживающего персонала, но, понижение температуры воздуха в этот период времени не приносит экономического эффекта, так как ограждающие конструкции здания имеют большую теплоёмкость и не могут быстро остывать и нагреваться, в конечном итоге, данные мероприятия негативно сказываются на параметрах микроклимата в начале рабочего периода времени.

Методы исследования. Обзор научной литературы показал, что экономию энергетических ресурсов при эксплуатации здания можно получить путем применения объемно-пространственного метода распределения тепловой энергии внутри помещения, при этом необходимо учитывать аккумуляционные характеристики здания, системы отопления и массивных предметов, находящихся внутри помещения [3].

Кроме этого, необходимо использовать инфракрасные системы отопления для того, чтобы локализовано распределять тепловую энергию по всему объёму помещения [2, 11], при этом, необходимо учитывать все теплотехнические процессы, которые осуществляются в помещении [1, 4]. Также многие авторы в своих работах отмечают, что в зависимости от самих характеристик инфракрасных систем отопления [6] и от системы рационального управления их работой [8, 10] можно получить значительную экономию тепловой энергии [7].

Основные результаты. Исследования проводились на предприятии, которое занимается переработкой сельскохозяйственной продукции, производит мясные деликатесы. Производственный процесс осуществляется в трех типах помещений: цех переработки размером 10 x 50 м², складское помещение размером 3 x 5 м² и комната для персонала размером 3 x 4 м². Отопление данных помещений осуществлялось с помощью центральной системы отопления, технологический процесс при осуществлении отопления не учитывался. Для обеспечения благоприятных условий труда мы сменили основную задачу централизованной системы отопления, переведя её в режим “дежурного отопления”. В режиме дежурного отопления в помещении поддерживаются такие климатические параметры при которых в ограждающих конструкциях поддерживается температура, при которой не достигается “точка росы” и обеспечиваются максимальные теплоизоляционные свойства.

Основные параметры микроклимата в помещении поддерживаются с помощью комбинированных приборов отопления, где регулируется конвективная и радиационная теплоотдача [5]. Температура нагрева воздуха

и температура нагрева радиационного излучения в комбинированном приборе отопления регулируется двумя датчиками температуры. Первый датчик контролирует температуру воздуха в помещении, а второй датчик температуры контролирует температуру предметов, находящихся в помещении.

Параметры теплощущений людей, находящихся в помещениях, измерялись в соответствие штатных методик с помощью измерительного стенда изготовленного на базе прибора компании “ОВЕН” ТРМ138, совместно с прибором поставлялось программное обеспечение OWEN PROCES SMANAGER(OPM), с помощью которого данные преобразовывались в графический вид, который позволял оценивать качество создаваемых климатических условий.

До проведения мероприятий по изменению системы отопления в исследуемых помещениях, были осуществлены измерения параметров распределения температурных полей в исследуемых помещениях, которые приведены на рисунках 1-3.

Аналогичные измерения параметров распределения температурный полей были осуществлены после модернизации системы отопления, результаты исследований приведены на рисунках 4-6.

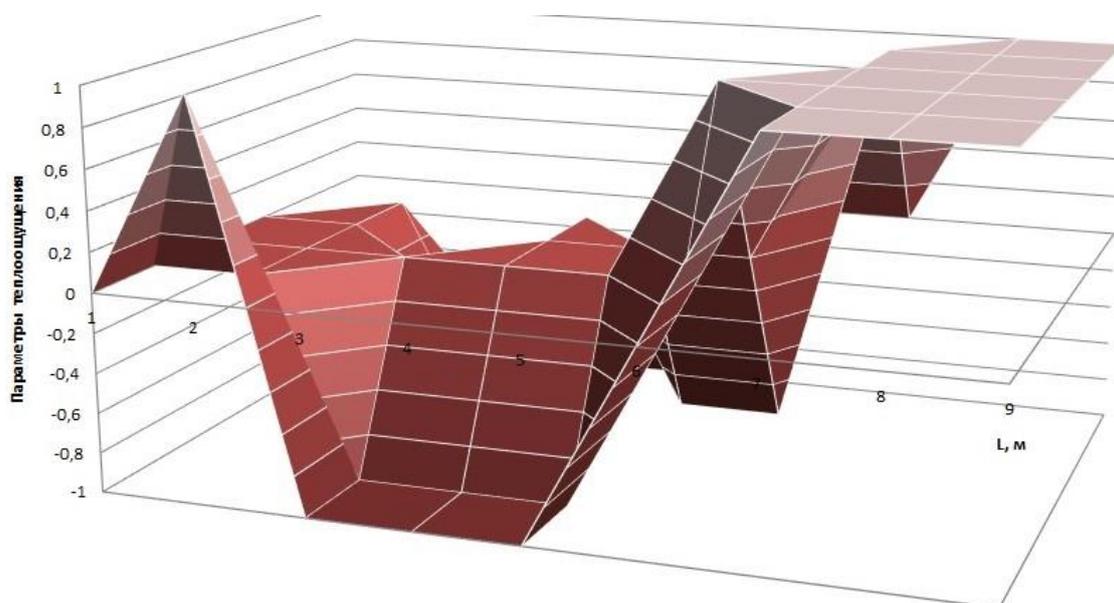


Рисунок 1 – Распределение температурных полей в цеху переработки при использовании старой системы отопления

Figure 1 – Distribution of temperature fields in the processing shop using the old heating system

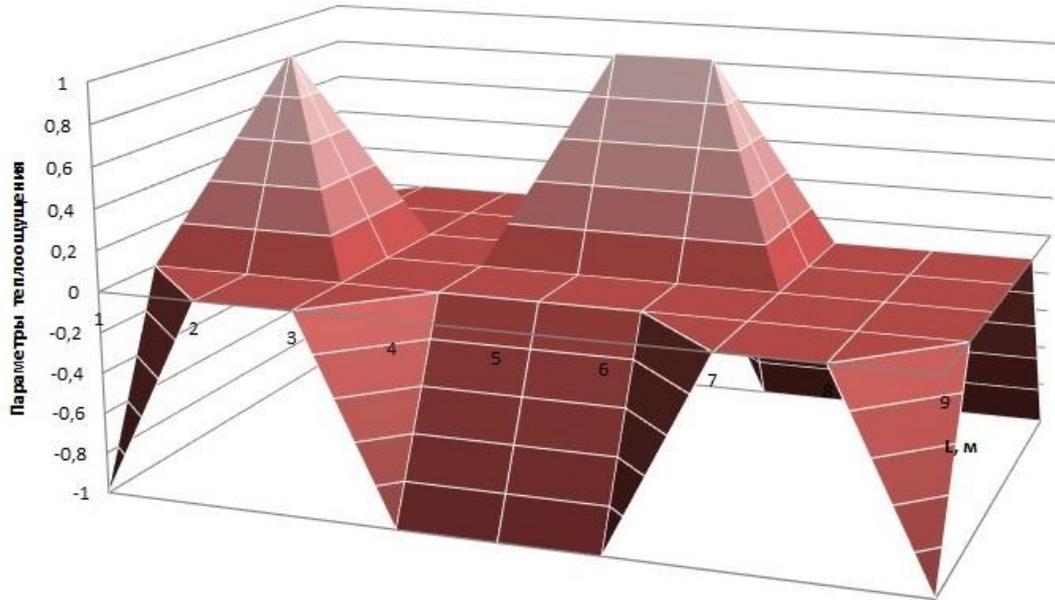


Рисунок 2 – Распределение температурных полей в складском помещении при использовании старой системы отопления

Figure 2 – Distribution of temperature fields in a warehouse using an old heating system

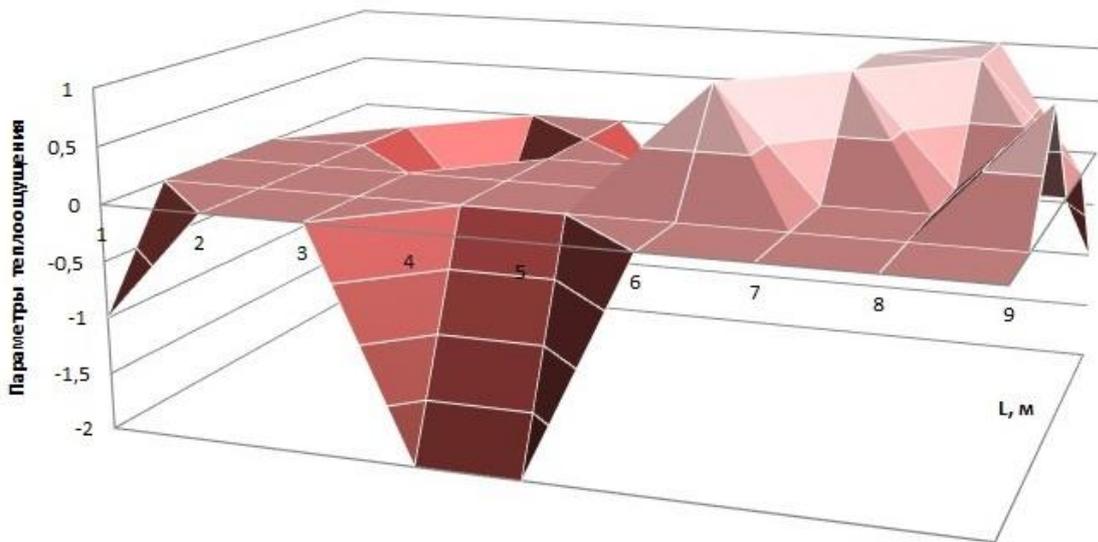


Рисунок 3 – Распределение температурных полей в комнате для персонала при использовании старой системы отопления

Figure 3 – Distribution of temperature fields in the staff room using the old heating system

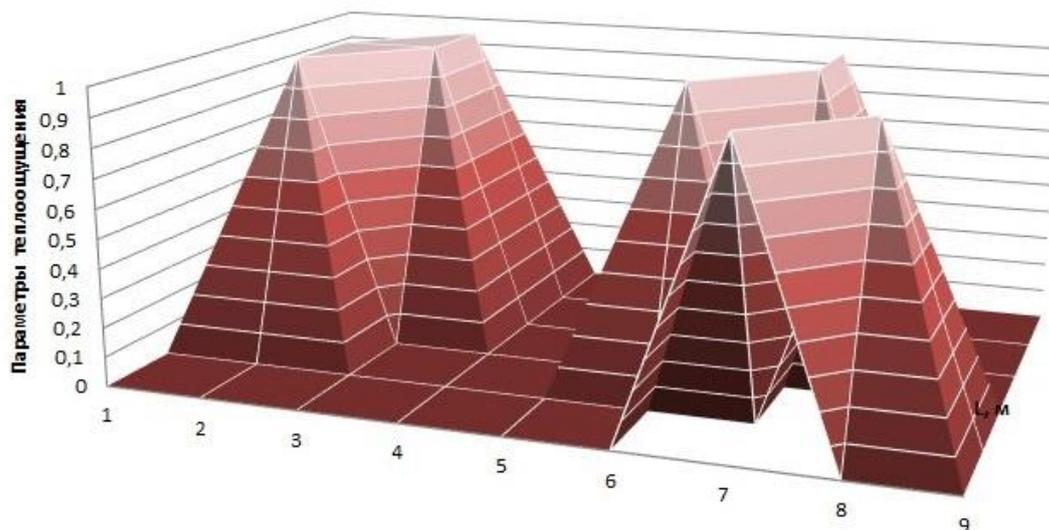


Рисунок 4 – Распределение температурных полей в цеху переработки после модернизации системы отопления

Figure 4 – Distribution of temperature fields in the processing shop after the modernization of the heating system

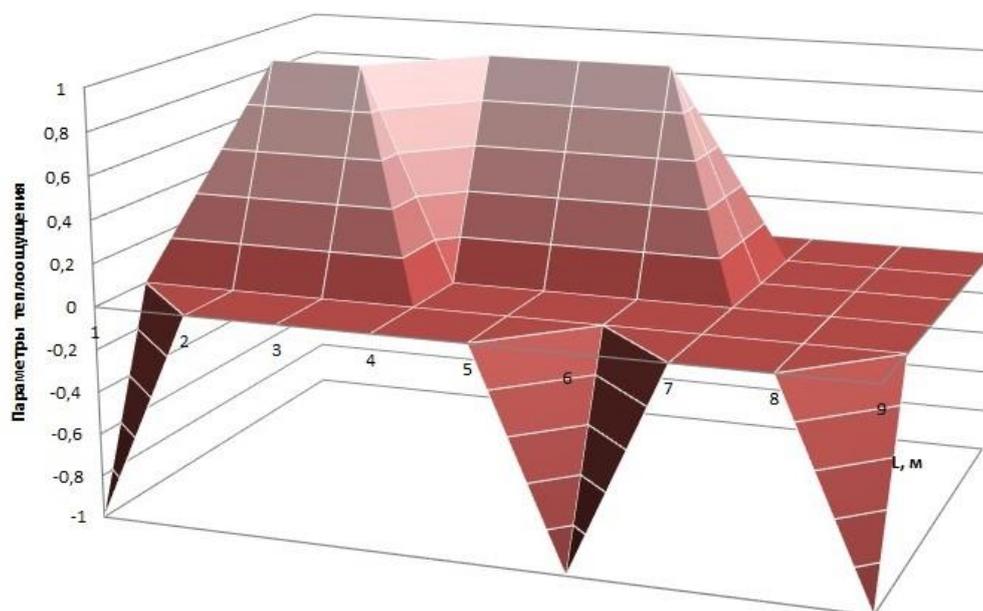


Рисунок 5 – Распределение температурных полей в складском помещении после модернизации системы отопления

Figure 5 – Distribution of temperature fields in a warehouse after upgrading the heating system

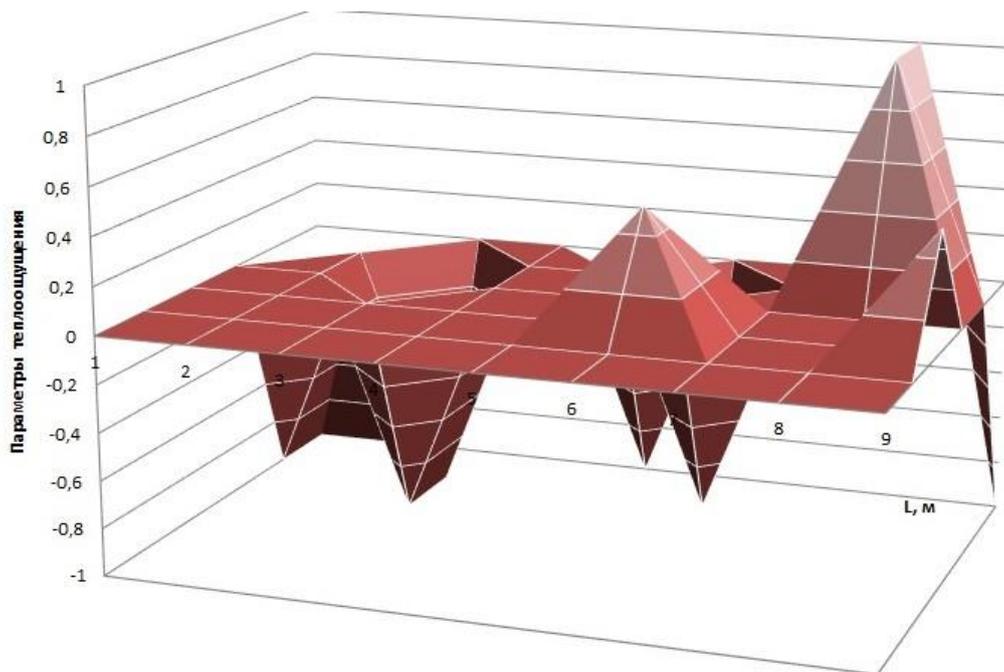


Рисунок 6 – Распределение температурных полей в комнате для персонала после модернизации системы отопления

Figure 6 – Distribution of temperature fields in the staff room after the heating system upgrade

Исследования показали, что в цехе переработки параметры микроклимата улучшились на 45%, в складском помещении параметры микроклимата улучшились на 30%, в комнате для персонала параметры микроклимата улучшились на 40%.

Выводы. Оценка энергетической эффективности принятых технических решений показало, что в денежном выражении затраты на обогрев помещений снизились более чем на 40%. Так, при использовании штатной, центральной системы отопления в марте 2022 года за отопление и за систему кондиционирования помещений финансовые затраты составили 268 тысяч рублей. После установки новой системы поддержания заданных параметров микроклимата в марте 2023 года за поддержание климатических параметров в заданных параметрах финансовые затраты составили сумму 185 тысяч рублей. Окупаемость внедрения нового метода отопления помещений составляет 1.5 месяцев.

Данные методы управления температурными параметрами в различных типах помещений широко применяются во всем мире, в России накоплен большой теоретический и практический опыт в этой области [9]. При широком внедрении данного опыта можно обеспечить не только благоприятные условия труда на предприятиях сельскохозяйственного назначения, но и уменьшить себестоимость продукции, а также увеличить её качество

Список литературы

1. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов / В.Н. Богословский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа. – 1982. – 415 с.
2. Карницкий, В.Ю. Инфракрасное отопление и эффективный вид отопления / В.Ю. Карницкий, В.С. Ушников / Известия Тульского государственного университета. – №12-3. – 2016. – С. 96-98.
3. Мацевитый, Ю.М. Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий / Мацевитый Ю.М., Ганжа Н.Г., Хименко А.В. // Научные журналы НТУ "ХПИ": Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – №10 – НТУ "ХПИ". – 2011. ISSN 2218-1849.
4. Шелехов, И.Ю. Аддитивные инфракрасные системы обогрева / И.Ю. Шелехов, В.В. Пожидаев / Журнал “Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость”. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2020. – Т. 10. – № 1 (32). – С. 124-129
5. Шелехов, И.Ю. Патент на полезную модель № 177507. Нагревательный прибор для комбинированной системы обогрева помещений с низкой теплоизоляцией. 16.12.2016 / И.Ю. Шелехов, И.В. Шелехова, М.И. Шелехов, Е.И. Смирнов, В.П. Иноземцев, К.П. Кашко.
6. Шелехов, И.Ю. Эффективная конструкция нагревательного элемента для инфракрасного обогрева / И.Ю. Шелехов, Т.И. Шишелова, В.П. Иноземцев, В.В. Пожидаев // Журнал “Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость”. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2016. – № 3 (18). – С. 118-124.
7. Щелоков, А.И. Сравнительный анализ эффективности теплоснабжения объектов ЖКХ / А.И. Щелоков, Е.Б. Филатова // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 206-212.
8. Экономический эффект от применения инфракрасных обогревателей. Расчет затрат. [Электронный ресурс] URL: <http://www.teplo.ufakit.ru/?partid=56> (дата обращения: 07.09.2024).
9. Shelekhov, I. et all. Application of energy-efficient methods in heating systems of industrial and public buildings. MATEC Web of Conferences. electronic edition, 2018, pp. 02003.
10. Shelekhov, I.Yu. Electric microclimate system for frame structures. AIP Conference Proceedings. IV International Scientific Conference “Investments. Construction. Real Estate: New Technologies and Targeted Development Priorities 2021” (ICRE-2021). Irkutsk, 2022, pp. 030018.
11. Shelekhov, I.Yu., Shelekhov, M.I. Optimization of microclimate parameters in tent-frame buildings. Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2022. Switzerland, 2023, pp. 330-339.

Referenses

1. Bogoslovsky, V.N. Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha) [Construction thermal physics (thermophysical foundations of heating, ventilation and air conditioning)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982, 415 p.
2. Karnitsky, V.Yu., Ushnikov, V.S. Infekrasnoe otoplenie i effektivnyj vid otopleniya [Infrared heating and efficient type of heating]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, no. 12-3, 2016, pp. 96-98.
3. Matsevit, Yu.M. et all. Ocenka energeticheskoy effektivnosti sistem elektroteploakkumuljacionnogo otopleniya administrativnyh zdaniy [Assessment of energy efficiency of electric heat storage heating systems of administrative buildings]. Nauchnye zhurnaly NTU "HPI": Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit, no. 10, 2011.

4. Shelekhov, I.Yu., Pozhidaev, V.V. Additivnye infrakrasnye sistemy obogreva [Additive infrared heating systems]. Zhurnal “Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost”, Irkutsk: Izd-vo, 2020, vol. 10, no. 1 (32), pp. 124-129.

5. Shelekhov, I.Yu. et all. Patent na poleznuyu model' № 177507. Nagrevatel'nyj pribor dlya kombinirovannoj sistemy obogreva pomeshchenij s nizkoj teploizolyaciej. 16.12.2016 [Patent for utility model No. 177507. Heating device for a combined system of heating rooms with low thermal insulation. 12/16/2016].

6. Shelekhov, I.Yu. et all. Effektivnaya konstrukciya nagrevatel'nogo elementa dlya infrakrasnogo obogreva [Efficient design of a heating element for infrared heating]. Zhurnal “Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost”. – Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2016, no. 3 (18), pp. 118-124

7. Shchelokov A.I., Filatova E.B. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti teplosnabzheniya ob"ektov ZHKKH [Comparative analysis of the efficiency of heat supply to housing and communal services facilities]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki, 2011, no. 2, pp. 206-212.

8. Ekonomicheskij effekt ot primeneniya infrakrasnyh obogrevatelej. Raschet zatrat [Economic effect from the use of infrared heaters. Cost calculation. [Electronic resource]. <http://www.teplo.ufakit.ru/?partid=56> (date of access: 09/07/2024).

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе полученных данных. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the planning, execution and analysis of this study. All authors of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

История статьи / Article history:

Дата поступления в редакцию / Received: 27.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 09.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторах

Шелехов Игорь Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства ИРНТУ.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “Иркутский национальный исследовательский технический университет”, 664074, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, тел. 89025660323, e-mail: promteplo@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>.

Бугаев Владислав Александрович – аспирант кафедры городского строительства и хозяйства ИРНТУ.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “Иркутский национальный исследовательский технический университет”, 664074, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, тел. 89836952152, e-mail: anbuga123@inbox.ru.

Пиксаев Дмитрий Алексеевич – аспирант кафедры городского строительства и хозяйства ИРНТУ.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “Иркутский национальный исследовательский технический университет”, 664074, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, тел. 89501111087, e-mail: Dpiksaev12@mail.ru.

Алтухов Игорь Вячеславович – доктор технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией “Энергосбережение в электротехнологиях” Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 89500505500, e-mail: altukhigor@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4638-5842>.

Information about authors

Igor Yu. Shelekhov – Candidate of Technical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Construction and Management, Irkutsk National Research Technical University.

Contact information: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk Region, Russia, Irkutsk, 83 Lermontov str., tel. 89025660323, e-mail: promtep-lo@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>.

Vladislav A. Bugaev – postgraduate student of the Department of Urban Construction and Economy, Irkutsk National Research Technical University.

Contact information: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk Region, Russia, Irkutsk, 83 Lermontov str., tel. 89836952152, e-mail: anbuga123@inbox.ru.

Dmitry A. Pixaev – postgraduate student of the Department of Urban Construction and Management, Irkutsk National Research Technical University.

Contact information: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk Region, Russia, Irkutsk, 83 Lermontov str., tel. 89501111087, e-mail: Dpiksaev112@mail.ru.

Igor V. Altukhov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the scientific research laboratory "Energy Saving in Electrical Technologies", Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, pos. Molodezhny, tel. 89500505500, e-mail: altu-khigor@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4638-5842>.



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

**INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING, MANAGEMENT,
MATHEMATICAL MODELING**

DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-49-61

УДК 519.855

Научная статья

**ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ РЕГИОНА**

А.Ю. Белякова, Т.С. Бузина, Я.М. Иваньо

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

Аннотация. Ввиду специфики и неопределенности многих факторов в сельском хозяйстве разработан широкий спектр моделей и методов, применяемых для решения разнообразных задач применительно к региональным особенностям Иркутской области. Прогнозирование характеристик динамики аграрного производства региона осуществляется с использованием факторных, трендовых, авторегрессионных, а также смешанных моделей. При этом в последнее время широкое применение находят многоуровневые трендовые модели. Получены модели, описывающие зависимость урожайности от метеорологических факторов в начальный период вегетации. При этом предлагается алгоритм определения периода наибольшего влияния факторов на урожайность сельскохозяйственных культур. Свойства изменчивости производственно-экономических характеристик влияют на выбор экстремальной задачи, применяемой для управленческих решений процессов производства аграрной продукции и заготовки пищевых дикорастущих ресурсов. В этом направлении интерес вызывают многоуровневые параметрические модели, а также стохастические модели учитывающие неопределенность многих факторов. Неопределенность характеристик прикладных моделей может оцениваться вероятностными законами распределения. При этом заготовка дикоросов описывается, как правило, интервальными величинами. Помимо этого, научно-практическое значение имеют многоэтапные модели оптимизации ресурсов производства продовольственной продукции, которые позволяют определять разные варианты перспективы развития сельскохозяйственного товаропроизводителя. Среди многоотраслевых моделей можно выделить модель оптимизации сочетания производства аграрной продукции и заготовки дикоросов. Требуется расширения применения эколого-математические модели ориентированные не только на получение максимальной прибыли, но и оценки ущерба окружающей среде. Приведенный обзор методов и моделей для решения задач управления предполагает оценку состояния научных разработок в этом направлении и определение возможностей для улучшения результатов математического моделирования в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: математическое моделирование, сельское хозяйство, приложения

Для цитирования: Белякова А.Ю., Бузина Т.С., Иваньо Я.М. Прикладные аспекты применения математического моделирования в сельском хозяйстве региона. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3 (52):49-61. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-49-61.

APPLIED ASPECTS OF APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING IN AGRICULTURE OF THE REGION

Anna Yu. Belyakova, Tat'jana S. Buzina, Yaroslav M. Ivanyo

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk Region, Russia

Abstract. Due to the specificity and uncertainty of many factors in agriculture, a wide range of models and methods have been developed for solving various problems with regard to the regional characteristics of the Irkutsk region. Forecasting the characteristics of the dynamics of agricultural production in the region is carried out using factor, trend, autoregressive, and mixed models. At the same time, multi-level trend models have recently been widely used. Factor models have been obtained that describe the dependence of crop yields on meteorological factors in the initial period of vegetation. At the same time, an algorithm for determining the period of the greatest influence of factors on crop yields is proposed.

The properties of variability of production and economic characteristics affect the choice of an extreme problem for optimizing the production of agricultural products and the procurement of wild food resources. In this area, multi-level parametric models are of interest, as well as stochastic models that take into account the uncertainty of many factors. The uncertainty of production and economic characteristics is estimated by probabilistic distribution laws, and the procurement of wild food resources by interval values. In addition, multi-stage models of optimization of food production resources are of scientific and practical importance, which allow determining different options for the development prospects of an agricultural producer. Among the multi-industry models, one can single out a model for optimizing the combination of agricultural production and wild plant procurement. It is necessary to expand the use of ecological-mathematical models aimed not only at obtaining maximum profit, but also at assessing environmental damage. The given review of methods and models for solving management problems involves assessing the state of scientific developments in this area and identifying opportunities for improving the results of mathematical modeling in agriculture.

Keywords: mathematical modeling, agriculture, applications.

For citation: Belyakova A.Yu., Buzina T.S., Ivanyo Ya.M. Applied aspects of application of mathematical modeling in agriculture of the region. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 3 (52):49-61. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-49-61.

Введение. В условиях интенсивного развития сельского хозяйства прогнозирование и планирование производства сельскохозяйственной продукции играет важную практическую роль для предприятий агропромышленного комплекса. Результативность работы сельскохозяйственных производителей определяется влиянием множества природно-климатических и антропогенных факторов [1, 5, 12, 14].

Для обеспечения стабильного роста и повышения эффективности производства сельскохозяйственной продукции необходимо учитывать такие факторы, как погодные условия, тип и качество почв, доступность водных ресурсов, а также воздействие человека, включая внедрение современных

технологий и методов управления. В этом контексте применение математических моделей и методов прогнозирования становится незаменимым инструментом [19], позволяющим не только оптимизировать процессы производства, но и минимизировать риски, связанные с изменчивостью внешней среды и рыночной конъюнктурой [3, 9, 20, 23].

Многие исследователи занимались разработкой моделей для прогнозирования и оптимизации производства сельскохозяйственной продукции и заготовки пищевых дикорастущих ресурсов [4, 8, 10, 18]. Вопросы планирования и прогнозирования в этой сфере остаются актуальными из-за климатических изменений, выявления новых значимых взаимосвязей между производственно-экономическими показателями и внешними факторами, стремительного развития цифровых технологий, а также расширения возможностей производства продовольственной продукции с учётом региональных особенностей.

Целью работы является обзор математических моделей прогнозирования и планирования производства аграрной продукции для определения возможностей их развития и расширения направлений их применения.

Материалы и методы. На основе анализа экономического состояния, природных условий муниципальных районов Иркутской области и состояния перерабатывающей отрасли, а также сбора и систематизации данных о производственных параметрах аграрной деятельности предложена классификация математических моделей для производства продовольственной продукции по различным признакам. В процессе сбора информации о разработанных и применённых на практике математических моделях использованы работы различных авторов по решению многоуровневых, многоэтапных, многокритериальных задач, в том числе по управлению рисками, применительно к сельскому хозяйству.

Основные результаты. Математические модели активно используются для описания процессов в сельском хозяйстве, особенно те, которые направлены на оптимизацию производства отдельных отраслей и их комбинаций (рис. 1).

Многие производственно-экономические показатели модели могут быть описаны с помощью трендов, факторных, авторегрессионных и смешанных моделей, которые позволяют прогнозировать показатели с различной заблаговременностью, что может быть использовано для планирования производства продукции. Классификация моделей прогнозирования и планирования показана на рисунке 2.

Отметим, что в рядах, характеризующих урожайность сельскохозяйственных культур, затрат труда и цен на продовольственную продукцию, можно выявить многоуровневые тренды и аномальные уровни или события при рассмотрении ряда в виде иерархической структуры [13].

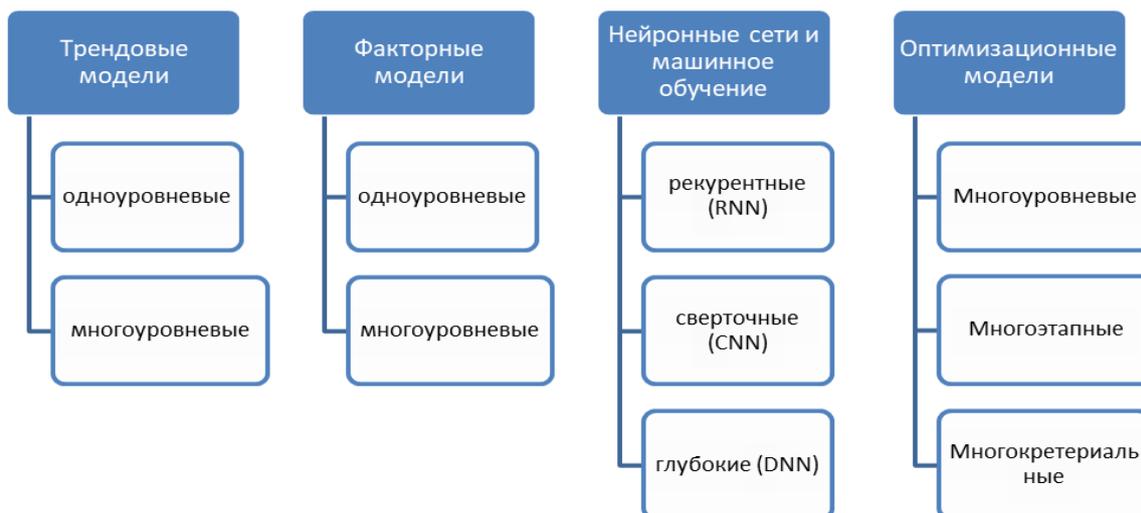


Рисунок 1 – Некоторые группы математических моделей для решения управленческих задач

Figure 1 – Some groups of mathematical models for solving management problems

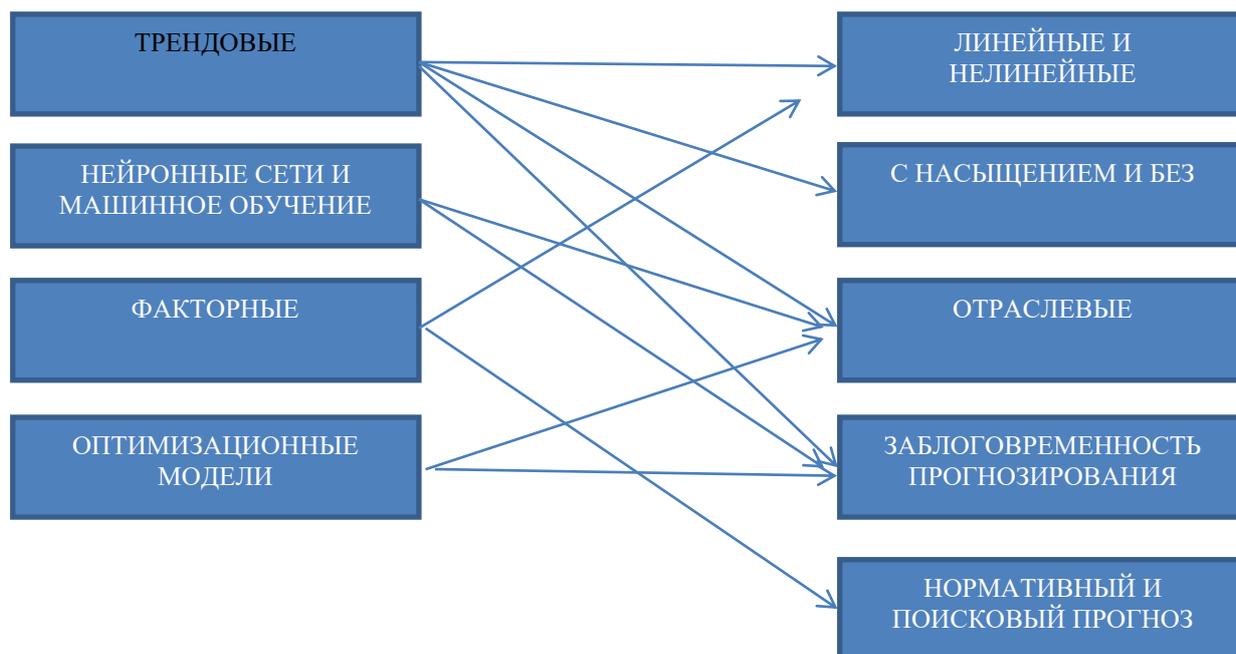


Рисунок 2 – Группы моделей прогнозирования производственно-экономических показателей, характеризующих производство аграрной продукции

Figure 2 – Groups of models for forecasting production and economic indicators characterizing the production of agricultural products

Для прогнозирования коэффициентов и правых частей ограничений математической модели можно использовать тренды. Нелинейный тренд роста с насыщением характеризуется аналитическим выражением с управляемой верхней оценкой. Исследования большого числа эмпирического материала показывают, что помимо трендов с насыщением

применимы экспоненциальная, степенная и логарифмическая функции [3, 21]. Добавим к этому, что многоуровневые модели прогнозирования описывают благоприятные, неблагоприятные и усредненные условия.

Многоуровневые модели позволяют не только прогнозировать показатели при разных условиях производства, но оценивать потери и получения дополнительной продукции, а также выявлять число благоприятных и неблагоприятных событий с оценкой их вероятности проявления. Для этого применяются законы распределения вероятностей – Пирсона III типа и трехпараметрическое степенное гамма-распределение [7, 17].

Одной из проблем при выделении трендов является определения начала тенденции. В частности, анализ рядов урожайности сельскохозяйственных культур показывает наличие точек перелома, когда тенденция спада сменяется подъемом и наоборот. В этом случае зачастую применимы линейные модели, которые описывают переломные тенденции.

Модели прогнозирования применимы в задачах параметрического программирования для планирования аграрного производства [3, 18, 21]. Такие задачи можно классифицировать по следующим признакам: неопределенности характеристик модели; срокам планирования; количеству критериев оптимальности; отраслям аграрного производства; числу уровней, количеству этапов и другим (рис. 3).



Рисунок 3 – Классификация оптимизационных моделей

Figure 3 – Classification of optimization models

Обратимся к моделям машинного обучения. В [2, 15] приведены примеры таких моделей в агропромышленном комплексе, которые применяются в различных направлениях сельского хозяйства: распознавание и подсчет плодов, управление водными и почвенными ресурсами, прогнозирование

климатических условий и мониторинг поведения животных. В работе [2] обсуждаются также возможности компьютерного зрения для определения морфометрических характеристик сельскохозяйственных животных и выявления аномальных отклонений в их поведении.

Выделим среди моделей математического программирования применительно к сельскому хозяйству:

многоуровневые;

многоэтапные;

многокритериальные.

Многоуровневые модели прогнозирования производственно-экономических показателей можно использовать в задачах оптимизации аграрного производства с функционально зависимыми параметрами. При большом ряде значений на уровне 20-25 производственно-экономический показатель можно описать трендами низких, высоких и средних уровней.

Наличие значимых трендов по статистическим критериям позволяет с определенной точностью прогнозировать показатели. Прогностические значения могут быть использованы в задачах параметрического программирования с параметром в виде времени. Если это многолетнее прогнозирование, то в качестве единицы времени используется один год. Прогнозы в зависимости от реальной ситуации могут быть краткосрочными, среднесрочными и долгосрочными. Обработка большого числа эмпирического материала показывает удовлетворительные результаты прогнозирования на краткосрочную и среднесрочную перспективы. Между тем в некоторых случаях для устойчиво работающих предприятий и муниципальных районов удается получать удовлетворительные результаты при долгосрочном прогнозировании. К этому следует добавить необходимость ежегодной корректировки прогнозов.

Прогностические данные применимы в задаче многопараметрического программирования для планирования производства продукции различных отраслей сельского хозяйства.

Отдельно решается стохастическая задача с учетом экстремальных событий, значений, которые превышают уровни верхнего тренда или находятся ниже тренда локальных минимумов. В этом случае перед определением оптимального решения рассчитываются вероятности потерь или дополнительных приобретений [13, 18]. Такие модели позволяют оценивать уровень рисков и определять варианты смягчения вероятных ущербов.

Многоэтапные модели. Одним из примеров многоэтапных оптимизационных моделей является моделирование структуры посевов с учётом предшествующих культур. На первом этапе задачи определяется оптимальный план для одной группы сельскохозяйственных культур. Затем аналогичные расчёты выполняются для других групп предшественников, повторяя процесс несколько раз. На втором этапе выбирается некоторая

группа предшественников согласно найденным оптимальным решениям. Поскольку такие многоэтапные модели включают элементы неопределённости, они относятся к категории стохастических моделей.

Использование многоэтапных моделей позволяет гибко корректировать решения в зависимости от изменения условий или поступления новой информации. Такой подход повышает качество моделирования и способствует оптимизации использования ресурсов.

Кроме того, многоэтапные модели часто включают элементы сценарного анализа, что даёт возможность оценить потенциальные риски и разработать стратегии для их минимизации. Это особенно важно в условиях изменяющегося климата и нестабильных экономических условий. Использование экспертных оценок и прогнозов также позволяет учесть субъективные факторы, которые не всегда могут быть формализованы в математических моделях, что делает процесс планирования более точным и адаптированным к реальной ситуации.

Помимо предшественников большое значение при многоэтапном моделировании имеет распределение цен по сезонам для оптимизации прибыли от произведенной сельскохозяйственной продукции по сезонам [18]. В условиях неопределенности можно использовать многоэтапную стохастическую задачу планирования развития предприятия [20].

Дополнительно к этому можно рассмотреть многоэтапные задачи с учетом многоуровневого моделирования, характеризующего разные условия деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя. Другими словами, многопараметрические и многоэтапные задачи могут быть интегрированы для оптимизации получения продовольственной продукции с учетом предшественников, условий деятельности, изменчивости цен на продукцию.

Многокритериальные модели. В процессе производства, переработки и реализации продовольственной продукции участвует множество хозяйств различных категорий, перерабатывающих и сбытовых предприятий, других организаций, интересы которых часто не совпадают. В случае, когда задачи планирования получения продовольственной продукции связаны с проблемой выбора одного из оптимальных вариантов, применимы многокритериальные оптимизационные модели [9, 10].

В работе [8] описаны и реализованы многокритериальные модели для оптимизации получения сельскохозяйственной и дикорастущей продукции с детерминированными и неопределенными параметрами.

Многокритериальные модели применимы на разных уровнях агрегирования. В частности, многоцелевое использование водохранилища адекватно может быть описано многокритериальной моделью компромиссной деятельности участников водохозяйственного комплекса в региональном масштабе [11].

Очевидно, что использование методов математического программирования предполагает создание специальных программных комплексов [6, 14, 22]. В таблице приведены наиболее удачные разработки, позволяющие решать различные управленческие задачи.

Таблица – Некоторые разработки кафедры информатики и математического моделирования для оптимизации различных планов производства продовольственной продукции

Table – Some developments of the Department of Computer Science and Mathematical Modeling for optimization of various plans for production of food products

Программный комплекс	Назначение
Многоуровневое прогнозирование показателей аграрного производства	Многоуровневое прогнозирование с помощью функций с насыщением -асимптотической и логистической.
Прогнозирование и планирование агротехнологических операций	Прогнозирование дат агротехнологических операций для разных природно-климатических условий Иркутской области
Управление рисками при планировании аграрного производства	Оценка рисков как результата климатических и техногенных событий и построения оптимальных планов для смягчения ущербов
Региональный агропромышленный кластер	Выделение агропромышленных кластеров и оптимизация взаимодействия участников кластеров
Эколого-математическое моделирование аграрного производства	Оптимизация производства сельскохозяйственной продукции на орошаемых и неорошаемых землях с учетом ущербов, нанесенных окружающей среде от эрозионных процессов и загрязнения почвы и воды

Для примера приведено пять программных комплексов: 1) по многоуровневому прогнозированию показателей аграрного производства [21], 2) прогнозированию дат агротехнологических операций и планированию производства продукции [1], 3) управлению рисками, связанными с климатическими, техногенными событиями и их сочетанием [14], 4) построению агропромышленных кластеров и их функционированию [10]; 5) оптимизации производства аграрной продукции с учетом ущербов, причиненных окружающей среде [16]. Широкий спектр разработанных приложений свидетельствует о возможности внедрения данных проектов в разные сферы сельского хозяйства.

Выводы. Выделены два направления развития моделей – прогнозирование производственно-экономических показателей и планирование получения сельскохозяйственной продукции.

Рассмотрены возможности многоуровневых трендовых моделей, позволяющих прогнозировать некоторые производственно-экономические показатели на краткосрочную и долгосрочную многолетнюю перспективу.

Проанализированы многоуровневые прикладные задачи параметрического программирования с параметром в виде времени, которые связаны с прогностическими возможностями многоуровневых трендовых моделей. Отдельно выделены стохастические задачи, позволяющие моделировать ситуации, связанные с событиями.

Приведены примеры многоэтапных и многокритериальных моделей и определены возможности их развития.

Рассмотрены программные комплексы, в которых реализованы проанализированные прикладные математические модели.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-21-00502.

Список литературы

1. Асалханов, П.Г. Прогнозирование и планирование агротехнологических операций для природно-климатических зон региона: монография / П.Г. Асалханов, Я.М. Иваньо. – Иркутск: Иркутский ГАУ, 2014. – 145 с.
2. Асалханов, П.Г. Тенденции применения систем искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / П.Г. Асалханов, Н.В. Калинин, Я.М. Иваньо // Климат, экология и сельское хозяйство Евразии: матер. XII Междунар. научно-практ. конф., п. Молодежный, 27–28 апреля 2023 года. Том II. – п. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2023. – С. 151-157.
3. Барсукова, М.Н. Об одной модели оптимизации производства аграрной продукции в благоприятных и неблагоприятных внешних условиях / М.Н. Барсукова, Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. - 2020. - № 3 (19). - С. 73-85.
4. Белякова, А.Ю. Об одной модели параметрического программирования производства аграрной продукции с учетом проявления гидрологического события / А.Ю. Белякова, Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Актуальные вопросы аграрной науки. - 2016. - № 19. - С. 41-49.
5. Белякова, А.Ю. Модели планирования производства продовольственной продукции в условиях неопределенности / А.Ю. Белякова, Т.С. Бузина // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 4(88). – С. 152-166. – EDN PPROQI.
6. Бендик, Н.В. Информационные технологии в решении задачи оптимизации аграрного производства с учетом проявления высоких паводков и половодий / Н.В. Бендик, Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 2. – С. 38-45. – EDN WGBHQR.
7. Блохинов, Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока / Е.Г. Блохинов. – М.: Наука, 1974. – 169 с.
8. Бузина, Т.С. Оптимизация взаимодействия участников кластера по получению пищевой дикорастущей продукции в регионе / Т.С. Бузина, Я.М. Иваньо, С.А. Петрова. //Лесной вестник. Forestry Bulletin. - 2020. - Т. 24. - № 4. - С. 138-149.
9. Бузина, Т.С. Многокритериальная задача оптимизации взаимодействия участников агропромышленных кластеров с интервальными параметрами / Т.С. Бузина, Я.М. Иваньо, Н.И. Федурин. – Научно-практический журнал “Вестник ИрГСХА”. – 2015. – Вып.71. – С. 115-123.
10. Бузина, Т.С. Оптимизация взаимодействия участников в региональных агропромышленных кластерах / Т.С. Бузина, Я.М. Иваньо. – Иркутск: Изд-во Иркутского ГАУ. – 2015. – 148 с.

11. Гусев, Б.П. Об одной эколого-экономико-математической модели функционирования региона со стохастическим характером общих водных ресурсов / Б. П. Гусев // Труды XII Байкальской международной конференции "Методы оптимизации и их приложения". – 2001. – С. 32-36.

12. Иванько, Я.М. Климатическая изменчивость и агрометеорологические условия Предбайкалья: экспериментальные исследования и моделирование урожайности зерновых культур / Я.М. Иванько Я.М., Ю.В. Столопова // Метеорология и гидрология. 2019. – № 10. – С. 117-124.

13. 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.

14. Информационные системы управления природными и техногенными рисками / Н.В. Бендик, Е.В. Вашукевич, Я.М. Иванько, С.А. Петрова // Информационные технологии, системы и приборы в АПК: матер. 7-й междунар. научно-практ. конф. "Агроинфо-2018", Новосибирская обл., р.п. Краснообск, 24–25 октября 2018 года / Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Сибирский физико-технический институт аграрных проблем и др. – Новосибирская обл., р.п. Краснообск: Сибирский физико-технический институт аграрных проблем, 2018. – С. 76-80. – EDN YMWQHR.

15. Климов, Е.С. О моделях и алгоритмах машинного обучения в управлении аграрным производством / Е.С. Климов, Я.М. Иванько // Научно-исследовательская деятельность аспирантов в решении приоритетных задач развития агропромышленного комплекса: матер. научно-практ. конф., посвящ. 70-летию аспирантуры Иркутского ГАУ, п. Молодежный, 06 декабря 2023 года. – п. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2023. – С. 240-244. – EDN IUOLQV.

16. Ковалева, Е.А. Модуль "Планирование в условиях рисков" программного комплекса "Эколого-математическое моделирование аграрного производства" / Е.А. Ковалева, Я.М. Иванько // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 3(27). – С. 135-147. – DOI 10.38028/ESI.2022.27.3.013. – EDN RJIEEL.

17. Крицкий, С.Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. - М.: Наука. - 1982. – 271 с.

18. Математические и цифровые технологии оптимизации производства продовольственной продукции: монография / Я.М. Иванько, П.Г. Асалханов, М.Н. Барсукова [и др.]. – Молодежный: Иркутский ГАУ, 2021. – 219 с. – ISBN 978-5-91777-243-1. – EDN OOVACG.

19. Неймарк, Ю.И. Математическое моделирование как наука и искусство: учебник / Ю.И. Неймарк. – 2-е изд., испр. и доп. – Н. Новгород: изд-во Нижегородского госуниверситетаю. – 2010. – 420 с.

20. Нурбаева, С.А. Многоэтапная стохастическая задача планирования развития предприятия с вероятностными ограничениями и ее разрешимость / С.А. Нурбаева, И.Ю. Быкова // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2009. – № 2 (16). – С. 40-47.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665666 Российская Федерация. Многоуровневое прогнозирование показателей аграрного производства: № 2022665000: заявл. 10.08.2022 : опубл. 18.08.2022 / Я.М. Иванько, А.А. Ромме, М.Н. Барсукова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского".

22. Цифровые технологии в аграрном производстве и образовании: монография / Я.М. Иванько, П.Г. Асалханов, М.Н. Барсукова [и др.]; – Молодежный: Иркутский ГАУ,

2022. – 126 с. – ISBN 978-5-91777-251-6. – EDN TYCHXH.

23. Belyakova, A.Yu. Modeling of rare rain floods on the example of middle rivers of Angara basin / A.Yu. Belyakova, Ya.M. Ivanyo, S.A. Petrova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Vol. Volume 677. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42103. – DOI 10.1088/1755-1315/677/4/042103. – EDN YODDDV.

References

1. Asalkhanov P.G. Prognozirovaniye i planirovaniye agrotekhnologicheskikh operacij dlya prirodno-klimaticheskikh zon regiona: monografiya [Forecasting and planning of agrotechnological operations for natural and climatic zones of the region: monograph]. Irkutsk: Irkutsk SAU, 2014, 145 p.

2. Asalkhanov, P.G. et all. Tendentsii primeneniya sistem iskusstvennogo intellekta v sel'skom khozyaystve [Trends in the use of artificial intelligence systems in agriculture]. Molodezhny, 2023, pp. 151-157.

3. Barsukova, M.N. et all. Ob odnoy modeli optimizatsii proizvodstva agrarnoy produktsii v blagopriyatnykh i neblagopriyatnykh vneshnikh usloviyakh [About one model of optimization of agricultural production in favorable and unfavorable external conditions]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii, 2020, no. 3 (19), pp. 73-85.

4. Belyakova A.Yu. et all. Ob odnoy modeli parametricheskogo programmirovaniya proizvodstva agrarnoy produktsii s uchetom proyavleniya gidrologicheskogo sobytiya [On one model of parametric programming of agricultural production, taking into account the manifestation of a hydrological event]. Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki, 2016, no. 19. pp. 41-49.

5. Belyakova, A. Yu., Buzina, T. S. Modeli planirovaniya proizvodstva prodovol'stvennoy produktsii v usloviyah neopredelennosti [Models of food production planning in conditions of uncertainty]. Inzhenernyy vestnik Dona, 2022, no. 4(88), pp. 152-166.

6. Bendik, N.V. et all. Informatsionnyye tekhnologii v reshenii zadachi optimizatsii agrarnogo proizvodstva s uchetom proyavleniya vysokikh pavodkov i polovodiy [Information technologies in solving the problem of optimizing agricultural production, taking into account the manifestation of high floods and floods]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016, no. 2, pp. 38-45.

7. Blohinov E.G. Raspredeleniye veroyatnostej velichin rechnogo stoka [Probability distribution of river flow values]. Moscow, Nauka, 1974, 169 p.

8. Buzina T.S. et all. Optimizatsiya vzaimodeystviya uchastnikov klastera po polucheniyu pishchevoj dikorastushchej produktsii v regione [Optimizing the interaction of cluster members to obtain wild food products in the region]. Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin, 2020, no. 4, pp. 138-149.

9. Buzina, T.S., Ivanyo, Ya.M. Optimizatsiya vzaimodeystviya uchastnikov regional'nykh agropromyshlennykh klasterov [Optimizing the interaction of participants in regional agro-industrial clusters]. Irkutsk, 2015, 148 p.

10. Buzina, T.S. et all. Mnogokriterial'naya zadacha optimizatsii vzaimodeystviya uchastnikov agropromyshlennykh klasterov s interval'nymi parametrami [The multi-criteria task of optimizing the interaction of participants in agro-industrial clusters with interval parameters]. Vestnik IrGSHA, 2015, no. 71, pp. 115-123.

11. Gusev, B.P. Ob odnoy ekologo-ekonomiko-matematicheskoy modeli funkcionirovaniya regiona so stohasticheskim harakterom obshchih vodnykh resursov [On an ecological, economic and mathematical model of the functioning of a region with a stochastic nature of shared water resources] Trudy XII Bajkal'skoj mezhdunarodnoj konferencii “Metody optimizatsii i ih prilozheniya”, 2001, pp. 32-36.

12. Ivanyo, Ya.M., Stolopova, Yu.V. Klimaticheskaya izmenchivost' i agrometeorologicheskie usloviya Predbajkal'ya: eksperimental'nye issledovaniya i modelirovaniye

urozhajnosti zernovyh kul'tur [Climatic variability and agrometeorological conditions of the Pre-Baikal region: experimental studies and modeling of grain yields]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, no. 10, pp. 117-124.

13. Ivanyo, Ya.M., Petrova S.A. Ob odnom algoritme vydeleniya anomal'nyh urovnej vremennogo ryada dlya ocenki riskov [About an algorithm for identifying abnormal levels of a time series for risk assessment]. *Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki*, 2022, no. 42, pp. 48-57.

14. Bendik, N.V. et all. Informatsionnyye sistemy upravleniya prirodnyimi i tekhnogennymi riskami [Information systems for managing natural and man-made risks]. Krasnoobsk, 2018, pp. 76-80.

15. Klimov, E.S., Ivanyo, Ya.M. O modelyakh i algoritmakh mashinnogo obucheniya v upravlenii agrarnym proizvodstvom [About machine learning models and algorithms in agricultural production management]. *Molodezhnyj*, 2023, pp. 240-244.

16. Kovaleva, Ye.A., Ivanyo, Ya.M. Modul' "Planirovaniye v usloviyakh riskov" programmogo kompleksa "Ekologo-matematicheskoye modelirovaniye agrarnogo proizvodstva" [The module "Risk planning" of the software package "Ecological and mathematical modeling of agricultural production"]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii*, 2022, no. 3(27), pp. 135-147.

17. Krickij, S.N. Menkel', M.F. Gidrologicheskie osnovy upravleniya vodohozyajstvennymi sistemami [Hydrological foundations of water management systems]. Nauka, 1982, pp. 271.

18. Ivanyo, Ya.M. et all. Matematicheskie i cifrovye tekhnologii optimizacii proizvodstva prodovol'stvennoj produkcii [Mathematical and digital technologies for optimizing food production]. *Molodezhnyj*, 2021, 219 p.

19. Neymark, Yu.I. Matematicheskoye modelirovaniye kak nauka i iskusstvo [Mathematical modeling as a science and art]. N. Novgorod, 2010, 420 p.

20. Nurbayeva, S.A., Bykova, I.Yu. Mnogoetapnaya stokhasticheskaya zadacha planirovaniya razvitiya predpriyatiya s veroyatnostnymi ogranicheniyami i yeye razreshimost' [A multi-stage stochastic enterprise development planning problem with probabilistic constraints and its solvability]. *Sotsial'no-ekonomicheskoye upravleniye: teoriya i praktika*, 2009, no. 2 (16), pp. 40-47.

21. Ivanyo, Ya.M. et all. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2022665666 Rossijskaya Federaciya. Mnogourovnevoe prognozirovanie pokazatelej agrarnogo proizvodstva : № 2022665000: zayavl. 10.08.2022 : opubl. 18.08.2022 [Certificate of state registration of the computer program No. 2022665666 Russian Federation. Multilevel forecasting of agricultural production indicators: No. 2022665000: application 08/10/2022: publ. 08/18/2022] zayavitel' federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Irkutskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni A.A. Ezhevskogo».

22. Ivanyo, Ya.M. et all. Tsifrovyye tekhnologii v agrarnom proizvodstve i obrazovanii [Digital technologies in agricultural production and education]. *Molodezhnyj*, 2022, 126 p.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the planning, execution and analysis of this study. All authors of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

История статьи / Article history:

Дата поступления в редакцию / Received: 24.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 07.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторах

Белякова Анна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования Института экономики управления Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, тел. 89025194188, e-mail: belyakova_irk@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1770-232X>.

Бузина Татьяна Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики и математического моделирования Института экономики управления. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, тел. 89021737301, e-mail: buzinats@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4337-6465>.

Иваньо Ярослав Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, e-mail: iymex@rambler.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4118-7185>.

Information about authors

Anna Yu. Belyakova – Cand. of Technical Sciences, Ass. Prof. of Department of Informatics and mathematical modeling, Institute of Economics, Management and Applied Informatics, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 89025194188, e-mail: belyakova_irk@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1770-232X>.

Tat'jana S. Buzina – Cand. of Technical Sciences, Ass. Prof. of Department of Informatics and mathematical modeling, Institute of Economics, Management and Applied Informatics, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 89021737301, email: buzinats@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4337-6465>.

Yaroslav M. Ivanyo – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Informatics and Mathematical Modeling of the Institute of Economics, Management and Applied Informatics, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, e-mail: iymex@rambler.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4118-7185>.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-62-72

УДК 519.711.2

Научная статья

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ СО ШТРАФНОЙ ФУНКЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ОШИБКИ СИСТЕМЫ

В.В. Куликов, Н.Н. Куцкий

Иркутский национальный исследовательский технический университет
г. Иркутск, Иркутская область, Россия

Аннотация. Для линейного объекта применение регулятора с переменной структурой (РПС) позволяет сохранить принцип суперпозиции в автоматических системах, что способствует, как известно, для разных задающих воздействий получению семейства переходных процессов с одинаковым временем окончания. В настоящей работе рассматривается параметрическая оптимизация пропорционально-интегрального регулятора с переменной структурой с использованием интегрального квадратичного критерия со штрафной функцией на основе ошибки системы с весовым коэффициентом. Это является одним из вариантов реализации штрафной функции для снижения колебательности результирующих переходных процессов в автоматической системе после выполнения процедуры параметрической оптимизации РПС. Достоинством такой штрафной функции является отсутствие связи с верхними оценками сигналов автоматической системы. Применяется градиентный алгоритм для решения задачи параметрической оптимизации РПС с вычислением необходимых составляющих градиента критерия оптимизации на основе параметрической чувствительности. Преимущества такого регулятора заключаются в том, что его структуры основаны на типовом пропорционально-интегральном регуляторе. Работоспособность сформированного градиентного алгоритма на основе анализа чувствительности подтверждается вычислительной методикой для модели автоматической системы поддержания температуры в промышленной печи.

Ключевые слова: регулятор с переменной структурой, функции чувствительности, градиентный алгоритм, автоматические системы с запаздыванием, штрафная функция.

Для цитирования: Куликов В.В., Куцкий Н.Н. Параметрический синтез регулятора с переменной структурой с использованием критерия со штрафной функцией на основе ошибки системы. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3 (52):62-72. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-62-72.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF A REGULATOR WITH A VARIABLE STRUCTURE USING A CRITERION WITH A PENALTY FUNCTION BASED ON A SYSTEM ERROR

Vladimir V. Kulikov, Nikolay N. Kutsy

Irkutsk National Research Technical University, *Irkutsk, Russia*

Abstract. For a linear object, the use of a variable structure controller (VSC) allows preserving the superposition principle in automatic systems, which is known to contribute to obtaining a family of transient processes with the same end time for different setting actions. In this paper, we consider parametric optimization of a proportional-integral controller with a variable structure using an integral quadratic criterion with a penalty function based on a system error with a weighting coefficient. This is one of the options for implementing a penalty function to reduce the oscillation of the resulting transient processes in an automatic system after performing the VSC parametric optimization procedure. The advantage of such a penalty function is the absence of a connection with the upper estimates of the automatic system signals. A gradient algorithm is used to solve the problem of parametric optimization of the VSC with the calculation of the necessary components of the gradient of the optimization criterion based on parametric sensitivity. The advantages of such a controller are that its structures are based on a typical proportional-integral controller. The operability of the formed gradient algorithm based on sensitivity analysis is confirmed by a computational technique for a model of an automatic temperature maintenance system in an industrial furnace.

Keywords: variable structure controller, sensitivity functions, gradient algorithm, automatic systems with delay, penalty function.

For citation: Kulikov V.V., Kutsy N.N. Parametric synthesis of a regulator with a variable structure using a criterion with a penalty function based on a system error. *Electronic scientific-Practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2024; 3 (52):62-72. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-62-72.

Введение. Преимущество систем с переменной структурой перед непрерывными системами определяется повышением скорости протекания переходного процесса без использования операции дифференцирования в выходной координате регулятора с сохранением принципа суперпозиции [1, 2, 8]. Анализ публикаций по методам параметрической оптимизации такого класса регуляторов позволяет сделать вывод о распространении метода гармонической линеаризации, сложность применения которого зависит от количества структур РПС [3]. Применение штрафных функций является одним из вариантов снижения перерегулирования результирующих переходных процессов в автоматической системе после выполнения процедуры параметрической оптимизации РПС [4, 6, 8, 9, 11] при использовании интегрального квадратичного критерия оптимизации. Особенностью применения штрафных функций является выбор вида этой функции и связи её с координатами автоматической системы [6]. В настоящей работе данная функция выбрана без использования дополнительных координат автоматической системы. Цель работы

заключается в минимизации перерегулирования переходного процесса в автоматической системе регулирования температуры промышленной печи [12] путём использования регулятора с переменной структурой с настраиваемыми параметрами, полученными в результате выполнения процедуры оптимизации по критерию со штрафной функцией.

Постановка задачи. Структурная схема рассматриваемой автоматической системы представлена на рисунке 1.

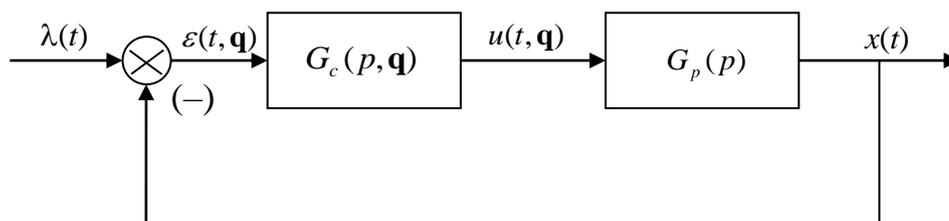


Рисунок 1 – Структурная схема автоматической системы

Figure 1 – Block diagram of an automatic system

Для автоматической системы с РПС на рисунке 1 представим выражения, определяющие сигналы такой системы [4, 8, 10]:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \mathbf{q}) &= \lambda(t) - x(t); \\ u(t, \mathbf{q}) &= G_c(p, \mathbf{q}^{(i)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), (i = 1, 2, 3); \\ x(t) &= G_p(p)u(t, \mathbf{q}); \end{aligned} \quad (1)$$

где t – текущее время;

$\varepsilon(t, \mathbf{q})$ – ошибка системы;

$\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q})) = \varepsilon(t, \mathbf{q})\dot{\varepsilon}(t, \mathbf{q})$ – функция переключения;

$\mathbf{q} = (\mathbf{q}^{(1)}(q_1, q_2), \mathbf{q}^{(2)}(q_3, q_4), \mathbf{q}^{(3)}(q_5, q_6))$ – вектор параметров РПС, при заданной функции переключения $\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q}))$ [10];

$\lambda(t)$ – задающее воздействие;

$u(t, \mathbf{q})$ – выходная координата РПС;

$x(t)$ – выходная координата автоматической системы;

$G_c(p, \mathbf{q}^{(1)}) = q_1 + \frac{q_2}{p}$, $G_c(p, \mathbf{q}^{(2)}) = q_3 + \frac{q_4}{p}$, $G_c(p, \mathbf{q}^{(3)}) = 0 + \frac{0}{p}$ – оператор типового

ПИ-регулятора с переменной структурой;

$G_p(p)$ – оператор объекта, моделирующий процесс нагрева или охлаждения туннельной печи для обжига кирпича [4, 12];

$p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Математическое описание рассматриваемого закона регулирования из класса систем с переменной структурой имеет следующий [1, 8, 10]:

$$u(t, \mathbf{q}) = \varepsilon(t, \mathbf{q}) \left(\sum_{i=0}^{n-1} q_{2i+1} \phi_{i+1}(t) \right) + \frac{\varepsilon(t, \mathbf{q})}{p} \left(\sum_{i=1}^n q_{2i} \phi_i(t) \right), \quad (2)$$

где $\phi_1(t), \dots, \phi_n(t) \in \{0;1\}$ – функции включения, у которых значение зависит от знака $\Psi_j(t) (j = 1, \dots, m)$ [10];

$n=3$ – количество структур рассматриваемого регулятора с переменной структур.

Основные результаты. В качестве критерия оптимизации формируемого алгоритма АПО выбран интегральный квадратичный критерий с весовым коэффициентом для квадратичной ошибки системы с отрицательным знаком для минимизации перерегулирования в автоматической системе (1):

$$I = \int_0^{\infty} (\varepsilon^2(t, \mathbf{q}) \Big|_{\varepsilon(t, \mathbf{q}) > 0} + b\varepsilon^2(t, \mathbf{q}) \Big|_{\varepsilon(t, \mathbf{q}) < 0}) dt; \quad (3)$$

где b – весовой коэффициент ($b > 1$).

Далее представим выражения, позволяющие вычислить составляющие градиента критерия оптимизации (3), необходимые для градиентного спуска:

$$\frac{\partial I}{\partial \mathbf{q}} = -2 \int_0^{\infty} (\varepsilon(t, \mathbf{q}) \xi_i(t) \Big|_{\varepsilon(t, \mathbf{q}) > 0} + \varepsilon(t, \mathbf{q}) \xi_i(t) b \Big|_{\varepsilon(t, \mathbf{q}) < 0}) dt; \quad (i = 1, 2, \dots, 4); \quad (4)$$

где $\xi_i(t) (i = 1, 2, \dots, 4)$; – функции чувствительности первого порядка.

Выражения (4) включают в себя ошибку системы и функции чувствительности, которые вычисляются из соответствующих уравнений чувствительности операторным методом [7, 10]:

$$\xi_i(t) = G_p(p) \frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, 4). \quad (5)$$

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_1(t)) + \varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_1(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_1(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_2(t)) + \frac{1}{p} \varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_2(t)) + \frac{1}{p} 0(t), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_2(t)) + \frac{1}{p} 0(t), \Psi^0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_3(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_3(t)) + \varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_3(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_4(t)) + \frac{1}{p}0(t), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_4(t)) + \frac{1}{p}\varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_4(t)) + \frac{1}{p}0(t), \Psi^0. \end{cases} \quad (9)$$

Для проверки сходимости алгоритма АПО привлекается вычислительная методика из работы [5], которая заключается в том, что выполняется серия запусков алгоритма АПО с различных начальных значений вектора настраиваемых параметров $\mathbf{q}_k^0 = (q_{1k}^0; q_{2k}^0; q_{3k}^0; q_{4k}^0) (k = 1, 2, \dots)$. Выбор вычислительного подхода для проверки сходимости алгоритма АПО обосновывается тем, что в критерии (3) содержится штрафная функция. Особенность применения критерия (3) заключается в том, что необходимо накладывать дополнительное условия к стартовым точкам алгоритма АПО \mathbf{q}_k^0 : ошибка системы должна быть положительной на всём временном интервале. Согласно работе [5] критерии сходимости алгоритма АПО следующие:

$$\frac{\partial I(\varepsilon(t, \mathbf{q}^*))}{\partial \mathbf{q}} = 0 \pm c, \quad (10)$$

где c – погрешность вычисления.

$$I(\mathbf{q}^*) \leq I(\mathbf{q}) \quad (11)$$

для всего возможного диапазона изменения настраиваемых параметров.

Зададим необходимые числовые значения для запуска алгоритма АПО: $\lambda(t) = 1(t)$, $\mathbf{q}_k^0 = (q_{1k}^0; q_{2k}^0; q_{3k}^0; q_{4k}^0) (k = 1, 2, 3)$ при весовом коэффициенте $b=5$:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1^0 &= (0,005; 0,005; 0,005; 0,005); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_1^0)) = 136,65. \\ \mathbf{q}_2^0 &= (0,01; 0,01; 0,01; 0,01); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_2^0)) = 72,77. \\ \mathbf{q}_3^0 &= (0,02; 0,02; 0,02; 0,02); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_3^0)) = 39,62. \end{aligned} \quad (12)$$

После серии запусков алгоритма АПО определены конечные точки $\mathbf{q}_k^* = (q_{1k}^*; q_{2k}^*; q_{3k}^*; q_{4k}^*) (k = 1, 2, 3)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1^* &= (0,04028; 0,32010; 0,11156; 0,05650); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_1^*)) = 10,8. \\ \mathbf{q}_2^* &= (0,05993; 0,39514; 0,14090; 0,03656); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_2^*)) = 9,86. \\ \mathbf{q}_3^* &= (0,06916; 0,38453; 0,14321; 0,04308); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_3^*)) = 9,92. \end{aligned} \quad (13)$$

Рисунок 2 демонстрирует то, что сформированный алгоритм АПО системы с регулятором (1) обеспечивает вычисление \mathbf{q}_k^* для начальных переходных процессов с положительной ошибкой на всём временном интервале в автоматической системе при различных \mathbf{q}_k^0 .

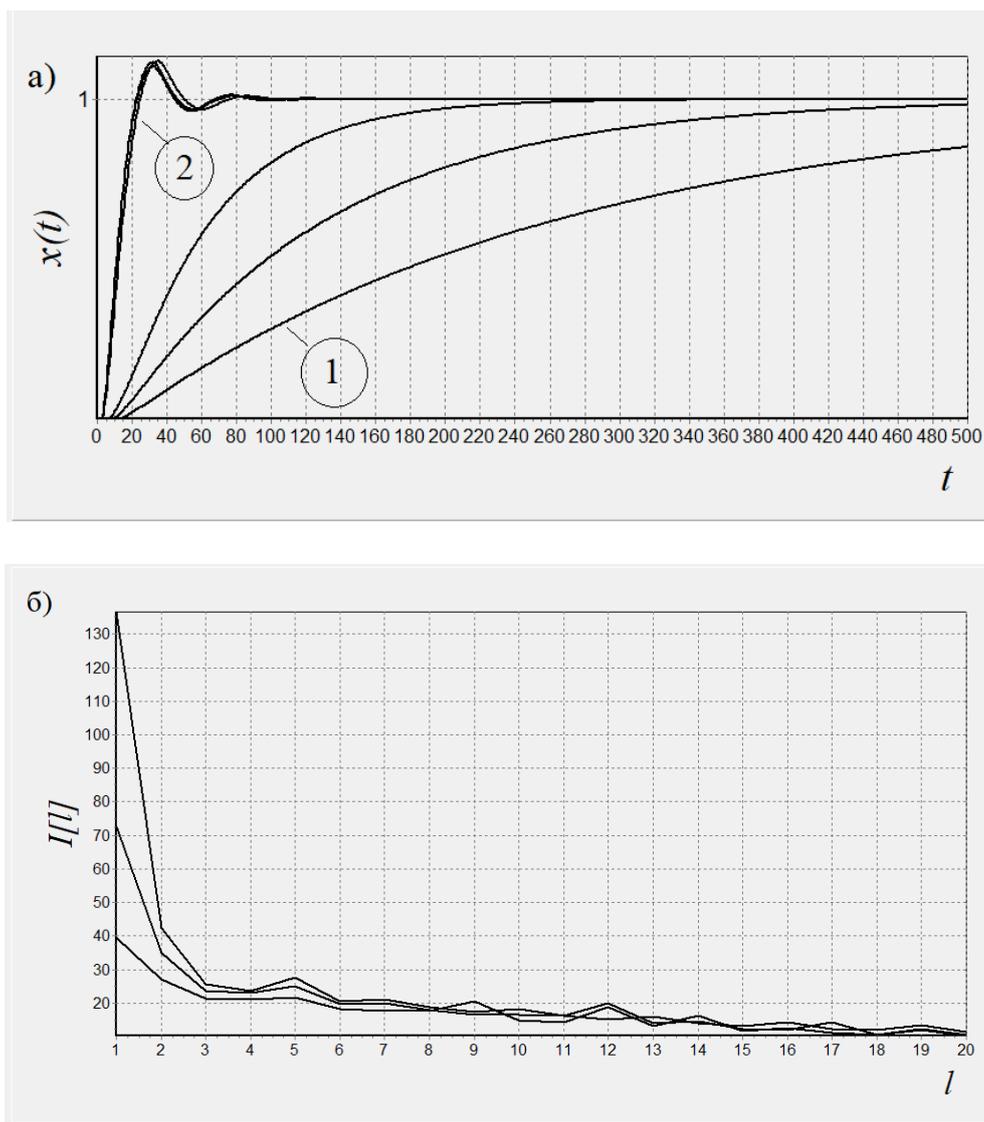


Рисунок 2 – а) графики переходных процессов $x(t)$ в начальных (3) и конечных (3) точках работы алгоритма АПО б) значения критерия оптимизации $I[l]$ в ходе работы алгоритма АПО

Figure 2 – a) graphs of transients $x(t)$ at the initial (3) and final (3) points of the APO algorithm b) values of the optimization criterion $I[l]$ during the operation of the APO algorithm Block diagram of an automatic system

Для начальных запусков $\mathbf{q}_k^0 (k = 1, 2, 3)$ алгоритма АПО выполняется условие (11), что подтверждается значениями критерия $I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_k^0)) (k = 1, 2, 3)$ (12), $I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_k^*)) (k = 1, 2, 3)$ (13) и графиками изменения критерия I в ходе работы алгоритма АПО, представленными на рисунке 2б.

Рисунок 3 показывает, что после запуска алгоритма АПО с различных начальных значений вектора настраиваемых параметров (12) соответствующие итоговые значения, полученные в оптимальной точке (13), обеспечивают выполнение необходимого условия экстремума (10) критерия (3) с допустимой для практики погрешностью:

$$-7 < \frac{\partial I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_k^*))}{\partial \mathbf{q}_k} < 10. \quad (14)$$

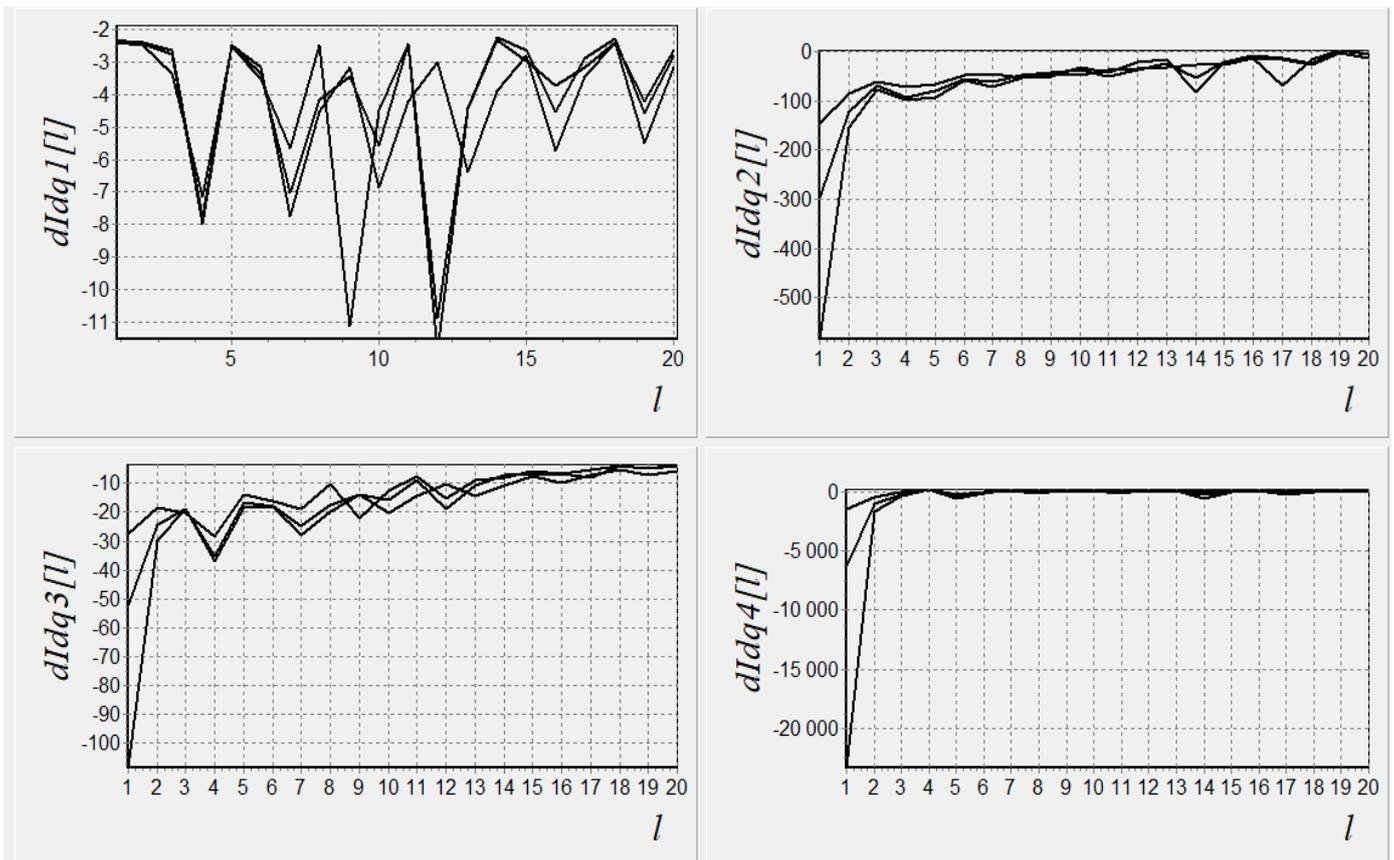


Рисунок 3 – Значения составляющих градиента $dI/dq_1[l]$, $dI/dq_2[l]$, $dI/dq_3[l]$, $dI/dq_4[l]$ критерия оптимизации (3) в ходе работы алгоритма АПО

Figure 3 – The values of the gradient components $dI/dq_1[l]$, $dI/dq_2[l]$, $dI/dq_3[l]$, $dI/dq_4[l]$ of the optimization criterion (3) during the operation of the APO algorithm

Рисунок 4 демонстрирует, что значения вектора настраиваемых параметров $\mathbf{q}_k[l]$ в ходе работы алгоритма АПО не расходятся в разные области.

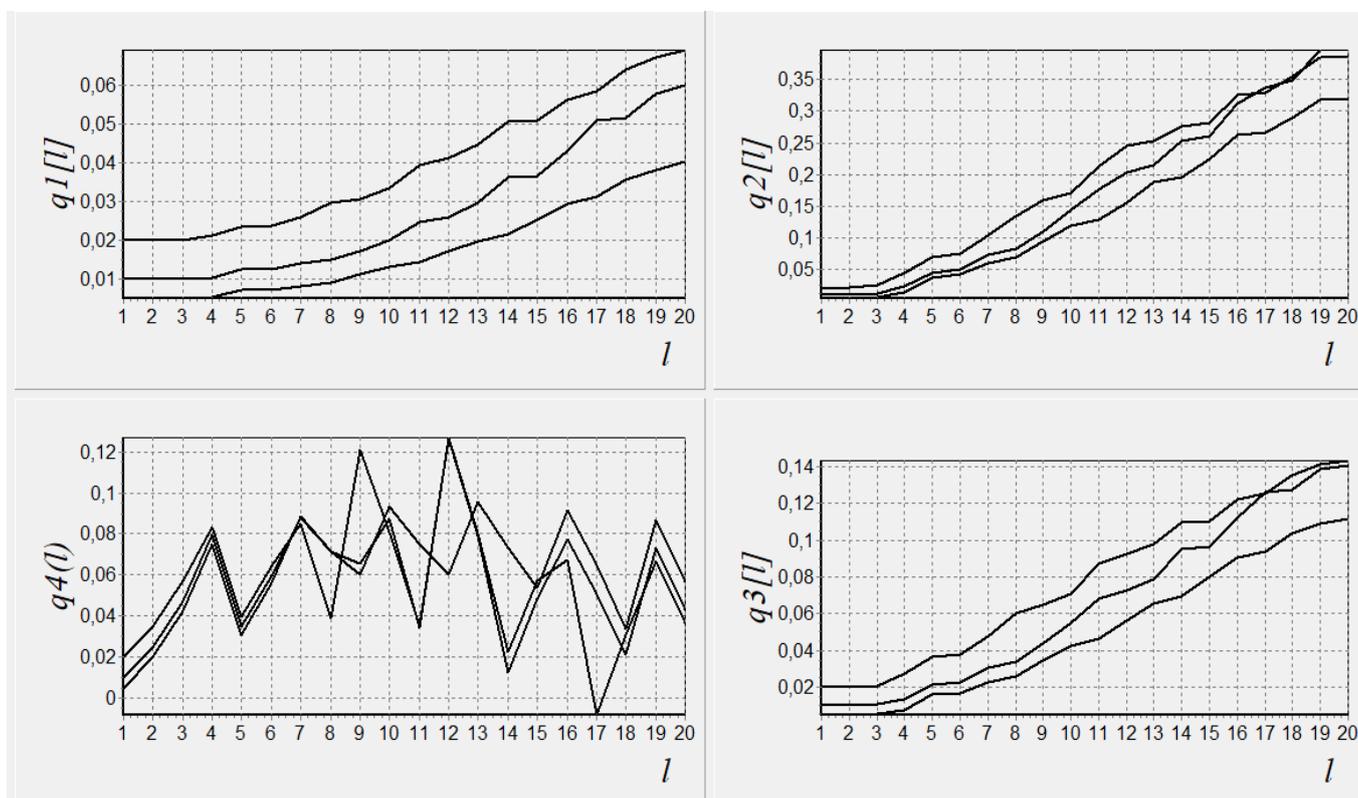


Рисунок 4 – Значения настраиваемых параметров регулятора $q_1[l]$, $q_2[l]$, $q_3[l]$, $q_4[l]$ в ходе работы алгоритма АПО

Figure 4 – The values of the adjustable parameters of the regulator $q_1[l]$, $q_2[l]$, $q_3[l]$, $q_4[l]$ during the operation of the APO algorithm

Проведенные серии запусков алгоритма АПО на заданных числовых примерах показывают выполнение критериев (10), (11), что в настоящей работе является подтверждением сходимости алгоритма АПО для параметрического синтеза регулятора с переменной структурой с использованием интегрального квадратичного критерия со штрафной функцией без вычисления дополнительных координат автоматической системы регулирования температуры в промышленной печи.

Выводы. Использование в интегральном квадратичном критерии штрафной функции на основе ошибки системы с весовым коэффициентом при параметрическом синтезе пропорционально-интегрального регулятора с переменной структурой позволяет получить переходные процессы в модели автоматической системы регулирования температуры в промышленной печи с допустимым для практики перерегулированием. Основное преимущество

использования такого критерия со штрафной функцией заключается в том, что не нужно вычислять дополнительные координаты автоматической системы кроме ошибки системы. Для реализации предлагаемого критерия необходимо выбирать значение весового коэффициент b , которое в настоящей работе предлагается выбирать путём последовательного увеличения с соответствующим запуском алгоритма АПО. При формировании области стартовых значений алгоритма АПО установлено, что значение весового коэффициента b влияет на итоговое значение критерия оптимизации при серии запусков алгоритма АПО.

Список литературы

1. Говоров, А.А. Методы и средства построения регуляторов с расширенными функциональными возможностями для непрерывных технологических процессов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06: защищена 15.11.02. Москва, 2002. 499 с.
2. Емельянов, С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой / С.В. Емельянов. – М.: Наука, 1967. – 335 с.
3. Жильцов, К.К. Приближенные методы расчета систем с переменной структурой / К.К. Жильцов. – М.: Энергия, 1974. – 224 с.
4. Куликов, В.В. Параметрическая оптимизация регулятора с переменной структурой с использованием линейного интегрального критерия / В.В. Куликов, Н.Н. Куцый // Актуальные вопросы аграрной науки. — Изд-во Иркутский ГАУ, 2024. – выпуск № 2 (51) — С. 60-72.
5. Куцый, Н.Н. Автоматическая параметрическая оптимизация дискретных систем регулирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06: защищена 26.11.97. Иркутск, 1997. 382 с.
6. Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию / Б.Т. Поляк. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 392 с.
7. Розенвассер, Е.Н. Чувствительность систем управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
8. Шигин, Е.К. Автоматическое регулирование объекта с чистым запаздыванием регулятором с переключаемыми параметрами II / Е.К. Шигин // Автоматика и телемеханика. – 1966. – № 6. – С. 72-81.
9. Широков, Л.А. Автоматическая параметрическая оптимизации систем регулирования с ограничениями на управляющие координаты / Л.А. Широков, О.Л. Широкова // Машиностроение и инженерное образование. – М.: Университет машиностроения, 2014. – № 1. – С. 52–60.
10. Kulikov, V.V. et al. The Gradient-Based Algorithm for Parametric Optimization of a Variable Structure PI Controller with Dead Band. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 21(9), pp. 530-534.
11. Kulikov, V.V. et al. Parametric Optimization of the PID Controller with Restriction Based on the Method of Conjugate Polak-Polyak-Ribier Gradients. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, no. 24(5), pp. 240-248.
12. Tseligorov, N.A. et al. Investigation of the robust absolute stability of the tunnel kiln control system with delay *WSEAS Transactions on Systems*, 2021, vol. 20, pp. 25-30.

References

1. Govorov, A.A. *Metody i sredstva postroeniya regulyatorov s rasshirennymi funktsional'nymi vozmozhnostyami dlya nepreryvnyh tekhnologicheskikh processov* [Methods and tools for constructing controllers with extended functionality for continuous technological processes]. Dis. D. tekhn. nauk: 05.13.06: zashchishchena 15.11.02. Moscow, 2002, 499 p.

2. Emel'yanov, S.V. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoj strukturoj [Automatic control systems with variable structure]. Moscow: Nauka, 1967, 335 p.
3. Zhil'cov, K.K. Priblizhennyye metody rascheta sistem s peremennoj strukturoj [Approximate methods for calculating systems with variable structure]. Moscow: Energiya, 1974, 224 p.
4. Kulikov, V.V., Kucyj, N.N. Parametricheskaya optimizaciya regul'yatora s peremennoj strukturoj s ispol'zovaniem linejnogo integral'nogo kriteriya [Parametric optimization of a variable structure controller using a linear integral criterion]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, Irkutsk, 2024, no. 2 (51), pp. 60-72.
5. Kucyj, N.N. Avtomaticheskaya parametricheskaya optimizaciya diskretnyh sistem regulirovaniya [Automatic parametric optimization of discrete control systems]. Dis. D. tekhn. Nauk, Irkutsk, 1997, 382 p.
6. Polyak, B.T. Vvedenie v optimizaciyu [Introduction to optimization]. Moscow: LENAND, 2019, 392 p.
7. Rozenvasser, E.N., Yusupov, R.M. Chuvstvitel'nost' sistem upravleniya [Чувствительность систем управления]. Moscow: Nauka, 1981, 464 p.
8. Shigin, E.K. Avtomaticheskoe regulirovanie ob"ekta s chistym zapazdyvaniem regul'yatorom s pereklyuchaemymi parametrami II [Automatic control of a pure delay object by a controller with switchable parameters II]. Avtomatika i telemekhanika, 1966, no. 6, pp. 72-81.
9. Shirokov, L.A., Shirokova, O.L. Avtomaticheskaya parametricheskaya optimizacii sistem regulirovaniya s ogranicheniyami na upravlyayushchie koordinaty [Automatic parametric optimization of control systems with constraints on control coordinates]. Mashinostroenie i inzhenerное obrazovanie, Moscow: Universitet mashinostroeniya, 2014, no. 1, pp. 52-60.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the planning, execution and analysis of this study. All authors of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

История статьи / Article history:

Дата поступления в редакцию / Received: 28.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 08.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторах

Куликов Владимир Валерьевич – соискатель Иркутского национального исследовательского технического университета.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “ИРНИТУ”, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, тел +7(914)903-92-79, e-mail: godefira@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5769-9370>.

Куцкий Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “ИРНИТУ”, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, тел +7(914)917-85-20, e-mail: kucyinn@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8533-598X>.

Information about authors

Vladimir V. Kulikov – applicant, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk National Research Technical University”.

Contact information: INRTU, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk city, 83 Lermontov Street, tel. 8914917-85-20, e-mail: godefire@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5769-9370>.

Nikolay N. Kutsy – Doctor of Technical Sciences, Professor at Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk National Research Technical University”.

Contact information: INRTU, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk city, 83 Lermontov Street, tel. 8914917-85-20, e-mail: kucyinn@mail.ru, ORCID ID:<https://orcid.org/0000-0002-8533-598X>.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-73-81

УДК 519.21

Научная статья

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ – ЦИФРОВЫЕ ТЕНИ – ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

А.В. Петров

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

Аннотация. Целью исследования является анализ методологии создания и развития цифровых двойников и цифровых теней. Рассматриваются методологические проблемы этого направления моделирования и пути их решения. Анализируются источники решения задач цифровых двойников. В частности, затронут вопрос их использования на примере Санкт-Петербургского технического университета имени Петра Великого. Предлагается вариант решения задачи создания модернизированного цифрового двойника по результатам анализа информации от цифровых теней. Приводится пример имитационного моделирования технологических процессов обогащения полезных ископаемых при построении и эксплуатации цифровых двойников горно-обогатительных предприятий. Полученные результаты позволяют повысить эффективность создания, использования и развития технологии цифровых двойников.

Ключевые слова: моделирование, методология, цифровой двойник, цифровая тень, автоматизированный синтез моделей, обогащение полезных ископаемых,

Для цитирования: Петров А.В. Цифровые двойники – цифровые тени – цифровые двойники. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3(52):73-81. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-73-81.

DIGITAL TWINS – DIGITAL SHADOWS – DIGITAL TWINS

Alexandr V. Petrov

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the research is to analyze the methodology for creating and developing digital twins and digital shadows. The methodological problems of this area of modeling and ways to solve them are considered. The sources for solving digital twin problems are analyzed. In particular, the issue of their use is touched upon using the example of Peter the Great St. Petersburg State Technical University. A solution to the problem of creating a modernized digital twin based on the results of analyzing information from digital shadows is proposed. An example of simulation modeling of technological processes of mineral enrichment during the construction and operation of digital twins of mining and processing enterprises is given. The results obtained make it possible to increase the efficiency of creating, using and developing digital twin technology.

Keywords: modeling, methodology, digital twin, digital shadow, automated synthesis of models, mineral enrichment

For citation: Petrov A.V. Digital twins – digital shadows – digital twins. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 3(52):73-81. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-73-81.

Настоящая статья посвящена рассмотрению новой парадигмы моделирования сложных систем. Речь идёт о моделировании только сложных систем, то есть со значительным количеством взаимосвязей и элементов. Почему именно сложных систем?

Основная проблема, которая стоит перед учеными и инженерами, состоит в том, что они столкнулись с объективной необходимостью создания (исследования и изготовления) очень сложных и не только технических систем.

Идея моделирования очень древняя. Достаточно вспомнить настенную живопись в пещерах, потому что элемент логического моделирования – умозаключений, представления в мозгу древнего человека сцен, допустим, охоты и их интерпретация потом в виде некоего художественного произведения - это моделирование. Были физические модели, и до сих пор - грандиозно развитое и развиваемое математическое моделирование. Человечество, по мере развития, столкнулось с тем, что стало необходимым иметь дело с очень сложными системами – сложными по количеству элементов и связей, сложными по междисциплинарному взаимодействию. Эти задачи возникли во времена Второй мировой войны. Потребовалось создание новых видов вооружения, и учёные были к этому, в принципе, готовы. Достаточно вспомнить атомный проект. Инженерная практика и технологии отставали, но не столь критично и потому удалось за достаточно

короткий период времени всё-таки технически изготовить атомную бомбу. Но, чтобы опробовать её, необходимо было создать средства доставки – развивать стратегическую авиацию, ракетную технику, подводный флот. Но ракета, как изделие, это крайне сложное произведение мозга человеческого, и вот эти новые задачи (атомный проект, авиационный, а точнее ракетный проекты) потребовали очень серьёзных междисциплинарных исследований. Речь шла о материалах, о надёжности, о прочности, о химическом производстве и тому подобном. В полной мере проявилась необходимость управления такими сложными системами. Эта проблема “родила” кибернетику как науку об управлении в технических системах и живых организмах, как ее назвал Норберт Винер. И эта теория управления стала распространяться не только на изготовление изделий, но и управление вообще в любых системах.

Возникновение этих сложных задач повлекло за собой развитие параллельно и других отраслей, как бы подхлестнуло их рождение и определило направления развития. Это, в частности, касается вычислительной техники. Бурный её рост в сороковых-пятидесятых годах прошлого века натолкнулся на то, что появились серьёзные технические трудности. Известно, что первые вычислительные машины были ламповые. А что значит ламповая вычислительная машина – это крайне низкая надёжность и громадные эксплуатационные затраты. Затем появились полупроводники, микросхемы, и вот сейчас мы пользуемся смартфоном. Смартфон во многих функциях гораздо мощнее, нежели первые вычислительные машины.

Появление вычислительной техники и кибернетики заставило задуматься о том, что управление осуществляется через информацию. Что это за субстанция? Во время войны теория информации и кодирования шифрование – это понятно для чего. Но Клод Шеннон создал теорию информации и как бы дал импульс к изучению информации без привязки к предметной области. Эти первые публикации, первые постановки задач управления привели к тому, что наука и технологии совершили совершенно фантастический скачок. Уже не удивляет то, что мы, пользуясь автомобилем, не думаем о переключении передач, этим занимается автоматическая коробка, не думаем о диагностике систем автомобиля, потому что он нам время от времени предлагает то подкачать колёса, то проверить тормозные колодки или ещё что-то. Моделирование, как способ исследования и познания мира, параллельно продвигал развитие и использование вычислительных машин, информационных технологий и других смежных направлений.

Раньше исследователю достаточно было создать модель, провести эксперимент, получить результаты, обобщить эти результаты и получить новые знания, используя гораздо более дешёвый и эффективный способ, нежели натурное экспериментирование. Натурные исследования не всегда

возможны (невозможно провести эксперимент с планетой Сатурн), да и не всегда возможно для реальной системы задать условия, которые воспроизводят аварийную ситуацию, задать предельные значения параметров и так далее. Математические модели – эффективный инструмент исследования, но для сложных систем, о которых мы ведем речь, они порой просто отсутствуют. Идея машинного моделирования, высказанная Джоном фон Нейманом при реализации атомного проекта и, в частности, использование метода Монте-Карло для решения уравнений, которые нельзя было аналитически решить, заставили задуматься о методологии моделирования вообще.

До определенного момента, момента “созревания” инструментария моделирования – вычислительной техники и информационных технологий, моделирование развивалось как обычный метод исследований, который обеспечивал продвижение вперед науки и практики. С течением времени параллельно с появлением очень сложных задач, параллельно с развитием мощностей вычислительной техники, с развитием информационных технологий появилась реальная возможность осуществить мечту любого человека, который занимался моделированием. Думаю, что мечта эта состоит в следующем: создаём модель, проводим эксперименты, получаем качественно иные параметры работы системы и внедряем эти параметры в новой версии моделируемого объекта. Развитость аппаратной, информационно-технологической частей и сложность решаемых задач обеспечили получение и обработку значительных объемов информации и, тем самым, доставили возможность не просто моделировать современные сложные системы, но и обеспечили непрерывность моделирования таких систем. При этом обратим внимание читателя на отсутствие привязки методологии моделирования к какой-либо предметной области.

В условиях необходимости решения крайне сложных, требующих глубоких научных исследований, требующих крайне трудной технологической подготовки, выдвигающих серьезные требования к культуре производства, в 2003 году во флоридском университете некто Майкл Гривс выдвинул идею так называемых цифровых двойников. Суть её состоит в следующем (в основном это рассматривается на примере машиностроения): каким-то образом создается некая математическая модель, в компьютер закладываются, во-первых, конструкция изделия, во-вторых, технологии его производства, в-третьих, описание материалов и всех прочих характеристик, требуемых при проектировании изделия, в-четвертых, правила и инструкции эксплуатации и так далее. Такой конгломерат информации об изделии, помещенный в компьютер, носит название цифрового двойника и на самом деле – это цифровая копия изделия и логично назвать её двойником. Далее изделие запускается в производство и, выпустив какое-то количество, серию, эти изделия поступают потребителю. Они, изделия начинают функционировать в совершенно

разных условиях эксплуатации: температурных, организационных и других. И если за каждым изделием закрепить его цифрового двойника, конкретного для данного изделия, то в рамках условий эксплуатации этого изделия у нас возникает возможность следить за тем, как оно работает и отражать это слежение в виде определённых данных в том же компьютере. Такое отражение носит название цифровой тени. А далее, когда полученные данные от разных цифровых теней изделий, эксплуатирующихся в разных условиях, анализируются, формируются агрегирующие данные и по ним вносятся изменения в основную модель и соответственно в конструкцию изделия, технологии его производства и эксплуатации. Получается некий цифровой двойник уже на качественно новом уровне – цифровой двойник*. Звёздочка обозначает новую итерацию. И затем опять производство, затем опять цифровые тени, затем опять обобщение и затем опять цифровой двойник уже ещё с одной звёздочкой и так далее. Итеративный процесс! И такой подход позволяет не на основе единичных экспериментов, а практически серийного выпуска изделий, получить информацию об их эксплуатации и провести более эффективную модернизацию этого изделия.

Но при этом возникает очень много проблем. Как они решаются трудно сказать. Известно, что идеологией цифровых двойников очень активно занимаются авиа- и машиностроительные фирмы: Siemens в Германии, авиастроительные корпорации Airbus, Dassault Aviation, Boeing. По отрывочным публикациям есть сведения, что и в Российской Федерации развивается процесс создания цифровых двойников. В частности, об этом говорит проректор Санкт-Петербургского технического университета имени Петра Великого Боровков А.И. [1], который проповедует идею цифровых двойников у нас в России. Он очень часто выступает с лекциями, под его научным руководством опубликовано несколько книг (надо сказать, что книги содержат в основном компиляцию информации из интернета) [2]. Профессор говорит, что в его университете есть программный комплекс, который позволяет решать задачи методологии цифровых двойников и приводит интересные примеры.

Но есть несколько важных замечаний. Первое замечание состоит в том, что если анализировать научные публикации, включая защиты диссертаций, то в них практически невозможно найти сведений об этой самой автоматизации построения моделей изделий сложных систем. Второе замечание – абсолютное отсутствие каких-либо серьёзных изданий по методологии разработки цифровых двойников и теней. Как в любой молодой науке или ее ответвлении тема цифровых двойников генерирует большой шум – сейчас создадим цифровые двойники в разных отраслях науки, технологий и техники. Это идёт от простого понимания, что, если есть информация в компьютере, то это уже цифровой двойник. А что дальше делать с этой информацией, это не публикуется. Если речь идёт о серьёзных изделиях, то, я так думаю, крайне велика доля коммерческой тайны.

Поэтому может быть мы и не видим конкретных результатов и того, что связано с научным развитием методологии цифровых двойников и теней.

Заострим внимание читателей на тех проблемах, которые методологически ставит концепция развития цифровых двойников и теней. Совершенно не вызывает сомнения важность цифровых двойников и теней и что это новый серьёзный, глобальный шаг в развитии моделирования как такового. Модель становится привязанной к практике, и мы получаем возможность непрерывно модернизировать ее, накапливая знания. То есть получен новый, качественный скачок в развитии моделирования. Здесь, конечно, велика роль информационных технологий, потому что понятно, что, если много цифровых теней, то эту информацию как-то надо собирать, где-то хранить, верифицировать и каким-то образом защищать. И это уже используется в современных информационных технологиях – большие данные, анализ данных и так далее. Когда речь идёт о сложных системах и их информационном описании, то и информационные технологии развиваются и это двигает методологию цифровых двойников и теней.

Обсудим ещё один важный момент, сказал бы, определяющий эффективность вообще и методологии цифровых двойников и теней, в частности. С точки зрения моделирования, когда создаётся модель в традиционных подходах, по мере её создания и затем по мере её использования для получения каких-то результатов, автор модели вместе с заказчиком вносят в неё изменения. Это, как правило, творческий процесс, потому что автор знает, предмет моделирования и его описание. А заказчик понимает, как работает его система. И вот этот конгломерат вносит изменения в саму модель. Что значит внести изменения в саму модель? Это значит изменить математическое описание, уравнения какие-то изменить надо, и затем изменить компьютерную программу. При этом численный эксперимент как имитационное моделирование является основой цифровых двойников и цифровых теней. Внесение изменений обязательно проходит через этап творчества. И эта проблема существенно усложняется тем, что у нас появляется огромные массивы данных от цифровых теней. Снимая информацию о поведении системы, получаем множество значений параметров. В зависимости от сложности системы может быть очень много копий (теней) систем, что кратно увеличивает объемы информации, требующие обработки и обобщения с необходимостью учета условий эксплуатации и взаимодействий с окружающей средой. В старой парадигме моделирования это всё должен обобщить человек, изменить основную модель, перестроить программу и двигаться дальше. Такую задачу практически невозможно решить, если мы имеем дело с серьёзными системами с множеством параметров и множеством копий этих систем при разных условиях эксплуатации.

В научной литературе практически не говорят о наличии программных инструментов анализа данных цифровых теней и модернизации исходного

цифрового двойника. Коллеги из Петербурга говорят, что такие программные инструменты у них есть и они делают такую работу создания новой версии цифрового двойника по результатам цифровых теней автоматически. Подтверждений этому в научных публикациях мною не обнаружено. Может что-то пропустил, может это скрыто за завесой коммерческой тайны. Ну хоть толика, хоть маленькая капелька должны были просочиться хотя бы в названиях защищаемых диссертаций!

Считаю, что это очень важная задача, определяющая будущее всей методологии цифровых двойников. Нам важно научиться осуществлять переход от данных цифровых теней в базовую версию цифрового двойника с тем, чтобы её модернизировать в новую версию. И этот процесс автоматизации требует какого-то понимания, как это сделать. Не исключаю, следующий вариант, навеянный определёнными знаниями в области математической статистики. В ряду статистических прикладных методов есть такой раздел, который называется планирование эксперимента [3]. Его задача состоит в автоматическом подборе параметров исходных данных таким образом, чтобы некая цель была достигнута. Эта цель формируется в виде целевой функции со своими ограничениями – выражается в виде полинома с одним экстремумом. Вектор параметров этого полинома определяется регрессионным анализом на основе опытных данных. Отсюда следует, что, собирая однотипные параметры, мы их можем использовать в качестве опытных данных для определения коэффициентов целевой функции и, находя затем экстремум этой целевой функции, мы выйдем на необходимую нам целевую совокупность параметров. Но это решает только часть задачи. А как изменить саму модель? Это серьёзная проблема, потому что речь идёт не просто о формализации творчества, но и об автоматизации модернизации имитационных моделей, определённой степени синтезе имитационных моделей. Причём синтез не просто через формальное переписывание уравнений, а с параллельным получением модернизированного программного продукта. Необходимо сказать, что подобного рода попытки для сложных в исследовательском смысле отраслей типа обогащения полезных ископаемых имеются. Это так называемая система автоматизированного синтеза имитационных моделей обогатительных технологий [4]. Она позволяет по графическому представлению технологической схемы, введя туда параметры оборудования, горной массы и параметры управления проводить имитационный эксперимент и найти оптимальные условия технологических обогатительных разделительных операций. Предложены ещё и математические варианты нахождения этих условий.

Следует отметить, что обогащение очень интересная отрасль. Интерес к ней состоит в том, что, с одной стороны, отсутствуют какие-либо подходы к её глубокому научному исследованию с точки зрения математики, физики, химии в силу того, что приходится иметь дело с трёхфазной средой –

жидкая, твёрдая и газообразная составляющие. Проведя анализ исследований обогатительных технологий, сформировался вывод, что эти исследования проводятся по двум несвязанным между собой направлениям. Первое – это изучение микропроцессов, потому что речь идёт о частичках в 74 микрона, которые подвергаются обработке. Микропроцессы крайне важны. Например, исследование микропроцессов в технологии флотации, когда к пузырьку воздуха прикрепляется или не прикрепляется (разделение!) частичка вещества. Второе направление состоит в создании эффективного оборудования. Надо сказать, что специалисты имеют дело не только с исключительно сложными физико-химическими процессам, но и с циклопическими размерами агрегатов, их значительной энергоёмкостью. И небольшие улучшения дают существенный экономический эффект. В этих двух направлениях не проявляются явные связи между результатами исследований микропроцессов и их влиянием на конструкцию и наоборот.

Представляется, что соединение методологии цифровых двойников через автоматизированный синтез имитационных моделей и планирование эксперимента, во-первых, даст какой-то импульс для развития методологии цифровых двойников и, с другой стороны, их применение в конкретной области – технологии обогащения полезных ископаемых – позволит получить более эффективные решения. И, наконец, можно ожидать получения какого-то осязаемого способа перехода от информации цифровых теней к модернизации модели цифровых двойников.

Список литературы

1. Боровков, А.И. Цифровой двойник – опыт CompMechLab® / А.И. Боровков [Электронный ресурс] // URL: <https://nticenter.spbstu.ru/news/8023> (дата обращения: 27.09.2024).
2. Прохоров, А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. – М.: ООО “АльянсПринт”, 2020. – 401 с., ил.
3. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс : пер. с нем – М. : Статистика, 1976. – 598 с.
4. Петров, А.В. Теория автоматизированного синтеза имитационных моделей технологических процессов обогащения полезных ископаемых / А.В. Петров. – Изд-во Иркутского государств техн. ун-та, 2007. – 80 с.

References

1. Borovkov, A.I. Cifrovoy dvojn timer – opyt CompMechLab® [Cifrovoy dvojn timer – opyt CompMechLab®]. <https://nticenter.spbstu.ru/news/8023>
2. Prohorov, A., Lysachev, M. Cifrovoy dvojn timer. Analiz, trendy, mirovoj opyt [Digital Twin. Analysis, Trends, World Experience]. Moscow: “Al'yansPrint”, 2020, 401 p.
3. Zaks, L. Statisticheskoe ocenivanie [Statistical evaluation]. Moscow: Statistika, 1976, 598 p.
4. Petrov, A.V. Teoriya avtomatizirovannogo sinteza imitacionnyh modelej tekhnologicheskikh processov obogashcheniya poleznyh iskopaemyh [Theory of automated synthesis of simulation models of technological processes of mineral enrichment]. Irkutsk, 2007, 80 p.

Авторский вклад. Автор настоящего исследования принимал непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе полученных данных. Автор настоящей статьи ознакомился и одобрил окончательный вариант.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. Author of this study was directly involved in the planning, execution and analysis of this study. Author of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interest.

История статьи / Article history:

Дата поступления в редакцию / Received: 27.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 08.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторе

Петров Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “ИРНИТУ”, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, тел. 89148992771, e-mail: 992771@mail.ru. ORCID ID:<https://orcid.org/0000-0001-6425-944X>

Information about author

Alexandr V. Petrov – Doctor of Technical Sciences, Professor at Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk National Research Technical University”.

Contact information: INRTU, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk city, 83 Lermontov Street, tel. 89148992771, e-mail: 992771@mail.ru. ORCID ID:<https://orcid.org/0000-0001-6425-944X>



DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-82-89

УДК 631.173

Научная статья

УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛОПАТОК СТАТОРА

О.В. Репецкий, Ван Мань Нгуен

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Россия

Аннотация. Развитие современных авиационных и энергических двигателей и систем их технической эксплуатации поставило перед промышленностью и наукой новые задачи. Одним из важнейших факторов является обеспечение надёжности изделий, сохранение их прочностных свойств на этапе производства. С целью повышения ресурса деталей роторов, особенно рабочих лопаток турбомашин, широкое распространение в современном машиностроении приобрели метод модификации направляющих решеток статора [2, 3]. С помощью этого метода, возможно уменьшить интенсивность возбуждающих сил, действующих на рабочие лопатки и привести к снижению динамических напряжений в самых нагруженных местах лопаток и в результате увеличить долговечность рабочего колеса. В представленной статье приведены варианты введения модификаций распределения направляющих лопаток статора, путём использования блочных моделей. Проведено тестирование на 3 типы модификации блоков лопаток статора: смещение по окружности одного блока лопаток относительно другого без изменения расстояния между лопатками внутри блоков, изменение расстояние между лопатками внутри блоков, комбинация двух вышеописанных способов. Из полученных результатов исследования долговечности рабочего колеса для каждого варианта, предложены рекомендации для конструкторов по увеличению ресурсных характеристик при проектировании и доводке новых изделий энергических и транспортных турбомашин. С помощью использования блочных моделей возможно максимально увеличить долговечность осевого рабочего колеса на +29.8%.

Ключевые слова: рекомендация, усталостная прочность, рабочие лопатки, блочная модель, турбомашин.

Для цитирования: Репецкий О.В., Нгуен Ван Мань. Увеличение усталостной прочности рабочих колес турбомашин путем использования блочных моделей направляющих лопаток статора. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 3 (52):82-89. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-82-89.

INCREASING THE FATIGUE STRENGTH OF TURBOMACHINE WORKING BLADES BY USING BLOCK MODELS OF STATOR GUIDE VANES

Oleg V. Repetckii, Van Manh Nguyen

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk Region, Russia

Abstract. The development of modern turbomachines for aviation and power engines and its technical operation system has set new challenges for industry and science. One of the most important tasks is to ensure the reliability of products, to preserve their strength properties at the production stage. In order to increase the service life of rotor parts, especially the working blades of turbomachines, the method of modifying stator guide grids has become widespread in modern mechanical engineering [2, 3]. With this method, it is possible to reduce the intensity of the exciting forces acting on the working blades and leads to a decrease in dynamic stresses in the most loaded places of the blades. As a result, increase the durability of the working blade. The article presents options for introducing modifications to the distribution of the stator guide vanes by using block models. Testing was carried out on 3 types of modification of stator blade blocks: displacement along the circumference of one blade block relative to another without changing the distance between the blades inside the blocks, changing the distance between the blades inside the blocks, a combination of the two methods described above. Based on the results of the study of the durability of the working blade for each variant, recommendations are proposed for the designer to increase the resource characteristics when designing and fine-tuning new products of energy and transport turbomachines. By using block models, it is possible to maximize the durability of the axial impeller by +29.8%.

Keywords: recommendation, fatigue strength, working blades, block model, turbomachines.

For citation: Repetckii O.V., Nguyen Van Manh. Development on a recommendation to increase the fatigue strength of working blade by using block models to modify the stator guide vanes. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 3 (52):82-89. DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-82-89.

Введение. Выход из строя одной или нескольких вращающихся лопаток турбомашин часто является причиной дорогостоящего преждевременного капитального ремонта. Степень внутренних повреждений в устройстве обычно зависит от промежуточной конфигурации и уровня динамических напряжений в материале. Большинство дефектов рабочих лопаток авиационных двигателей связаны с действием переменных нагрузок, поэтому повышение динамической прочности двигателя является одним из важнейших условий обеспечения надежности двигателя. Чем ниже переменные напряжения, тем легче обеспечить высокую надежность двигателя [7].

Одним из способов снижения динамических напряжений в рабочих лопатках при условиях эксплуатации, близких к резонансным, помимо конструкционного демпфирования, может быть уменьшение внешних возбуждающих сил [6, 8]. Для уменьшения интенсивности возбуждающих сил,

действующих на рабочие лопатки возможно изменение расположения лопаток по окружности статора. При эксплуатации рабочие лопатки турбомашин получают серию равномерно распределенных импульсов от следа статора. При изменении расстояния между лопатками статора, синхронизация этих импульсов изменяется и в результате приводит к снижению уровня возбуждения рабочих лопаток [9, 10].

Целью исследования является оценка возможности численного прогнозирования снижения уровня вибронпряжений в рабочих лопатках компрессора за счет изменения распределения направляющих лопаток статора [5]. В данной статье представлены результаты расчетов долговечности рабочих лопаток, соответствующих каждому варианту модификации статора.

Материалы и результаты исследования. В данной статье объектом исследования является модель академической ступени компрессора, состоящей из 10-ти лопаток статора и 10-ти лопаток ротора. Основные механические характеристики рабочих лопаток имеют вид: материал рабочего колеса – сталь, модуль Юнга – $2.1 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, плотность – 7850 кг/м^3 , коэффициент Пуассона – 0.3 [10].

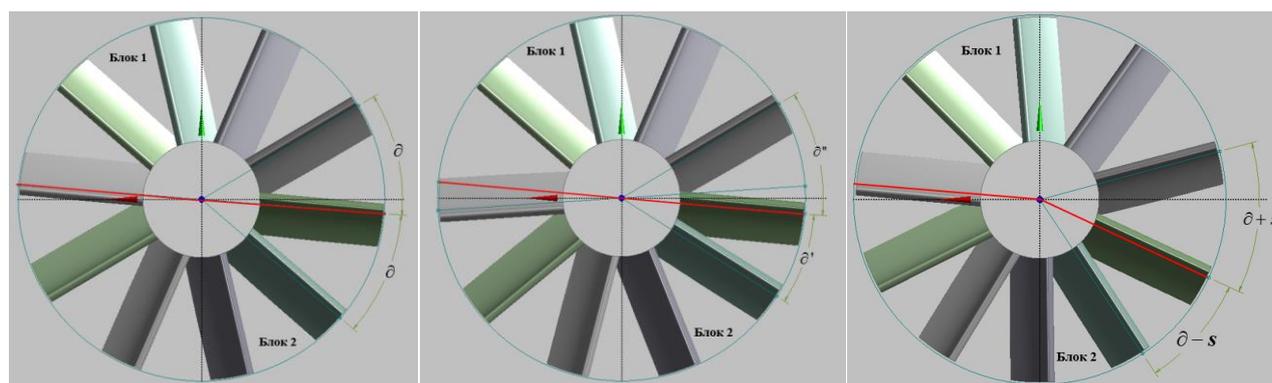


Рисунок 1 – Блочная модель статора

(а – блочная модель лопаток; б – первый тип модификации; в – второй тип модификации)

Figure 1 – **Block model of the stator**

(a – blades block model; b – the first type of modification; c – the second type of modification)

Для модификации ряда направляющих статора использована блочная модель из двух блоков, каждый блок содержит по 5-ть лопаток (рис. 1а). В равномерно распределенном случае конструкции лопаток статора угловые зазоры между лопатками одинаковые и равны $\delta = 36^0$. Для первого типа модификации один блок лопаток смещен по окружности относительно другого без изменения расстояния между лопатками внутри блоков (рис. 1б). Фазовое отклонение между блоками равно $\varphi = 360(\delta - \delta')/\delta$ (градус). Во втором варианте модификации (рис. 1в) расстояние в первом блоке составляет $\delta + s$, а в оставшемся блоке расстояние равно $\delta - s$. Изменение окружного расстояния

s предлагается варьировать от 0 до 16 процентов от стандартного расстояния [1, 4]. Для каждого типа проведены расчеты для 8-ми вариантов. Конфигурации вариантов показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Варианты модификации лопаток статора

Table 1 – Modification options for stator blades

Вариант	Тип 1 модификации	Тип 2 модификации	Тип 3 модификации	
			φ	s
1	$\varphi = 20$	s = 2 (%)	$\varphi = 20$	s = 9.7 (%)
2	$\varphi = 40$	s = 4 (%)	$\varphi = 40$	s = 6.9 (%)
3	$\varphi = 60$	s = 6 (%)	$\varphi = 60$	s = 8.3 (%)
4	$\varphi = 80$	s = 9.2 (%)	$\varphi = 80$	s = 10.3 (%)
5	$\varphi = 104$	s = 10 (%)	$\varphi = 104$	s = 9.6 (%)
6	$\varphi = 120$	s = 12 (%)	$\varphi = 120$	s = 8.5 (%)
7	$\varphi = 140$	s = 14 (%)	$\varphi = 140$	s = 8.7 (%)
8	$\varphi = 160$	s = 16 (%)	$\varphi = 160$	s = 8.1 (%)

На рисунке 2 приведены результаты расчета изменения долговечности рабочего колеса при использовании модифицированного статора. При использовании первого типа модификации – изменение фазы между блоками лопаток, наилучшим является 5-й вариант с изменением фазы между двумя блоками на 104 градуса. В этом случае долговечность рабочего колеса увеличивается на 11.4%. При использовании второго типа модификации – изменение расстояния между лопатками внутри блока, наилучшим является 4-ый вариант с расстоянием между лопатками внутри блока 9.2%. В этом случае долговечность рабочего колеса увеличивается на 21.1%. Использование второго и третьего типа модификации имеет более высокую эффективность для повышения долговечности рабочего колеса. Но они также требуют более сложной технологии изготовления, так как необходимо изменить расстояния между всеми лопатками статора. С точки зрения прочности можно рекомендовать использовать 4-й вариант третьего типа модифицированного статора с изменением фазы между двумя блоками на 80 градусов вместе с изменением расстояния между лопатками внутри блока на 9.2%. В этом случае возможно увеличить долговечность рабочего колеса на 29.8%.

В работе также протестирован вариант блочной модели статора из пяти блоков, каждый блок содержит по 2 лопатки (рис. 3а). В случае использования второго типа модификации предполагается, что первый блок сохраняет исходный стандартный интервал, а расстояние между лопатками в блоках 2 и 4 увеличивается на s, а расстояние между лопатками в блоках 3 и 5 уменьшается на такую же величину (рис. 3б).

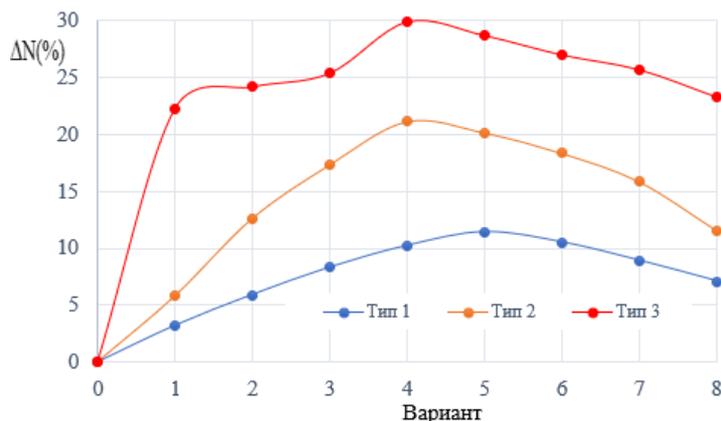


Рисунок 2 – Изменение долговечности рабочего колеса при использовании модифицированного статора

Figure 2 – Changing the durability of the working wheel when using a modified stator

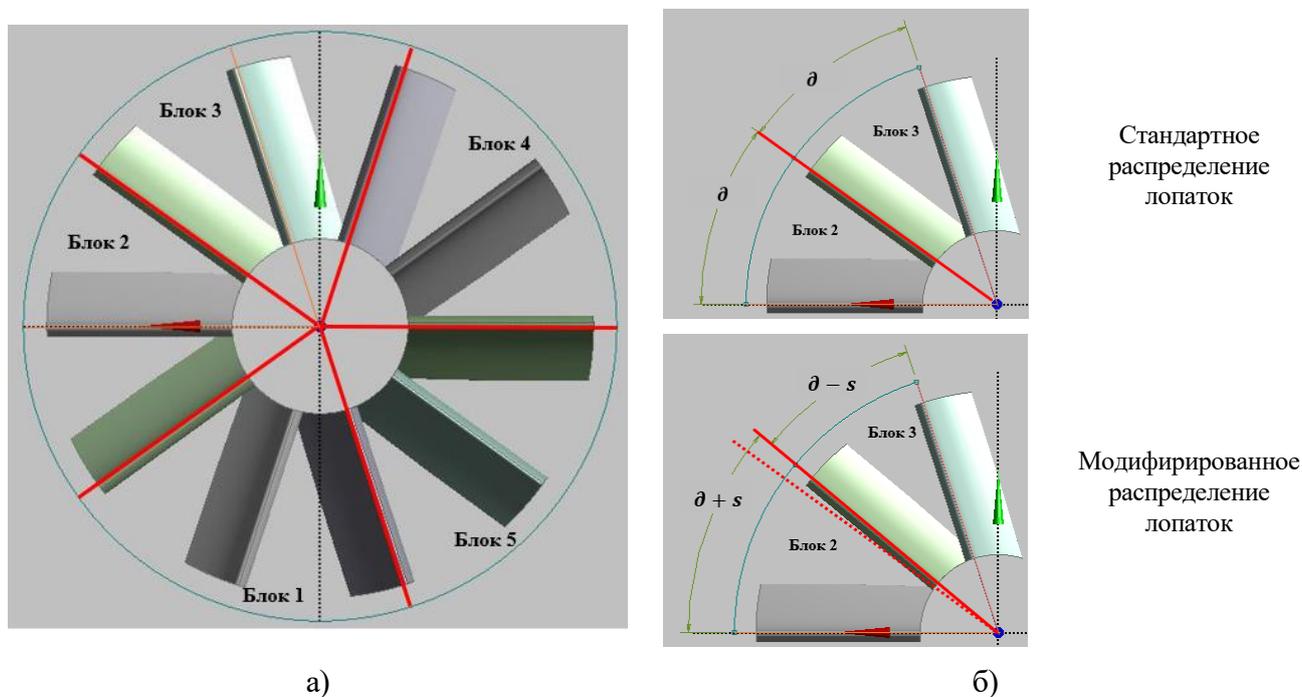


Рисунок 3 – Блочная модель статора из пяти блоков

(а – блочная модель лопаток; б – изменение углового зазора между лопатками в блоке)

Figure 3 – Block model of a five-block stator

(а – blades block model; б – change in the angular gap between the blades in the block)

При варьировании расстояния между лопатками s от 0 до 16% долговечность рабочего колеса под действием аэродинамических нагрузок изменяется. Результаты расчетов показаны в таблице 2. Для блочных моделей с 5-ю блоками наилучшим вариантом является изменение расстояния между лопатками в блоке на $s = 8.8\%$. При этом долговечность рабочих лопаток повышается максимально на 8.77%.

Таблица 2 – Расчет долговечности рабочего колеса

Table 2 – Calculation of the working wheel durability

Тип II модификации	N (циклов)	ΔN (%)
s = 0 (%)	36089	0
s = 2 (%)	36403	0.87
s = 4 (%)	36854	2.12
s = 6 (%)	38305	6.14
s = 8.8 (%)	39254	8.77
s = 10 (%)	38778	7.45
s = 12 (%)	37926	5.09
s = 14 (%)	37247	3.21
s = 16 (%)	36796	1.96

На основе полученных результатов исследования долговечности академического осевого рабочего колеса при использовании модифицированного статора авторами предложены следующие рекомендации для производителей энергетических и транспортных турбомашин по увеличению или продлению ресурсных характеристик при проектировании и доводке новых изделий или их эксплуатации:

1. Блочная модель из двух блоков по 5 лопаток с использованием 1-ого типа модификации статора, причем фазовое отклонение принимается равным $\varphi = 104^\circ$, способствует увеличению долговечности рабочего колеса на +11.4%.

2. Блочная модель из двух блоков по 5 лопаток с использованием 2-го типа модификации статора, где расстояния между лопатками первого блока увеличивается на 9.2%, а для второго блока уменьшается на 9.2%, способствует увеличению долговечности рабочего колеса на +21.1%.

3. Оптимальным вариантом для данного академического колеса является комбинирование варианта изменения расстояния между лопатками внутри блока одновременно со смещением блоков лопаток относительно друг друга. Данная конструкция колеса позволяет увеличить долговечность осевого рабочего колеса на +29.8%.

Выводы. В работе представлены методы использования блочных моделей для изменения распределения направляющих лопаток статора. Проведены исследования влияния модификации статора на уровень аэродинамических нагрузок и долговечности рабочих колес турбомашин. Выполнена оценка долговечности роторных деталей турбомашин в зависимости от варьирования геометрических характеристик и распределения направляющих лопаток на статоре. Из полученных результатов предложена математическая модель оптимизации введения модификации для получения конструкций роторных элементов турбомашин с повышенным ресурсом. С помощью использования блочных моделей возможно максимально увеличить долговечность осевого рабочего колеса на +29.8%.

Благодарность. Данная работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 24-29-00135 “Численное исследование способов увеличения ресурсных характеристик осевых и радиальных транспортных турбомашин с помощью преднамеренной расстройки геометрических, массовых, аэродинамических и других параметров влияния”. Авторы благодарят РФФИ за финансовую и научную поддержку настоящих исследований.

Список литературы

1. Костюк, А.Г. Паровые и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний // Учебник для вузов. Издательский дом МЭИ, Москва.– 2016. – С. 452-473.
2. Кухтин, Ю.П. Снижение вибронпряженности попарно бандажированных рабочих лопаток турбины / Ю.П. Кухтин, Р.Ю. Шакало // Aerospace technic and technology. – 2020. – No.7. – С.52-58.
3. Репецкий, О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин / О.В. Репецкий // Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. – 301 с.
4. Репецкий, О.В. Разработка методики исследования влияния изменения геометрических параметров на аэродинамические характеристики рабочих колес турбомашин// О.В. Репецкий, В.М. Нгуен // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК.– 2023.– 8 с.
5. Репецкий, О.В. Численный анализ прочностных характеристик машиностроительных конструкций с расстройкой параметров / О.В. Репецкий, В.В. Нгуен // Вестник НГИЭИ.– 2019. – № 7. – С. 27-38.
6. Clark, J.P. Using CFD to Reduce Resonance Stresses on a Single-stage, High-Pressure Turbine Blade / J.P. Clark, A.S. Aggarwala, M.A. Velonis // ASME–Paper. – 2002. – Vol. 4 – 7 p.
7. Huang, L. A novel design method of variable geometry turbine nozzles for high expansion ratios / L. Huang, H. Chen // 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. – 2017 –11p.
8. Kaneko, Y. Study on the Effect of Asymmetric Vane Spacing on Vibratory Stress of Blade[R] / Y. Kaneko, K. Mori, H. Okui // ASME–Paper. – 2004. – Vol. 6 – 8 p.
9. Kemp, R.H. Theoretical and Experimental Analysis of the Reduction of Rotor Blade Vibration in Turbomachinery through the Use of Modified Stator Vane Spacing / R.H. Kemp, M.H. Hirschberg // NACA-tn-4373. – 1958 – 44p.
10. Repetckii, O.V. Fatigue life of radial turbomachines at changing thickness blades taking into account intentional mistuning / O.V. Repetckii, D.C. Hoang // E3S Web of Conferences. – 2022, vol. 363, no. 1, 9 p.

References

1. Kostyuk, A.G. et all. Parovyie i gazovyie turbiny dlya elektrostantsiy [Steam and gas turbines for power plants]. Uchebnik dlya vuzov. Izdatel'skiy dom MEI, Moscow, 2016, pp. 452-473.
2. Kukhtin, Yu.P, Shakalo, R.Yu. Snizheniye vibronapryazhennosti poparno bandazhировannykh rabochikh lopatok turbiny [Reducing vibration stress of pairwise bandaged turbine blades]. Aerospace technic and technology, 2020, no.7, pp. 52-58.
3. Repetskiy, O.V. Komp'yuternyy analiz dinamiki i prochnosti turbomashin [Computer analysis of the dynamics and strength of turbomachines]. Irkutsk, 1999, 301 p.
4. Repetskiy, O.V., Nguyen, V.M. Razrabotka metodiki issledovaniya vliyaniya izmeneniya geometricheskikh parametrov na aerodinamicheskiye kharakteristiki rabochikh koles turbomashin [Development of a methodology for studying the influence of changes in geometric parameters on the aerodynamic characteristics of turbomachine working wheels]. Nauchnyye issledovaniya i razrabotki k vnedreniyu v APK, 2023, 8 p.
5. Repetskiy O.V., Nguyen, V.V. Chislennyy analiz prochnostnykh kharakteristik mashinostroitel'nykh konstruktsiy s rasstroykoy parametrov [Numerical analysis of strength

characteristics of mechanical engineering structures with parameter mismatch]. Vestnik NGIEI, 2019, no. 7, pp. 27-38.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the planning, execution and analysis of this study. All authors of the article reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

История статьи / Article history:

Дата поступления в редакцию / Received: 23.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 10.10.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 15.10.2024

Сведения об авторах

Репецкий Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, проректор по международным связям Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 83952237438, e-mail: repetckii@igsha.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>.

Нгуен Ван Мань – аспирант кафедры “Электрооборудования и физики” Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 89996835650, e-mail: manhzhuov@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4399-6146>.

Information about authors

Oleg V. Repetckii– Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice–Rector for International Relations, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 83952237438, e-mail: repetckii@igsha.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4118-7185>.

Van Manh Nguyen – Postgraduate student of the Department “Electrical power and physics” Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 89996835650, e-mail: manhzhuov@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4399-6146>.

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. Доля ссылок на публикации в журналах из ядра РИНЦ должна составлять не менее 50% списка литературы за последние 8 лет, цитирование работ какого-либо автора, входящего и не входящего в состав авторского коллектива рукописи не должно превышать 30%.
3. Статья должна соответствовать правилам оформления.
4. Автор может опубликовать одну статью в полугодие и два раза в год в соавторстве.

Правила оформления статьи

1. Представление статьи осуществляется в электронном виде через электронную редакцию (адрес: <http://agronauka-irsau.ru>). После регистрации в системе электронной редакции автоматически формируется персональный профиль автора. Затем необходимо загрузить статью через меню “Мои публикации”. Все взаимодействия с редактором происходят через электронную редакцию. **Внимание авторов, имеющих соавторов:** регистрационную форму заполняет основной контактный автор, остальные авторы указываются специальным списком в отдельном окне.
2. В электронной форме подачи статьи необходимо заполнить обязательные поля: “УДК”, “Название статьи”, “И.О. Фамилия автора”, “Название организации”, “Аннотация статьи”, “Ключевые слова”. Далее все поля дублируются на английском языке.
3. Текст статьи должен быть тщательно вычитан автором, который несет ответственность за научно-теоретический уровень публикуемого материала.

Структура статьи

1. УДК размещается в левом верхнем углу: полужирный шрифт, размер – 12 пт.
2. Название статьи (ПРОПИСНЫМИ БУКВАМИ), полужирный шрифт, 14 пт, межстрочный интервал – 1.0.
3. И.О. Фамилия автора(ов), полужирный шрифт, 12 пт.
4. Название организации, 12 пт, 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 рисунков и таблиц согласно стандарту (ГОСТ 7.1-2003). Названия рисунков и таблиц дублируются на английском языке.
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. Сведения об авторе(ах) дублируются на английском языке.

16. Нумерация страниц статьи обязательна.

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. Главный редактор 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. Главный редактор 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 главным редактором 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(ам) мотивированный отказ.
8. Статья, не рекомендованная рецензентом к публикации, к повторному рассмотрению не принимается. Текст отрицательной рецензии направляется автору(ам) по электронной или обычной почте.
9. Наличие положительной рецензии не является достаточным основанием для публикации статьи. Окончательное решение о целесообразности публикации принимается редакционным советом.
10. После принятия редакционным советом решения о допуске статьи к публикации главный редактор информирует об этом автора(ов) 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 электронного научно-практического журнала

“Актуальные вопросы аграрной науки” (<http://agronauka.igsha.ru>).

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 редакционным советом в течение месяца.

4. Редакционный совет правомочен отправить статью на дополнительное рецензирование.

5. Редакционный совет правомочен осуществлять научное и литературное редактирование поступивших материалов, при необходимости сокращать их по согласованию с автором(ами), либо, если тематика статьи представляет интерес для журнала, направлять статью на доработку автору(ам).

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

7. В случае отклонения представленной статьи редакционный совет дает автору(ам) мотивированное заключение.

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

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

Requirements
to articles published in the electronic scientific and practical journal
“Actual issues of agrarian science”

Conditions for publishing an article

1. The article submitted for publication must be relevant, have novelty, contain the statement of tasks (problems), a description of the main research results obtained by the author, and conclusions.
2. The share of references to publications in journals from the core of the RSCI should be at least 50% of the list of references for the last 8 years, citation of the works of any author, whether or not a member of the autograph team of the manuscript, should not exceed 30%.
3. The article must comply with the design rules.
4. The author can publish one article per half a year and twice a year as a co-author.

Article formatting rules

1. Submission of the article is carried out in electronic form through the electronic editorial office (address: <http://agronauka-irsau.ru>). After registration in the electronic editorial system, a personal profile of the author is automatically generated. Then you need to upload the article through the menu "My publications". All interactions with the editor occur through the electronic edition. To the attention of authors with co-authors: the main contact author fills out the registration form, the other authors are indicated in a special list in a separate window.
2. In the electronic form for submitting an article, it is necessary to fill in the required fields: “UDC”, “Article title”, “Author's initials and surname”, “Organization name”, “Article abstract”, “Keywords”. Further, all fields are duplicated in English.
3. The text of the article must be carefully proofread by the author, who is responsible for the scientific and theoretical level of the published material.

Article structure

1. UDC is placed in the upper left corner: bold, size – 12 pt.
2. Title of the article (in CAPITAL LETTERS), bold, 14 pt, line spacing – 1.0.
3. Author's initials and surname, bold, 12 pt.
4. Name of the organization, 12 pt, line spacing – 1.0.
5. The abstract of the article should reflect the main provisions of the work and contain from 200 to 250 words (font - Times New Roman, size - 12 pt, spacing - 1.0).
6. After the abstract, keywords are placed (font - Times New Roman, italics, size - 12 pt.).
7. Further: points 1, 2, 3, 4, 5, 6 are duplicated in English.
8. The main text of the article - Times New Roman font, size - 14 pt., line spacing - 1.0 pt.
9. At the end of the article there is a list of references (in alphabetical order) in Russian, drawn up in accordance with GOST 7.1-2003.
10. Next - transliteration of the entire list of references.
11. References to the literature are given in the text in square brackets.
12. Acknowledgment(s) or an indication(s) of what funds the research was carried out are given at the end of the main text after the conclusions (Times New Roman, 12 pt.).
13. Design of figures and tables according to the standard (GOST 7.1-2003). The names of figures and tables are duplicated in English.
14. A set of formulas is carried out in Microsoft Equation in version 3.0 or higher.
15. Information about the author(s): last name, first name, middle name (in full), academic degree, academic title, position, place of work (place of study or job seeker), contact numbers, e-mail, postal code and address of the institution. Information about the author(s) is duplicated in English.
16. The numbering of the pages of the article is obligatory.

Registration of articles

1. The received article is registered in the general list by the date of receipt.
2. The author(s) are notified by e-mail or by contact phone about the publication of the article(s) in the corresponding issue.
3. The editor-in-chief notifies the author(s) of receipt of the article within 7 days.

The procedure for reviewing articles

1. Scientific articles received by the editors are reviewed.
2. Forms of reviewing articles:
 - internal (review of manuscripts of articles by members of the editorial board);
 - external (direction for reviewing manuscripts of articles to leading experts in the relevant industry).
3. The editor-in-chief determines the compliance of the article with the profile of the journal, the requirements for registration and sends it for review to a specialist (doctor or candidate of sciences) who has the closest scientific specialization to the topic of the article.
4. The terms of reviewing in each individual case are determined by the editor-in-chief, taking into account the creation of conditions for the promptest publication of the article.
5. The review should cover the following issues:
 - whether the content of the article corresponds to the topic stated in the title;
 - how the article corresponds to modern achievements of scientific and theoretical thought;
 - is the article accessible to readers for whom it is designed in terms of language, style, arrangement of material, visibility of tables, diagrams, figures, etc.;
 - whether the publication of the article is appropriate, taking into account the previously published scientific literature on this issue;
 - what exactly are the positive aspects, as well as the disadvantages; what corrections and additions should be made by the author;
 - a conclusion about the possibility of publishing this manuscript in the journal: “recommended”, “recommended taking into account the correction of the shortcomings noted by the reviewer” or “not recommended”.
6. Reviews are certified in the manner prescribed by the institution where the reviewer works.
7. In case of rejection of the article from publication, the editors send a reasoned refusal to the author(s).
8. An article not recommended by the reviewer for publication is not accepted for re-consideration. The text of the negative review is sent to the author(s) by e-mail or regular mail.
9. The presence of a positive review is not a sufficient reason for publishing an article. The final decision on the expediency of publication is made by the editorial board.
10. After the editorial board decides on the admission of the article for publication, the editor-in-chief informs the author(s) about this and indicates the terms of publication.
11. The originals of the reviews are stored in the editorial office of the journal.

Order of consideration of articles

1. By submitting an article for publication, the author thereby agrees to place its full text on the Internet on the official websites of the scientific electronic library (www.elibrary.ru) and the electronic scientific and practical journal “Actual issues of agrarian science” (<http://agronauka.igsha.ru>).
2. Articles are accepted according to the established schedule:
 - in No. 1 (March) - until January 1 of the current year;
 - in No. 2 (June) - until April 1 of the current year;
 - in No. 3 (September) - until June 1 of the current year;
 - in No. 4 (December) - until September 1 of the current year.

In exceptional cases, in agreement with the editors, the deadline for submitting an article to the next issue can be extended by no more than three weeks.

3. Received articles are considered by the editorial board within a month.

4. The editorial board is authorized to send the article for additional review.

5. The editorial board is authorized to carry out scientific and literary editing of the received materials, if necessary, reduce them in agreement with the author(s), or, if the subject of the article is of interest to the journal, send the article for revision to the author(s).

6. The editorial board reserves the right to reject an article that does not meet the established requirements for the design or subject matter of the journal.

7. In case of rejection of the submitted article, the editorial board gives the author(s) a reasoned opinion.

8. The author(s) within 7 days receive a notification about the received article. A month after the registration of the article, the editors inform the author(s) about the results of the review and about the plan for publishing the article.

Detailed information about the design of articles can be obtained by e-mail: *iy mex@rambler.ru*.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
“АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ АГРАРНОЙ НАУКИ”**

Выпуск 3(52)

сентябрь

Технический редактор – Н.В. Спиридонова

Перевод – П.Г. Асалханов

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Дата выхода: 15.10.2024.

Усл. печ. л. 6.

Адрес редакции, издателя, типографии:

664038, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный,
ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ.