

Электронный научно-практический журнал
ELECTRONIC SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

актуальные вопросы аграрной науки

ACTUAL ISSUES
OF AGRARIAN SCIENCE

выпуск 2(51)

ИЮНЬ

VOLUME 2(51)

JUNE

ISSN: 2411-6483

МОЛОДЁЖНЫЙ 2024



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

2024 Выпуск 2 (51)

Electronic scientific-Practical journal
“Actual issues of agrarian science”

2024 Volume 2 (51)

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 10.51215/2411-6483-2024-50

Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”, 2024, выпуск 2 (51), июнь.

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 2 (51), June.
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

- Бочкарев В.А., Очиров В.Д.* Водогрейный котел для сжигания древесных отходов 8
- Пальвинский В.В., Федоров М.В.* Раздатчик концентратов-пододвигатель кормов для ферм КРС привязного содержания 17
- Поляков Г.Н., Шуханов С.Н., Косарева А.В., Яковлев Д.А.* Комплекс машин и орудий для возделывания зерновых культур в ранних сроках посева 26
- Черных А.Г.* Динамическая модель регулятора давления прямого действия дождевателей с низким напором 36

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Иваньо Я.М., Ананьев Л.С.* Моделирование потенциала производства растениеводческой продукции в условиях неопределенности 47
- Куликов В.В., Куцый Н.Н.* Параметрическая оптимизация регулятора с переменной структурой с использованием линейного интегрального критерия 60
- Репецкий О.В.* Верификация и доработка математических моделей и программного обеспечения на примере расчетов осевых и радиальных рабочих колес турбомашин 73
- Туктарова П.А.* Использование регрессионного анализа для моделирования кадровых угроз 86

CONTENS

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AGRO-ENGINEERING SYSTEMS

<i>Bochkarev V.A., Ochirov V.D.</i> Wood waste burning water boiler	8
<i>Palvinsky V.V., Fedorov M.V.</i> Concentrate dispenser - feed motor for housing cattle farms	17
<i>Polyakov G.N., Shukhanov S.N., Kosareva A.V., Yakovlev D.A.</i> A complex of machines and implements for the cultivation of grain crops in the early terms of sowing	26
<i>Chernykh A.G.</i> Dynamic model of pressure regulator for direct action of sprinklers with low pressure	36

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING, MANAGEMENT, MATHEMATICAL MODELING

<i>Ivanyo Ya.M., Ananyev L.S.</i> Modeling the production potential of crop products under uncertainty	47
<i>Kulikov V.V., Kutsy N.N.</i> Parametric optimization of a controller with variable structure using a linear integral criterion	60
<i>Repetskii O.V.</i> Verification and development of mathematical models and software using the example of calculations of axial and radial impellers of turbomachines	73
<i>Tuktarova P.A.</i> Using regression analysis to model personnel threats	86



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

DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-8-16
УДК 631.571

Научная статья

ВОДОГРЕЙНЫЙ КОТЕЛ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

^{1,2}Бочкарев В.А., ¹Очиров В.Д.

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

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

Аннотация. С момента появления человека на планете Земля одним из первых источников тепловой энергии для обогрева жилища являлась древесина, оставаясь основным энергоносителем на протяжении длительного периода. По мере относительно быстрого развития науки и техники в области освоения более энергоемких источников энергии потребление древесины, как топлива для получения тепловой энергии, сокращалось. Основным направлением использования древесины в настоящее время является ее переработка для получения строительного материала и сырья целлюлозно-бумажной промышленности. В двадцатом веке объемы переработки древесины стали измеряться миллионами кубических метров, после которых остается не меньше по количеству древесных отходов. Ежедневно человечество сталкивается с проблемой переработки растущих потоков бытовых и промышленных отходов, в том числе и древесных. Возможности природы по естественной переработке и утилизации отходов весьма ограничены. В связи с этим возникает необходимость создания установок по эффективному использованию древесных отходов в качестве дешевого источника энергии. Нами в работе представлены результаты исследований по разработке и изготовлению водогрейного котла для сжигания древесных отходов. Представлена схема водогрейного котла, приведено описание и назначение его основных элементов. Для сушки древесных отходов (пеллет) высокой влажности в водогрейном котле предусмотрена подсушивающая шахта, которая расположена между бункером топлива и питателем топлива. В работе для изготовленного водогрейного котла произведен расчет параметров подсушивающей шахты.

Ключевые слова: водогрейный котел, древесные отходы, балансовые испытания, пеллеты, экологичность, экономичность, коэффициент полезного действия, подсушивающая шахта.

Для цитирования: Бочкарев В.А., Очиров В.Д. Водогрейный котел для сжигания древесных отходов. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2 (51):8-16. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-51-8-16.

WOOD WASTE BURNING WATER BOILER

^{1,2}Victor A. Bochkarev, ¹Vadim D. Ochirov

¹Irkutsk state agricultural university named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk district, Irkutsk region, Russia

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

Abstract. Since the appearance of man on planet Earth, wood was one of the first sources of thermal energy for heating a home, remaining the main energy carrier for a long period. With the relatively rapid development of science and technology in the field of development of more energy-intensive energy sources, the consumption of wood as fuel for generating thermal energy has decreased. The main use of wood currently is its processing to obtain building materials and raw materials for the pulp and paper industry. In the twenty-first century, the volume of wood processing began to be measured in millions of square cubic meters, after which no less amount of wood waste remains. Every day, humanity is faced with the problem of processing growing flows of household and industrial waste, including wood. Nature's ability to naturally process and dispose of waste is very limited. In this regard, there is a need to create installations for the efficient use of wood waste as a cheap source of energy. We present in this work the results of research on the development and manufacture of a hot water boiler for burning wood waste. A diagram of a hot water boiler is presented, a description and purpose of its main elements are given. To dry wood waste (pellets) of high humidity, a drying shaft is provided in the hot water boiler, which is located between the fuel hopper and the fuel feeder. In this work, for the manufactured hot water boiler, the parameters of the drying shaft were calculated.

Keywords: hot water boiler, wood waste, balance tests, pellets, environmental friendliness, economy, efficiency, drying shaft.

For citation: Bochkarev V.A., Ochirov V.D. Wood waste burning water boiler. *Electronic scientific-practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 2 (51):8-16. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-51-8-16.

Введение. Восточная Сибирь, в частности, Иркутская область, богата огромными запасами различных природных ресурсов. На территории области находится “священное” для коренного населения бурят озеро Байкал, которое обладает до 20% мировых запасов пресной воды и, являясь участком всемирного природного наследия, находится в центре внимания ученых и Правительства нашей страны. В связи с этим для всех жителей региона первостепенным становится экологичное энергоснабжение прилегающей территории как неперемное условие обеспечения устойчивости уникального природного комплекса.

Кроме водных ресурсов, на основе которых в союзные времена возведен каскад гидроэлектростанций на реке Ангара, имеются и другие резервы, к которым можно отнести таежные леса, занимающие около 90% территории региона. В среднем, исходя из площади лесного массива и численности населения, можно предположить, что на одного жителя

приходится более 20 га лесной площади, что значительно выше общероссийского и общемирового показателей.

В плане лесозаготовок и производства деловой древесины область находится на передовых позициях в России, общий объем которых достигает громадной цифры, равной около 35 миллионов кубических метров [3]. Лесозаготовку проводят в целях получения строительного материала, сырья для целлюлозно-бумажной промышленности, собственных нужд жителями сельских территорий, а также других целей.

При переработке древесных даров леса остается много отходов, которые измеряются миллионами кубических метров, и каков сейчас объем древесных отходов в регионе оценить трудно.

Понятно одно, что чем больше объем переработки деловой древесины, тем, соответственно, больше количество древесных отходов. Пример производства обычных досок показывает, что после их получения в готовом виде от исходного сырья остается до 40-50% отходов [3]. Есть устоявшееся мнение, что древесные отходы относятся к побочному продукту технологий лесозаготовок, но с развитием науки и техники их тоже можно использовать с пользой для человека, что, в свою очередь, уже не позволяет делить продукты переработки древесины на основные и второстепенные, главные и побочные. Востребованным направлением является использование древесных отходов для получения электрической и тепловой энергии [4-7, 11, 12].

Основные места лесозаготовок в Иркутской области расположены в северных районах, находящихся на большом расстоянии от областного центра. Особенностью отходов лесопереработки является то, что их невозможно долго хранить из-за постепенного их разложения. Площадь размещения отходов переработки древесины составляет десятки гектаров и на них находится больше нескольких миллионов тонн древесных отходов, что приводит время от времени их возгоранию, перерастающему в пожары. Частично в целях утилизации отходы деревопереработки сжигают на свалках. Относительно низкая калорийность такого рода материала не позволяет по экономическим соображениям перевозить их на дальние расстояния, поэтому древесные отходы остаются использовать на месте их образования, что и делают многие лесоперерабатывающие предприятия, сжигая отходы на своих котельных для обеспечения тепловой энергией различные технологические процессы.

Кроме этого, в последние годы из опилок стали активно производить pellets и брикеты, имеющие более высокий коэффициент полезного действия в сравнении с обычными дровами, используемыми в качестве топлива в печном и котельном отоплении. В отношении угля pellets и брикеты более экологически чистое топливо. В зарубежных странах в виду ограничения топливно-энергетических ресурсов pellets получили большой спрос и востребованность.

Несмотря на то, что в области ежегодно растет объем производства pellets и брикетов, а также идет постепенное вовлечение в топливно-

энергетический баланс отходов лесоперерабатывающей промышленности, их доля в топливно-энергетическом балансе невелика и составляет около 8%. Из всего количества работающих котельных региона примерно в 10% из них используют древесное топливо [3]. Частично это может быть связано с тем, что большая часть котельных установок работает на угле.

Цель работы – разработать и изготовить водогрейный котел для сжигания древесных отходов с получением тепловой энергии.

Материалы и результаты исследования. Разработка водогрейного котла малой мощности началась в 2017 году с подготовки рабочей документации, в том числе получение патента на изобретение [10]. Теоретические и практические основы по разработке водогрейного котла были заложены на кафедре теплоэнергетики ФГБОУ Иркутский национальный исследовательский технический университет. Изготовление котла проведено в 2018 году ООО “Иркутский завод котельного оборудования”, на основе разработанных чертежных документов. Котел с вихревой топкой модульного исполнения имеет теплопроизводительность 2.0 Гкал/ч (2.33 МВт) (рис. 1). Перечень обозначений водогрейного котла представлен в таблице.

Подробное описание конструкции и работы котла представлено в работе [10]. Здесь стоит отметить, что котел работает с организацией вихревой технологии сжигания, значительно повышающей эффективность работы котла [2].

Рабочие параметры и функции водогрейного котла следующие:

- температура воды на выходе из котла – 115°C
- гидравлическое сопротивление водяного тракта – 0,07 МПа;
- коэффициент полезного действия котла (брутто) – 84%.
- 90-95% подогретого воздуха подается через сопла нижнего дутья;
- доля конвективной составляющей в теплообмене составляет до 30%;
- сниженное гидравлическое сопротивление котла по воде до 30% за счет выполнения гидравлической схемы в виде двух контуров;
- движение дымовых газов и воды происходит по противоточной схеме.

К основным достоинствам дровяного топлива следует отнести низкую зольность, отсутствие серы и высокий выход летучих горючих (80-85%) [9]. Однако при таких достоинствах древесные отходы, используемые в качестве топлива в водогрейных котлах, имеют высокую влажность (до 60%), существенно влияющую на значение теплоты сгорания. Влага является внешним балластом древесных отходов и снижает их теплоту сгорания. При сжигании топлива с высокой влажностью требуются дополнительные затраты на испарение влаги. В процессе сгорания испарившаяся влага древесных отходов отбирает теплоту от уходящих дымовых газов на свой подогрев, что в свою очередь, понижает температуру газов. При пониженной температуре газов к рабочей среде передается меньшее количество теплоты.

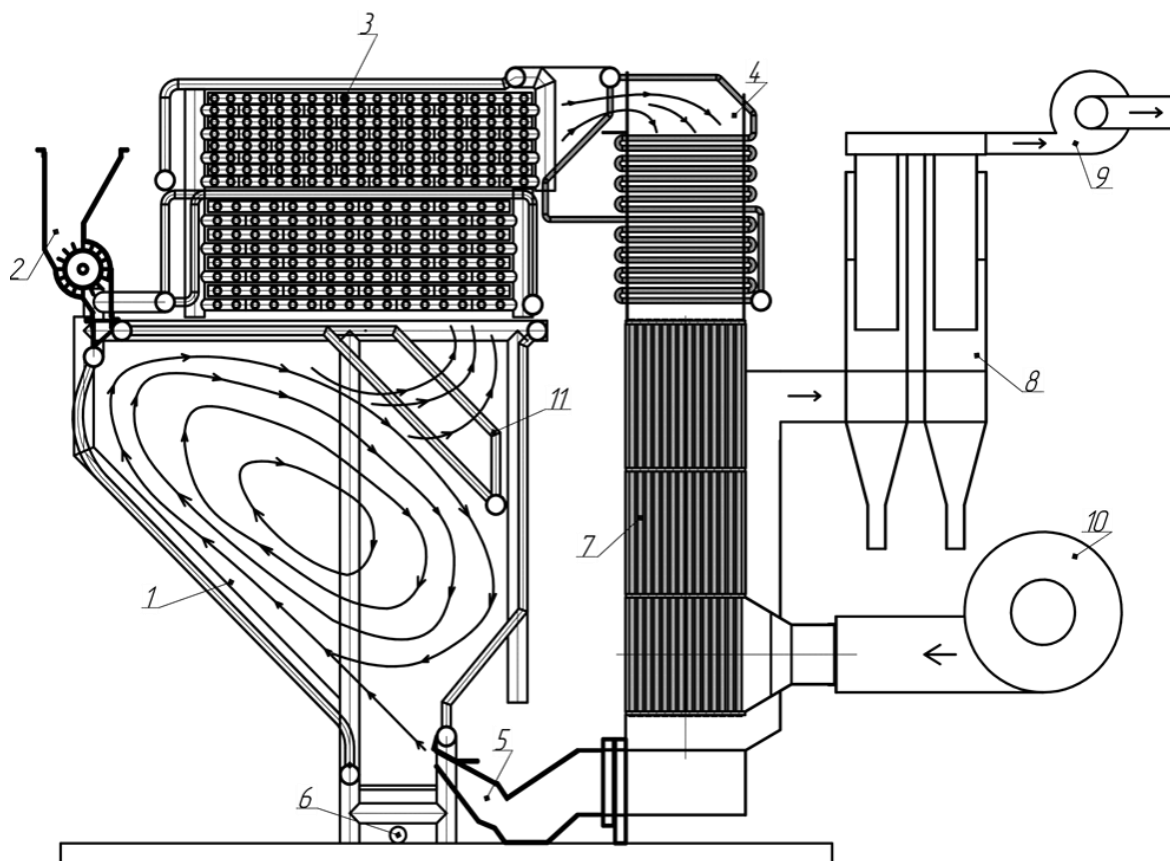


Рисунок 1 – Водогрейный котел

Figure 1 – Hot water boiler

Таблица – Обозначения водогрейного котла (рис. 1)

Table – Hot water boiler designations (fig. 1)

Поз.	Элемент	Назначение
1	Камера сгорания с вихревой топкой	Организация вихревой зоны
2	Питатель топлива	Подача топлива из бункера топлива
3	Конвективный пучок	Снижение температуры дымовых газов
4	Экономайзер	Подогрев питательной воды перед её поступлением в котёл
5	Сопла нижнего дутья	Регулирование подачи разогретого воздуха в топку в зависимости от нагрузки на котле
6	Подача воздуха под дожигательную колосниковую решетку	
7	Воздухоподогреватель	Подогрева воздуха, направляемого в топку котла
8	Золоуловитель	Очистка дымовых газов от механических включений
9	Дымосос	Принудительный отвод горячих газов из котла в дымоход
10	Дутьевой вентилятор	Подача воздуха в топку котла
11	Сепарационный экран	Возврат несгоревших частиц топлива в вихревую зону

Снижение влажности поступающих древесных отходов можно осуществить путем сушки, что одновременно обеспечит и повышение эффективности сжигания. Для сушки древесных отходов высокой влажности

необходимо предусмотреть подсушивающую шахту (рис. 2) [8], которую располагают между бункером топлива и питателем топлива. В работе для изготовленного водогрейного котла был произведен расчет параметров подсушивающей шахты. Расчеты по габаритным размерам и рабочим параметрам подсушивающей шахты проведены по методике, представленной в работе [1]. Поверхность теплообмена в подсушивающей шахте будет составлять 20,1 м² при скорости подсушивающих газов 1 м/с при температуре 400°С.

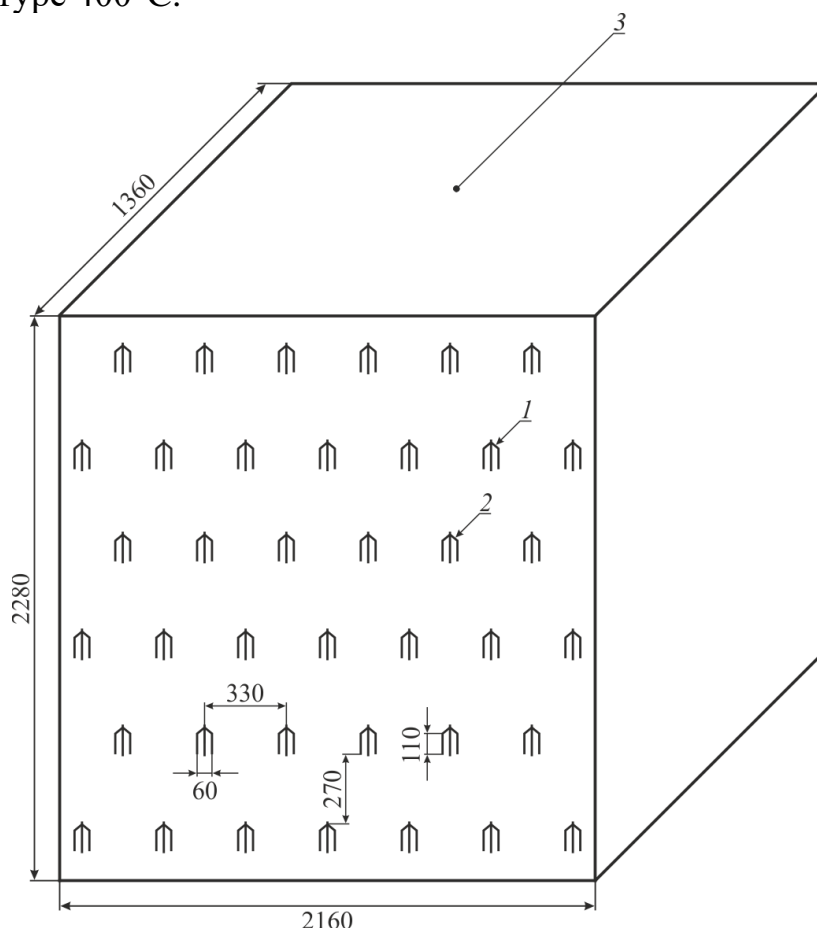


Рисунок 2 – Схематическое изображение подсушивающей шахты:

1 – подача подсушивающего агента; 2 – отвод сушильного агента; 3 – металлическая шахта

Figure 2 – Schematic representation of the drying shaft:

1 – supply of drying agent; 2 – drying agent outlet; 3 – metal shaft

Предложенное мероприятие позволило снизить влажность древесных отходов с 40 до 25%, что дало повышение калорийности (теплота сгорания) древесных отходов с 10600 кДж/кг (2400 ккал/кг) до 13408 кДж/кг (3200 ккал/кг). В результате повышения калорийности древесных отходов расход топлива на водогрейный котел снизился с 943 до 713 кг/ч.

Вывод. Разработан и изготовлен водогрейный котел для сжигания древесных отходов с получением тепловой энергии, прошедший опытные балансовые испытания. В котле предусмотрена подсушивающая шахта для

снижения влажности поступающего топлива. Применение подсушивающей шахты позволяет значительно повысить эффективность процесса сжигания подсушенных древесных отходов. Котел предлагается к внедрению на котельных населенных пунктов, вблизи которых расположены предприятия по переработке древесины. Опыт работы в отрасли теплоснабжения показывает, что большинство таких котельных работают на угле. Для дальнейших исследований в котле необходимо изменить последовательность расположения экономайзера и воздухоподогревателя. Такой подход позволит получить более высокую температуру подогрева воздуха при сохранении относительно небольшой поверхности нагрева воздухоподогревателя, что в итоге приведет к повышению эффективности воспламенения и горения топлива.

Список литературы

1. Бочкарев, В.А. Влияние влажности углей на показатели работы котельных агрегатов / В.А. Бочкарев, В.Д. Очиров // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2021. – № 39. – С. 5-13.
2. Бочкарев, В.А. Повышение эффективности слоевого сжигания топлива / В.А. Бочкарев, В.Д. Очиров // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 5(15). – С. 85-88.
3. Дементьева, Е. Древесные отходы в Приангарье намерены пустить в дело / Е. Дементьева // Российская газета – Спецвыпуск: лесная промышленность. – 2017. – № 208 (7374). – С. 3.
4. Карпунин, И.И. Использование отходов растительного сырья для производства энергии / И.И. Карпунин, В.В. Кузьмич, Т.Ф. Балабанова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 6. – С. 72-75.
5. Кирпичникова, И.М. Древесные отходы как возобновляемый источник для получения тепловой и электрической энергии / И.М. Кирпичникова, Н.С. Филь // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 16 (275). – С. 18-21.
6. Кузнецов, Н.М. Древесные отходы – дополнительный источник энергии на Северо-Западе России / Н.М. Кузнецов // Горный журнал. – 2004. – № 5. – С. 119-120.
7. Лозовецкий, В.В. Получение электрической и тепловой энергии из древесных отходов лесного комплекса и других растительных биоресурсов / В.В. Лозовецкий, А.А. Шадрин, В.В. Лебедев, И.В. Статкевич, Ю.А. Маркова // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2012. – № 6. – С. 172-175.
8. Ницкевич, Е.А. Проектирование котельных агрегатов малой и средней производительности / Е.А. Ницкевич. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 404 с.
9. Павлов, И.И. Котельные установки и тепловые сети / И.И. Павлов, М.Н. Федоров. – М.: Стройиздат, 1977. – 301 с.
10. Пат. 2661438 Российская Федерация, С1 МПК F23В 30/00. Водогрейный котел с пневматической топкой / Друзь В.Г., Бочкарев В.А.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью “Иркутский завод котельного оборудования” (ООО “ИЗКО”) (RU). – 2017120660; заявл. 13.06.2017, опубл. 16.07.2018, Бюл. № 20. – 11 с.
11. Рыжкова, Т.В. Энергетическое использование древесных ресурсов / Т.В. Рыжкова // Лесной вестник (1997-2002). – 2002. – № 4. – С. 159-163.
12. Bochkarev, V. The use of local energy resources for remote populated areas / V. Bochkarev, N. Dekanova, V. Khan, E. Gubiy, V. Zorkaltsev // MATEC Web of Conferences: electronic edition. – Irkutsk: EDP Sciences, 2018. – vol. 212. – pp. 02008.

References

1. Bochkarev, V.A., Ochirov, V.D. Vliyanie vlazhnosti uglej na pokazateli raboty kotel'nyh agregatov [The influence of coal moisture on the performance of boiler units]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, 2021, no. 39, pp. 5-13.
2. Bochkarev, V.A., Ochirov, V.D. Povyshenie effektivnosti sloevogo szhiganiya topliva [Improving the efficiency of fuel layer combustion]. Innovacii v sel'skom hozyajstve, 2015, no. 5 (15), pp. 85-88.
3. Dement'eva, E. Drevesnye othody v Priangar'e namereny pustit' v delo [Wood waste in the Angara region is to be put to use]. Rossijskaya gazeta, 2017, no. 208 (7374), pp. 3.
4. Karpunin, I.I. et al. Ispol'zovanie othodov rastitel'nogo syr'ya dlya proizvodstva energii [Using waste plant materials for energy production]. Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG, 2011, no. 6, pp. 72-75.
5. Kirpichnikova, I.M., Fil' N.S. Drevesnye othody kak vozobnovlyaemyj istochnik dlya polucheniya teplovoj i elektricheskoy energii [Wood waste as a renewable source for generating thermal and electrical energy]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika, 2012, no. 16 (275), pp. 18-21.
6. Kuznecov, N.M. Drevesnye othody – dopolnitel'nyj istochnik energii na Severo-Zapade Rossii [Wood waste – an additional source of energy in the North-West of Russia]. Gornyj zhurnal, 2004, no. S, pp. 119-120.
7. Lozoveckij, V.V. et al. Poluchenie elektricheskoy i teplovoj energii iz drevesnyh othodov lesnogo kompleksa i drugih rastitel'nyh bioresursov [Obtaining electrical and thermal energy from wood waste of the forest complex and other plant bioresources]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik, 2012, no. 6, pp. 172-175.
8. Nickevich, E.A. Proektirovanie kotel'nyh agregatov maloj i srednej proizvoditel'nosti [Design of boiler units of small and medium capacity]. Moscow-Leningrad, 1951, 404 p.
9. Pavlov, I.I., Fedorov M.N. Kotel'nye ustanovki i teplovyje seti [Boiler plants and heating networks]. Moscow, 1977, 301 p.
10. Pat. 2661438. Vodogrejnij kotel s pnevmaticheskoy topkoj [Hot water boiler with pneumatic furnace]. Opubl. 16.07.2018, no. 20, 11 p.
11. Ryzhkova, T.V. Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnyh resursov [Energy use of wood resources]. Lesnoj vestnik (1997-2002), 2002, no. 4, pp. 159-163.

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: 19.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 26.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторах

Бочкарев Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения и теплотехники энергетического факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского, доцент кафедры теплоэнергетики Иркутского национального исследовательского технического университета.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, e-mail: v_bochkariev@mail.ru.

Очиров Вадим Дансарунович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой энергообеспечения и теплотехники энергетического факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, e-mail: ochirov@igsha.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9978-9691>.

Information about authors

Viktor A. Bochkarev – candidate of technical sciences, associate professor of the department of energy supply and heat engineering, energy faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, associate professor of the department of thermal power engineering, Irkutsk National Research Technical University.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, e-mail: v_bochkariev@mail.ru.

Vadim D. Ochirov – candidate of technical sciences, head of the department of energy supply and heat engineering, energy faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, e-mail: ochirov@igsha.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9978-9691>.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-17-25

УДК 631.3.06

Научная статья

РАЗДАТЧИК КОНЦЕНТРАТОВ-ПОДОДВИГАТЕЛЬ КОРМОВ ДЛЯ ФЕРМ КРС ПРИВЯЗНОГО СОДЕРЖАНИЯ

В.В. Пальвинский, М.В. Федоров

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

Аннотация. Современное молочное животноводство предъявляет высокие требования к эффективности использования кормов. Концентрированные корма составляют значительную часть в структуре рациона высокопродуктивных животных и поэтому, от их грамотного применения существенно зависит эффективность хозяйства в целом. На фермах беспривязного содержания для выдачи концентратов сверх нормы, выдаваемой в смеси с основными кормами, применяют кормовые станции с радиочастотной идентификацией животных и практикуют выдачу при доении. Установлено, что в Российской Федерации огромную долю животноводческих ферм все еще составляют фермы привязного содержания, где значимая часть концентратов выдается вручную. Основные корма, в большинстве случаев, выдаются на кормовой стол и требуют периодического пододвигания, так как животные откидывают их в зону недосягаемости. Для пододвигания кормов используют навесные и самоходные машины различной конструкции и роботы. В данной работе для механизации процесса выдачи концентрированных кормов и пододвигания основных на фермах привязного содержания предложен электрифицированный раздатчик концентратов-пододвигатель кормов с системой идентификации животных, позволяющий непрерывно без остановки пододвигать корм, распознавать животных и выдавать заданную норму концентратов. Данная машина состоит из электрифицированного шасси, спирально-винтового дозатора, бункера для концентратов, кабины для оператора, системы идентификации животных и шнекового пододвигателя. Представлены результаты хронометрических измерений, где установлено время, затрачиваемое для выдачи вручную концентрированных кормов группе коров, состоящей из 42 животных. Приведено обоснование, что применение данного раздатчика концентратов-пододвигателя кормов в сравнении с ручным способом, позволит при использовании его на ферме крупного рогатого скота молочного направления привязного содержания на 200 голов экономить до 2590 часов в год.

Ключевые слова: раздатчик концентратов, пододвигатель кормов, идентификация животных, молочное животноводство.

Для цитирования: Пальвинский В.В., Федоров М.В. Раздатчик концентратов-пододвигатель кормов для ферм КРС привязного содержания. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2(51):17-25. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-51-17-25.

CONCENTRATE DISPENSER - FEED MOTOR FOR HOUSING CATTLE FARMS

Viktor V. Palvinsky, Mikhail. V. Fedorov

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

Abstract. Modern dairy farming places high demands on the efficiency of feed use. Concentrated feeds make up a significant part in the structure of the diet of highly productive animals and therefore the efficiency of the farm as a whole significantly depends on their proper use. On free-stall farms, to supply concentrates in excess of the norm given in a mixture with basic feed, feed stations with radio frequency identification of animals are used and distribution is practiced during milking. It has been established that in the Russian Federation a huge proportion of livestock farms are still confined farms, where a significant part of the concentrates is dispensed manually. The main feed, in most cases, is given out on the feeding table and requires periodic pushing, as the animals throw it out of reach. To push feed, mounted and self-propelled machines of various designs and robots are used. In this work, to mechanize the process of dispensing concentrated feed and pushing the main ones on tethered farms, an electrified concentrate dispenser-feed pusher with an animal identification system is proposed, which allows you to continuously push feed without stopping, recognize animals and issue a given rate of concentrates. This machine consists of an electrified chassis, a spiral-screw feeder, a concentrate hopper, an operator's cabin, an animal identification system and a screw drive. The results of chronometric measurements are presented, which establish the time spent manually dispensing concentrated feed to a group of cows consisting of 42 animals. The rationale is given that the use of this concentrate dispenser-feed mover, in comparison with the manual method, will allow saving up to 2590 hours per year when using it on a tied dairy cattle farm of 200 heads.

Key words: Key words: concentrate distributor, feed pusher, animal identification, dairy farming.

For citation: Palvinsky V.V., Fedorov M.V. Concentrate dispenser - feed motor for housing cattle farms. *Electronic scientific-Practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2024; 2 (51):17-25. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-51-17-25.

Введение. В структуре себестоимости продукции животноводства корма занимают половину и более от всех затрат связанных с ее производством. Технология кормления коров будет иметь свои особенности в зависимости от способа содержания животных. В настоящее время огромная часть вновь возводимых животноводческих комплексов по производству молока выбирают беспривязный способ содержания крупного рогатого скота (КРС), требующий существенно меньших затрат труда [5]. Несмотря на это в России все еще самым распространенным является привязное содержание КРС, имеющее свои существенные преимущества [11]. При таком способе основные корма выдают 1-2 раза в сутки на кормовой стол или в кормушки. Сегодня кормушки практически не используются. Животные, поедая корм с кормового стола, отбрасывают его в зону недосягаемости, поэтому корма периодически необходимо пододвигать обратно к коровам.

Следует учитывать, что в рационе высокопродуктивных молочных кормов существенную долю составляют концентрированные корма. Их

количество, выраженное в кормовых единицах, в разные фазы лактации может достигать 50 и более процентов [10]. При этом они вместе с премиксами являются самой дорогой частью рациона. Часть концентратов дается животным в виде смеси. Но так как животные на ферме имеют разную продуктивность и находятся в разной фазе технологического цикла, то часть концентрированных кормов дается в чистом виде индивидуально, а на фермах привязного содержания, как правило, вручную.

В связи с вышесказанным, считаем, что разработка средств механизации выдачи концентрированных кормов и пододвигания основных кормов является актуальной задачей, имеющей научный и практический интерес.

Целью исследования является разработка раздатчик концентратов-пододвигатель кормов для ферм КРС молочного направления.

Материалы и методы. В состав концентратов могут входить, отруби, измельченное зерно таких культур как ячмень, пшеница, кукуруза, овес и продукты переработки масличных культур: жмыхи и шроты, а также различные витаминные и минеральные добавки. Степень измельчения и норма кормления определяется исходя из физиологической группы животного [1].

Представляют интерес исследования по кормлению молочных коров по детализированным нормам [4]. Комбикорм готовили в хозяйстве и давали животным дополнительно. Комбикорм №1 для групп с удоем более 32 л, 25-32 л состоял из кукурузы, пшеницы, ячменя, жмыха и шрота (соевого, рапсового и подсолнечного), отрубей. Для групп с удоем 16-24 и менее 16 литров использовали комбикорм №2 с аналогичными компонентами с меньшим количеством высокопитательных добавок. Авторы считают, что низкие показатели производства молока в хозяйствах обусловлены в первую очередь плохой организацией дифференцированного кормления и нарушением структуры рациона. Исследователи при пятилетнем наблюдении установили, что дифференцированное кормление позволяет сократить затраты концентрированных кормов на производство 1 литра молока с 560 до 380 гр и на 18% повысить показатели воспроизводства. Помимо этого, у контрольной группы увеличился удой с 6162 кг до 10313 кг на 1 голову [4].

Другими авторами отмечено, что с повышением продуктивности животных следует более внимательно относиться к составлению рациона, от потребления и состава которого сильно зависит срок восстановления репродуктивных органов КРС, и как следствие продолжительность сервис-периода [3].

В другой работе, дифференцированное кормление концентратами показана эффективность метода [12]. Авторы проводили наблюдение, где в одной группе концентраты выдавались исходя из средней продуктивности группы, а во второй норма выдачи рассчитывалась индивидуально. При индивидуальном подходе продуктивность коров в группе увеличилась на 2.9% с увеличением жирности молока на 11.1% [12].

При пододвигании кормов также имеет значение и частота [13]. В данной работе оценивалось влияние подталкивания кормов в группе 32-37

голов черно-пестрой чешской породы на пике лактации. Наблюдение показало, что производство молока увеличилось, в соответствии с частотой подталкиваний 2,3, 4, 5, 6, на 24.52; 25.84; 25.48; 25.78; 26.03 кг/гол в сутки соответственно. Конверсия корма также увеличилась и составила 1.22; 1.29; 1.25; 1.30 и 1.30 кг молока на 1 кг потребленного сухого вещества. Молочная продуктивность при шестикратном подталкивании в сравнении с двухкратным увеличилась на 5.8%.

Для выдачи концентратов животным при привязном содержании используются прицепные раздатчики и подвесные кормовагоны. Первые спроектированы для непрерывной выдачи концентратов по фронту кормления и поэтому непригодны для индивидуального кормления. Подвесные кормовагоны могут снабжаться системой идентификации животных для индивидуального дозирования, но их существенным недостатком является дороговизна, и необходимость монтировать подвесные пути. В кормовой вагон встроена антенна, считывающая радиочастотную метку, расположенную в ошейнике или ухе животного, и направляющая сигнал дозирующему устройству. Для пододвигания кормов применимы разные конструкции машин [2, 9]. Классификация пододвигателей показана на рисунке 1.

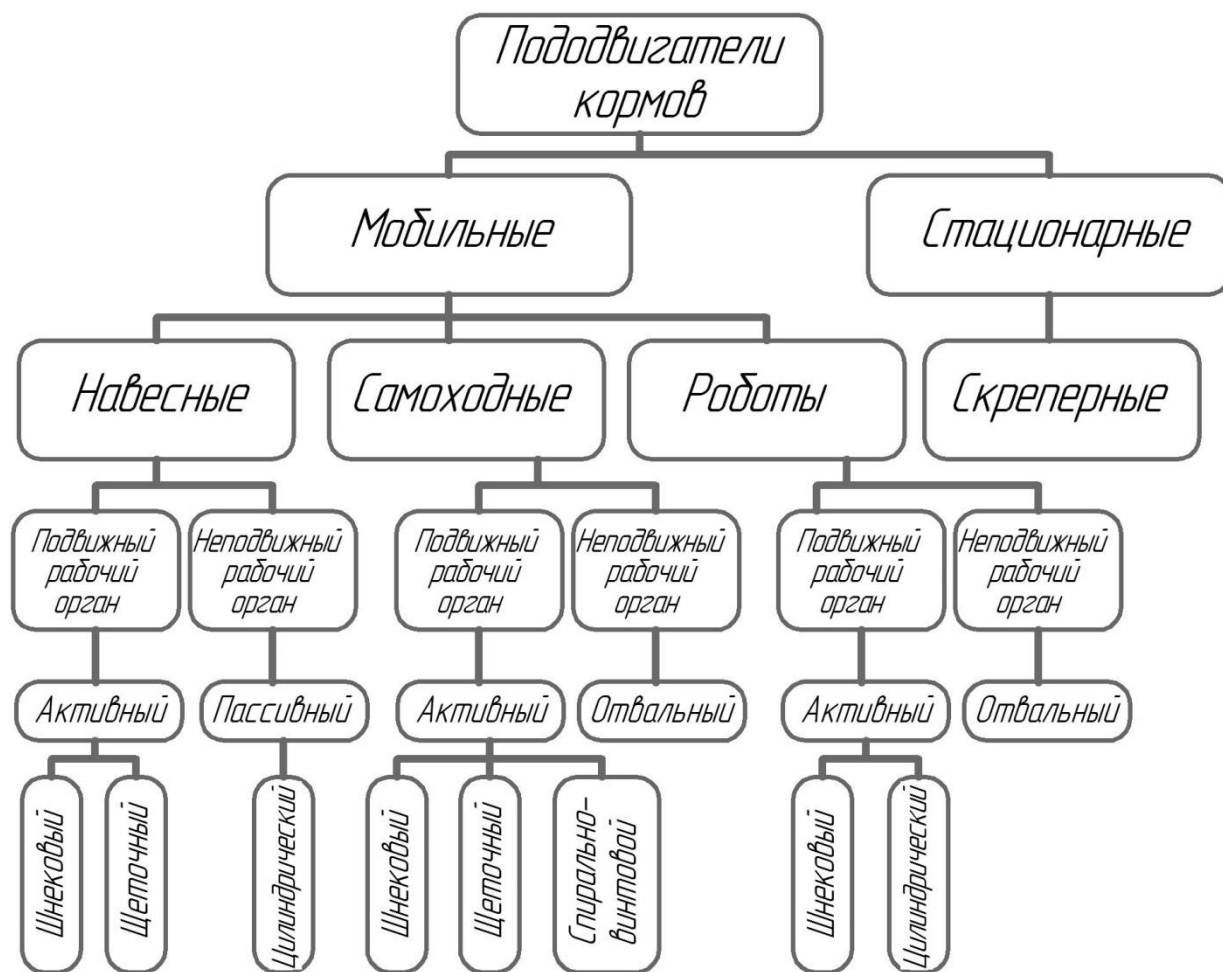


Рисунок 1 – Классификация пододвигателей кормов

Figure 1 – Classification of feed pusher

Результаты и обсуждение. В результате проведенного анализа существующих решений в области раздачи концентратов и пододвигания кормов нами предлагается оригинальная конструкция раздатчика концентратов-пододвигателя кормов позволяющего выдавать концентраты индивидуально малыми порциями, для лучшего усвоения и снижения рисков возникновения расстройств пищеварения у коров. Одновременно с выдачей будет осуществляться пододвигание кормов. Общий вид предлагаемого раздатчика концентратов-пододвигателя кормов (далее раздатчик) представлен на рисунке 2.

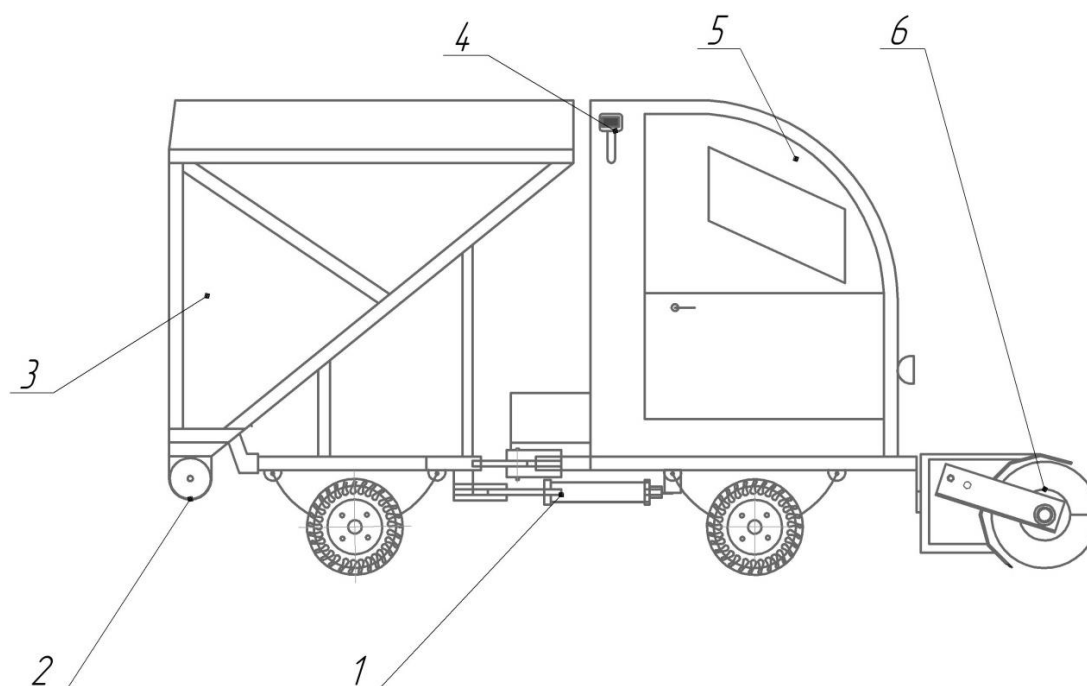


Рисунок 2 – Раздатчик концентратов-пододвигатель кормов:
1 – электрифицированное шасси; 2 – спирально-винтовой дозатор; 3 – бункер;
4 – система идентификации животных; 5 – кабина оператора; 6 – шнековый
пододвигатель кормов

Figure 2 – Concentrate dispenser-feed pusher:
1 – electrified chassis; 2 – spiral-screw dispenser; 3 – bunker; 4 – animal identification
system; 5 – operator’s cabin; 6 – feed auger

Концентрированные корма достаточно сыпучи и хорошо перемещаются с помощью шнековых питателей. Однако наличие вала, не способствует к использованию шнека в качестве дозатора, так как сыпучий материал, из-за наличия углов естественного откоса и обрушения и действия центробежных сил может не полностью заполнять пространство под валом, что в конечном счете будет приводить к снижению точности дозирования. В качестве дозирующего устройства выбран спирально-винтовой дозатор 2, показавший хорошую точность при испытаниях [6, 7].

В качестве пододвигателя кормов выбран навесной рабочий орган в

виде шнека. Такой рабочий орган вместе с пододвиганием выполняет перемешивание [2]. После перемешивания корм начинает с новой силой источать запах, побуждающий животных к его поеданию.

Для исключения воздействия выхлопных газов и снижения шума при работе в качестве шасси выбрана электрифицированная платформа 1, приводимая в движения электродвигателем от блока аккумуляторов.

Для предотвращения зависания корма угол наклона бункера принят 45°, что на 3-5° превышает угол естественного откоса комбикорма.

Работает раздатчик следующим образом. Оператор загружает в бункер корма. Затем начинает движение вдоль кормового стола, предварительно включив и установив в рабочее положение пододвигатель кормов. При проезде мимо стойла система идентификации 4 считывает штрих-код, который необходимо расположить рядом с каждым животным. В штрих-коде будет закодирован номер животного. Далее, номер передается в компьютер, который подает сигнал в блок управления дозатором. Дозатор выдает порцию при проезде животного в диапазоне 0.5 метра, чтобы соседним коровам было трудно достать до выданной порции. Удаленный контроль работы машины и внесение корректировок в нормы выдачи будет осуществляться с помощью приложения, которое необходимо будет разработать специально для данной машины [8].

Для определения экономической эффективности проведены исследования затрат времени рабочими фермы на раздачу концентрированных кормов группе из 42 коров. Корма выдавались дояркам в мешочках с указанием номера для животного. Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица – Затраты времени на раздачу концентрированных кормов, мин

Table – Time spent distributing concentrated feed, min

Время выдачи	Затраченное время, мин.					Среднее значение	Станд. откл.
	День наблюдения						
	1	2	3	4	5		
Утро	31,14	28,53	30,29	29,42	32,07	30,29	1,24
Обед	28,42	30,10	29,55	32,21	31,59	30,37	1,37
Вечер	29,13	30,45	28,29	31,55	32,12	30,31	1,44
Итого	88,69	89,08	88,13	93,18	95,78	90,97	3,00

Данные показывают, что в среднем, в день одна доярка тратит 1,5 часа на выдачу концентрированных кормов 42 животным. На ферме 200 голов общее время составит 7.22 часа в день.

Если для раздачи концентратов использовать предложенный нами раздатчик, то, при средней скорости движения 0.5 м/с, учитывая время

разворотов, общее время, которое потребуется на раздачу концентрированных кормов 200 животным составит 7.5 мин., при трехкратной даче общее время будет 22.5 мин.

Вывод. Использование в качестве системы идентификации сканера штри-кодов позволит значительно сэкономить финансовые средства при внедрении предлагаемой системы индивидуального дозирования концентратов, так как отпадает необходимость приобретения ошейников с радиочастотными метками.

Экономия рабочего времени при механизации процесса раздачи концентрированных кормов составит 7.095 часа ежедневно, что в год составит 2590 часов. Данное время может быть направлено на ферме на дальнейшее совершенствование технологического процесса.

Помимо экономии трудовых ресурсов индивидуальная выдача концентратов позволит сократить их долю в структуре рациона до 30% при одновременном увеличении молочной продуктивности коров.

На основании приведенной классификации в качестве пододвигателя выбран рабочий орган в виде шнека. Пододвигание корма позволит увеличить потребление кормовой смеси и повысить молочную продуктивность животных до 5.8% при одновременном повышении конверсии корма до 6.5%.

Для повышения универсальности машины необходимо рассмотреть возможность ее применения для внесения подстилки в виде опилок и разработать разбрасывающее устройство для установки в зоне дозирования.

Список литературы

1. Абросимов, А.В. Гранулометрический состав зерновой дерти, полученной после измельчения на дробилке ИЗ-0,5М / А.В. Абросимов, В.В. Пальвинский // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: матер. всерос. научно-практ. конф., Иркутск, 14-15 марта 2019 года. Том II. – Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2019. – С. 220-230.
2. Белявский, А.В. Обзор существующих пододвигателей кормов для ферм КРС / А.В. Белявский, В.В. Пальвинский, С.Н. Ильин // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: матер. всерос. студ. научно-практ. конф. В III томах, Иркутск, 16-17 февраля 2023 года. Том II. – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2023. – С. 11-17.
3. Головань, В.Т. Рецепты долголетия коров / В.Т. Головань, И.Н. Босых // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2017. – № 1(42). – С. 139-147.
4. Дуборезов, В.М. Кормление молочных коров по детализированным нормам / В.М. Дуборезов // Молочное и мясное скотоводство. – 2020. – № 4. – С. 52-54. – DOI 10.33943/MMS.2020.19.15.009.
5. Зайцева, О.В. Эффективность производства молока при разных способах содержания коров / О.В. Зайцева, Т.Ф. Лефлер, Т.А. Курзюкова // Вестник КрасГАУ. – 2019. – № 4(145). – С. 67-74.
6. Лялин, Е.А. Оценка дозирования комбикорма устройством спирально-винтового типа / Е.А. Лялин, М.А. Трутнев, Н.В. Трутнев // Пермский аграрный вестник. – 2020. – № 4(32). – С. 13-20. – DOI 10.47737/2307-2873_2020_32_13.

7. Лялин, Е.А. Оценка эффективности работы раздатчика комбикормов со спирально-винтовым дозатором в производственных условиях / Е.А. Лялин, М.А. Трутнев, Н.В. Трутнев // Пермский аграрный вестник. – 2019. – № 4(28). – С. 4-10.

8. Петрова, С.А. Проектирование мобильного приложения по оптимизации производства аграрной продукции / С.А. Петрова, В.Э. Матибарчук // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2021. – № 39. – С. 51-62.

9. Роботизированные технологии в кормлении крупного рогатого скота / Д.А. Благов, И.В. Миронова, С.В. Митрофанов [и др.] // Все о мясе. – 2021. – № 4. – С. 21-25. – DOI 10.21323/2071-2499-2021-4-21-25

10. Симонов, Г.А. Эффективное кормление высокопродуктивных молочных коров на разных физиологических стадиях / Г.А. Симонов, В.М. Кузнецов, В.С. Зотеев, А.Г. Симонов // Эффективное животноводство. 2018. №1 (140).

11. Скоркин, В.К. Анализ эффективности производства молока при привязном содержании коров / В.К. Скоркин, А.М. Гаджиев // Техника и технологии в животноводстве. 2022. – №1 (45).

12. Garcia S et all. Feeding concentrates based on individual cow requirements improves the yield of milk solids in dairy cows grazing restricted pasture. Australian Journal of Experimental Agriculture. 2007, vol. 47, pp. 502-508, DOI: 10.1071/EA05349.

13. Havrdova N. et all. The effect of the number of feed pushing-ups on animal behavior, dry matter intake and milk yield of dairy cows. Journal of Central European Agriculture. 2023, vol. 24 (4) , pp. 789-801, DOI: 10.5513/JCEA01/24.4.3827.

References

1. Abrosimov, A.V. Palvinsky, V.V. Granulometricheskij sostav zernovoj derti, poluchenoj posle izmel'cheniya na drobilke IZ-0,5M [The granulometric composition of the grain dereh, obtained after grinding on a crusher of from-0.5m]. Irkutsk, 2019, pp. 220-230.

2. Belyavsky, A.V. et all. Obzor sushchestvuyushchih pododvigatelej kormov dlya ferm KRS [Overview of existing feeders of feed for the farms of the CRC]. Irkutsk, 2023, vol. II, pp. 11-17.

3. Golovan', V.T., Bosih I.N. Recepty dolgoletiya korov [Cow Longevity Recipes]. Vestnik NGAU (Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet), 2017, no. 1(42), pp. 139-147.

4. Duborezov, V.M. Kormlenie molochnyh korov po detalizirovannym normam / V. M. Duborezov [Feeding dairy cows according to detailed standards]. Molochnoe i myasnoe skotovodstvo, 2020, no. 4, pp. 52-54. – DOI 10.33943/MMS.2020.19.15.009.

5. Zajceva, O.V. et all. Effektivnost' proizvodstva moloka pri raznyh sposobah soderzhaniya korov [Efficiency of milk production under different cow management methods]. Vestnik KrasGAU, 2019, no. 4(145), pp. 67-74.

6. Lyalin, E.A. et all. Ocenka dozirovaniya kombikorma ustrojstvom spiral'no-vintovogo tipa [Evaluation of the dosage of combination with a device of spiral-screw type]. Permskij agrarnyj vestnik, 2020, no. 4 (32), pp. 13-20. - DOI 10.47737/2307-2873_2020_32_13.

7. Lyalin, E.A. et all. Ocenka effektivnosti raboty razdatchika kombikormov so spiral'no-vintovym dozatorom v proizvodstvennyh usloviyah [Evaluation of the performance of a feed dispenser with a spiral-screw dispenser in production conditions]. Permskij agrarnyj vestnik, 2019, no. 4(28), pp. 4-10.

8. Petrova, S.A. Matibarchuk, V.E. Proektirovanie mobil'nogo prilozheniya po optimizacii proizvodstva agrarnoj produkcii [Проектирование мобильного приложения по оптимизации производства аграрной продукции]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, 2021, no. 39, pp. 51-62.

9. Blagov, D.A. et all. Robotizirovannye tekhnologii v kormlenii krupnogo rogatogo skota [Robotic technologies in cattle feeding]. Vse o myase, 2021, no. 4, pp. 21-25. – DOI 10.21323/2071-2499-2021-4-21-25

10. Simonov, G.A. et al. Effektivnoe kormlenie vysokoproduktivnyh molochnyh korov na raznyh fiziologicheskikh stadiyah [Effective feeding of highly productive dairy cows at different physiological stages]. *Effective Livestock*, 2018, no. 1 (140).

11. Skorkin V.K., Gadzhiev A.M. Analiz effektivnosti proizvodstva moloka pri privyaznom sodержanii korov [Analysis of the efficiency of milk production with binding cows]. *Technique and technology in animal husbandry*, 2022, no. 1 (45).

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: 13.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 20.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторах

Пальвинский Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения АПК инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 89025449794, e-mail: kvenbox@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0795-5304>.

Федоров Михаил Владимирович – студент 4 курса направления 35.03.06 “Агроинженерия” инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 89025449794, e-mail: kvenbox@mail.ru.

Information about authors

Viktor V. Palvinsky – Candidate of Technical Sciences, Ass. Prof. of the Department of Technical of the Engineering faculty, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 89025449794, e-mail: kvenbox@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0795-5304>.

Mikhail V. Fedorov – 4th year student of the direction 03/35/06 “Agroengineering” of the Department of Technical 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. 89025449794, e-mail: kvenbox@mail.ru.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-26-35

УДК 631.334

Научная статья

КОМПЛЕКС МАШИН И ОРУДИЙ ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РАННИХ СРОКАХ ПОСЕВА

¹Г.Н. Поляков, ¹С.Н. Шуханов, ¹А.В. Косарева, ²Д.А. Яковлев

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

²Новосибирский государственный аграрный университет,
г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Зерновые культуры возделываются во всех районах Предбайкалья. Анализ технических систем возделывания яровых культур, применяемых в настоящее время, не решает полностью адаптировать их для природно-климатических условий региона. На кафедре “Техническое обеспечение АПК” разработаны макетные образцы комбинированного почвообрабатывающего орудия посевной машины с модернизированными сошниками и бороны с активными рабочими органами, с возможностью регулирования глубины.

Переоборудование стерневой зерновой универсальной сеялки СЗУ-2.1 с усиленными клиновыми катками заключалось в изменении конструкции стрельчатых сошников и их расстановки, относительно клиновых катков. По опытным данным подпочвенный разбросной способ посева распределяет семена по площади питания более равномерно. По сравнению с рядовым посевом урожайность повышается на 10-15%. Для создания необходимого температурного режима предложено размещать семена в гряды.

В лабораторных условиях установлено, что почвенная влага движется по капиллярам в уплотненном слое, который образует уплотнительная пластина. Влага вначале достигает семенного ложа, а затем смещается в сторону боковых стенок гряды и выходит через стенки в атмосферу.

Исследования температурного режима почвы при посеве в гряды проводились отдельно в 2018 году на высевах яровой пшеницы. На протяжении всего эксперимента температура почвы при рядовом посеве держалась ниже, чем в гряде на 2-3°C. Полевые испытания показали, что экспериментальное комбинированное почвообрабатывающее орудие, сеялка для посева в гряды и борона с активными рабочими органами реализуют влагосберегающие приемы возделывания зерновых культур. Полевая всхожесть семян в грядках на 14.4% выше, чем в рядах.

Ключевые слова: зерновые культуры, влагосберегающие технологии, посев в гряды, комбинированное почвообрабатывающее орудие, посевная машина с модернизированными сошниками, борона с активными рабочими органами.

Для цитирования: Поляков Г.Н., Шуханов С.Н., Косарева А.В., Яковлев Д.А. Комплекс машин и орудий для возделывания зерновых культур в ранних сроках посева. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2(51):26-35. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-26-35.

A COMPLEX OF MACHINES AND IMPLEMENTS FOR THE CULTIVATION OF GRAIN CROPS IN THE EARLY TERMS OF SOWING

¹Gennadij N. Polyakov, ¹Stanislav N. Shukhanov, ¹Anna V. Kosareva, ²Daniil A. Yakovlev

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

²Novosibirsk Agrarian University,
Novosibirsk, Russia

Abstract. Grain crops are cultivated in all regions of the Baikal region. Analysis of the technical systems for cultivating spring crops currently used does not completely adapt them to the natural and climatic conditions of the region. At the Department of Technical Support of the Agro-Industrial Complex, prototypes of a combined soil-cultivating implement, a seeding machine with modernized openers and a harrow with active working bodies, with the ability to adjust the depth, have been developed.

The re-equipment of the stubble grain universal seeder SZU-2.1 with reinforced wedge rollers consisted of changing the design of the lancet openers and their arrangement relative to the wedge rollers. According to experimental data, the subsoil broadcast sowing method distributes seeds over the feeding area more evenly. When spawned with row sowing, the yield increases by 10-15%. To create the required temperature conditions, it is proposed to place the seeds in ridges.

In laboratory conditions, it has been established that soil moisture moves through capillaries in the compacted layer, which is formed by a sealing plate. The moisture first reaches the seed bed, and then moves towards the side walls of the ridge and exits through the walls into the atmosphere.

Studies of the soil temperature regime during sowing in ridges were carried out separately in 2018 for sowing spring wheat. Throughout the experiment, the soil temperature during row sowing remained lower than in the ridge by 2-3°C. Field tests have shown that an experimental combined tillage implement, a seeder for sowing in ridges and a harrow with active working parts implement moisture-saving methods for cultivating grain crops. Field germination of seeds in ridges is 14.4% higher than in rows.

Keywords: grain crops, moisture-saving technologies, sowing in ridges, combined tillage implements, sowing machine with modernized coulters, harrow with active working parts.

For citation: Polyakov G.N., Shukhanov S.N., Kosareva A.V., Yakovlev D.A. A complex of machines and implements for the cultivation of grain crops in the early terms of sowing. *Electronic scientific-Practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2024; 2(51):26-35. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-26-35.

Введение. Зерновые культуры возделываются во всех районах Предбайкалья. Установлено, что оптимальные сроки посева зерновых культур на продовольственные и семенные цели не совпадают. Высокий уровень урожайности зерна формируется при более позднем сроке посева. Период, когда начинается критический по влаге период кущения-колошения, приходится на вторую половину июня и начало июля, когда выпадают летние дожди, которые способствуют созданию благоприятных условий для

закладки большего количества зерен в колосе и формирования крупного зерна. Сроки созревания зерновых культур приходится на конец августа-сентября, когда преобладает холодная и дождливая погода. При этом происходит снижение качества семян. В данный период затрудняется работа зерноуборочных комбайнов, и увеличиваются потери зерна в поле [7].

Семена, которые обладают лучшей всхожестью и качеством, можно получить при более ранних сроках посева. В это время процесс формирования и созревания семенного зерна проходит наиболее оптимально по температурному режиму: середина июля – первая половина августа. Уборка зерновых культур комбайнами ведется с меньшими потерями зерна в поле и получением семян высокого качества.

Следует отметить, что сложившиеся погодные условия оказывают влияние на развитие и продуктивность культур. Во-первых, это недостаточная теплообеспеченность для выращивания зерновых. Зачастую зерновой культуре не хватает тепла, чтобы реализовать свой потенциал. Во-вторых, часто повторяющиеся весенне-летние засухи ведут к недостаточной влагообеспеченности посевов и росту зерновой культуры во всех фазах ее развития, особенно в фазе формирования вторичной корневой системы. В результате потери урожая могут достигать значительных величин [2].

Технические системы возделывания яровых культур, применяемые в настоящее время, не могут быть полностью адаптированы к природно-климатическим условиям Предбайкалья. Назрела необходимость для совершенствования технологических процессов и рабочих органов, реализующих влагосберегающие приемы обработки почвы, эффективного использования влаги в течение вегетационного периода. Кроме того должны быть созданы условия для прогрева почвы при ранних сроках посева путем образования гребней или гряд по высеянным семенам, до всходов боронования для закрытия влаги и уничтожения сорняков, как главных конкурентов культурных растений [1, 3].

Кафедра “Техническое обеспечение АПК” разработала макетные образцы комбинированного почвообрабатывающего орудия, которое включает в себя посевную машину с усовершенствованными сошниками и борону с активными рабочими органами, которые имеют возможность регулировки глубины.

Цель исследования – повышение урожайности зерновых культур за счет разработки комплекса машин, обеспечивающих влагосберегающие приемы обработки почвы перед посевом, высева семян подпочвенным разбросным способом в гряды и до всходов боронованием активными рабочими органами.

Методика исследования включала анализ традиционной, минимальной, No-till технологий возделывания зерновых культур, применяемых в регионе. Кроме того, проанализированы изменения уровня влажности почвы на глубине посева в период вегетации, температурного

режима, учитывая традиционную и предлагаемую технологию.

Результаты и обсуждения. С учетом тенденций обеспечения и развития технологий, опыта ведущих хозяйств и научных организаций, анализа литературных источников и собственных исследований разработаны и изготовлены макетные образцы:

1) комбинированное почвообрабатывающее орудие, осуществляющее интенсивное разрушение верхнего слоя почвы и создающее мелкокомковатую структуру, препятствует выносу влажных слоев грунта на поверхность почвы и обеспечивает выравнивание поверхности поля;

2) на базе сеялки СЗУ-2.1 создана посевная машина, которая предназначена для подпочвенного разбросного посева, позволяющая уплотнять семенное ложе и расположить семена полосой шириной 0.08 м в грядках на глубину 0.05-0.06 м.;

3) борона с активными рабочими органами, совершающими движение по синусоидальной траектории, с перекрытием и возможностью регулировать глубину обработки.

Навесное комбинированное почвообрабатывающее орудие включает ряд рабочих органов, которые располагаются в определенной последовательности для полной и качественной предпосевной обработки почвы (рис. 1).

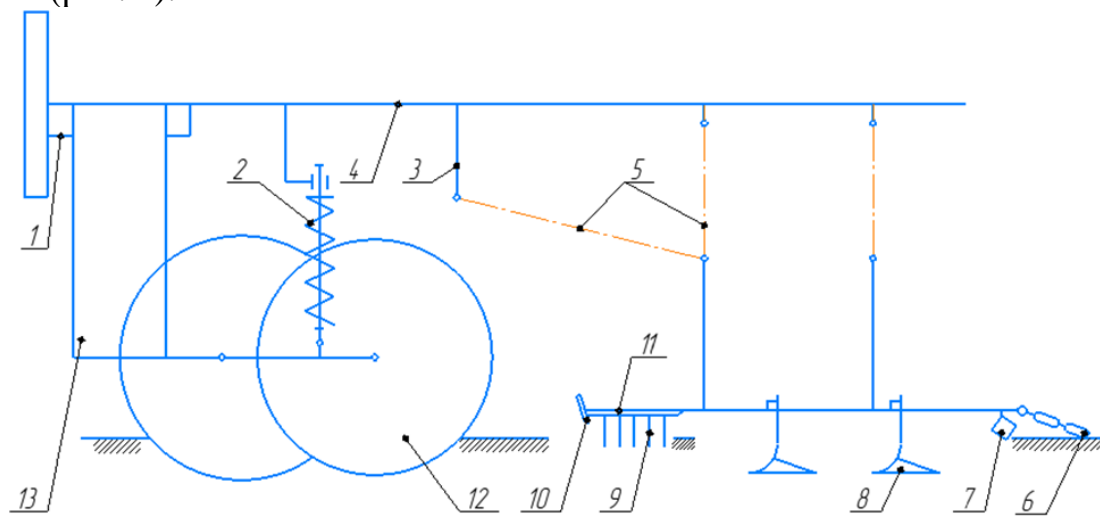


Рисунок 1 – Схема комбинированного почвообрабатывающего орудия
1 – рама; 2 – нажимные штанги; 3-кронштейн подвески; 4 – кронштейн подвески секции; 5- цепной подвес; 6 – цепной шлейф; 7 – специальный брус; 8- стрельчатые лапы; 9-зубья бороны; 10-выравнивающий брус; 11-секция; 12- сферические диски; 13- кронштейн дисков

Figure 1 – Diagram of a combined tillage implement
1 – frame; 2 – pressure rods; 3-suspension bracket; 4 – section suspension bracket;
5 – chain suspension; 6 – chain train; 7 – special beam; 8- pointed paws; 9 harrow teeth; 10- leveling beam; 11-section; 12- spherical disks; 13-disc bracket

Батарея сферических дисков разрушает верхний слой почвы на глубину 0.06-0.07 м, разбивает комки острыми кромками, выравнивает поверхность после зяблевой обработки плугом. Вслед движется зубовая борона с выравнивающим брусом, который смещает образовавшиеся гребни почвы в след дисков. Зубья бороны крошат комки, оставшиеся после прохода дисков, на более мелкие. При этом почва смещается в горизонтальном направлении от боковых поверхностей зубьев и дополнительно разбивается до состояния мелкокомковатой структуры. Стрельчатые универсальные лапы дополнительно рыхлят почву на глубину от 0.06 до 0.12 м и подрезают корни прорастающих сорняков. За стрельчатыми лапами движется специальный выравнивающий брус, который играет роль выравнивателя и уплотнителя взрыхленной почвы. Частично этот брус при движении со скоростью 7.5-8 км/час крошит оставшиеся мелкие комки почвы. Цепной шлейф, соединенный со специальным брусом, мульчирует поверхностный слой почвы с целью закрытия поверхностной влаги. Конструктивная ширина захвата составляет 3 м и агрегируется с гусеничным трактором [5, 6, 10].

Опытами установлено, что качественная предпосевная обработка почвы способствует устойчивому ходу сошников сеялки по глубине и выполняет одно из важных агротехнических требований, предъявляемых к посевным машинам.

Переоборудование стерневой зерновой универсальной сеялки СЗУ-2.1 заключалось в изменении конструкции стрельчатых сошников и их расстановки, относительно усиленных клиновых катков. По данным проведенных опытов, посев подпочвенным разбросным способом позволяет равномерно распределять до 60% семян по площади питания. А если сравнивать с рядовым посевом, урожайность повышается на 10-15%.

В серийный сошник СЗУ-2,1 добавлена уплотнительная пластина шириной 0.08 м и боковые ограничители от раската семян в стороны. Ширина посева семян на уплотненное ложе 0.08 м. Благодаря этому образовавшиеся капилляры подводят почвенную влагу к семенам и способствуют дружным всходам [8, 9].

Для создания необходимого температурного режима предложено размещать семена в гряды. На Дальнем Востоке, Казахстане, Узбекистане и Азербайджане применяется технология гребневого посева яровой пшеницы. По данным ФАО ООН (продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН) внедрение этой технологии повысило урожайность пшеницы на 10%, а экономия влаги достигает до 35% по сравнению с традиционными системами возделывания [4]. В Сибири при возделывании овощных культур часто находят применение грядковые посадки.

Нами проводились исследования посева яровых зерновых культур в гряды, которые дали положительные результаты [6, 8, 9]. Переоборудование

сеялки СЗС-2.1 для посева в гряды показано на рисунке 2. Подобные усиленные катки имеет сеялка СЗУ-2.1.



Рисунок 2 – Переоборудованная сеялка СЗС- 2.1

Figure 2 -- Converted seeder SZS-2.1

На рисунке 3 представлена форма гряды и движение почвенной влаги по капиллярам. Из рисунка 3 видно, что гряда формируется клиновыми катками, при этом сошники с уплотнительными пластинами смещены на поперечинах рамы сеялки так, что они высевают семена зерновых культур между следами катков. Гряды образуются с помощью катков, которые вдавливают при этом разрыхленную почву и уплотняют стенки гряды.

Гряды (рисунок 3) имеют трапецеидальную форму с размерами в основании 0.228 м, верхняя часть 0.15 м. Полоса семян укладывается на семенное ложе шириной 0.08 м. Уплотнительная пластина выступает ниже кромок стрельчатой лапы и при посеве семян уплотняет и выравнивает ложе.

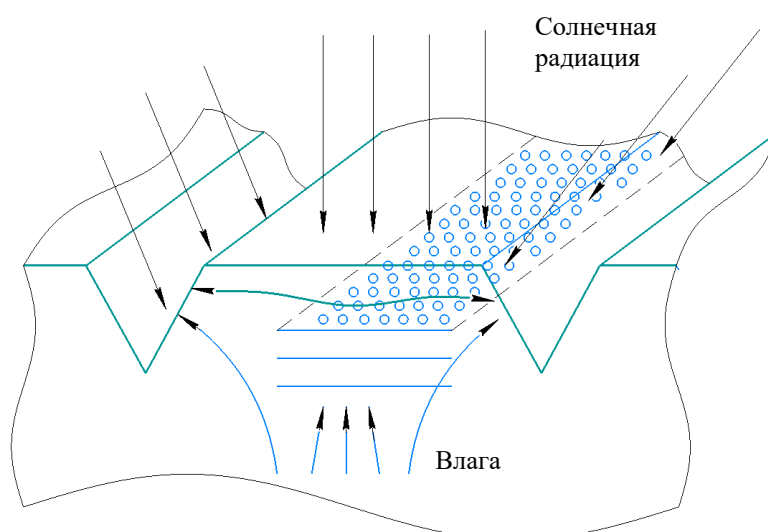


Рисунок 3 – Форма гряды и движение капиллярной влаги

Figure 3 – Ridge shape and movement of capillary moisture

В лабораторных условиях установлено, что почвенная влага движется по капиллярам в уплотненном слое, которое образует уплотнительная пластина. Влага вначале достигает семенного ложа, а затем смещается в сторону боковых стенок гряды и выходит через них в атмосферу.

Исследования температурного режима на высевах яровой пшеницы в гряды проводились отдельно в 2018 году. Температура почвы в гряде и рядках фиксировалась в течение 24-х дневного периода наблюдений. На протяжении всего эксперимента температура почвы в рядке держалась ниже, чем в гряде на 2-3°C. Установлено, что полевая всхожесть семян при высевах рядовым способом составила 64.3%, а подпочвенным разбросным в гряды – 78.7%, что на 14-15% выше [8].

В средней части гряды над семенами увлажнение меньше и температура почвы выше. По мере прогревания почвы в гряде влага накапливает тепло, за счет того, что обладает высокой теплоемкостью и поддерживает температурный режим в ночные часы. Таким образом, при достаточном увлажнении семенного ложа и уровне тепла ускоряется прорастание семян и появление всходов, примерно на 3-4 дня раньше, по сравнению с посевом семян в рядках. Семена сорных растений, попадая в благоприятные условия, также ускоряют прорастание.

В связи с этим необходимо бороновальное орудие для закрытия влаги, проникающее через стенки гряды в атмосферу и уничтожение проросших семян сорняков. Использовать зубовые бороны типа “Зиг-заг” невозможно по причине того, что они разрушают форму гряды и нарушают технологический процесс исследуемого способа посева.

Разработан макетный образец бороны с пружинными зубьями, которые движутся по синусоидальной траектории.

Выводы. Полевые испытания показали, что экспериментальное комбинированное почвообрабатывающее орудие, бороны с активными рабочими органами и сеялка для посева в гряды реализуют влагосберегающие приемы возделывания зерновых культур.

Посевная всхожесть семян в грядках на 14-15% выше, чем в рядках. В грядках температурный режим выше на 2-3°C, чем при посеве в рядках, в течение всего наблюдаемого периода (24 дня).

Список литературы

1. Житов, В.В. Зональные системы удобрений в земледелии Иркутской области / В.В. Житов, Н.Н. Дмитриев : монография. — Иркутск: изд-во ИрГСХА, 2013. — 140 с.
2. Иванько, Я.М. Пространственно-временная оценка редких потерь урожайности сельскохозяйственных культур / Я.М. Иванько, С.А. Петрова, И.М. Колокольцева // Актуальные вопросы аграрной науки. — 2024. — № 50. — С. 65-73. — DOI 10.51215/2411-6483-2024-50-65-73.
3. Колмаков, П.П. Минимальная обработка почвы (под ред. А.И. Бараева) / П.П. Колмаков, А.М. Нестеренко. — М.: Колос, 1981. — 240 с., ил.
4. Кондратьев, Р.Б. Семенное зерно Сибири / Р.Б. Кондратьев. — М.: Росагропромиздат, 1988. — 135 с.

5. Назаров, Н.Н. Инженерное проектирование агротехнологий растениеводства: монография / Н.Н. Назаров, П.П. Милаев. – Новосибирск: СФНЦА РАН, 2019. – 255 с.
6. Поляков, Г.Н. Техническое обеспечение уборочных процессов на основе ресурсосберегающих технологий уборки зерновых культур / Г.Н. Поляков, Н.Н. Аникиенко, А.В. Косарева // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 7(225). – С. 72-78. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-225-7-72-78. – EDN SAWBZU.
7. Чернышова, Е. Стартап в мешке крупные компании в поисках новых идей / Е. Чернышова // Агротехника и технологии май-июнь. – 2021. – №3(85). – С. 18-22.
8. Яковлев, Д.А. Изменение температурного режима почвы при посеве яровой пшеницы в гряды / Д.А. Яковлев, Г.Н. Поляков // Кормопроизводство. – 2023. – № 1. – С. 31-35. – EDN UNDWVI.
9. Яковлев, Д.А. Оценка влияния влажности почвы при посеве на глубину заделки семян зерновых культур / Д.А. Яковлев, В.И. Беляев, Г.Н. Поляков // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53, № 1. – С. 104-110. – DOI 10.26898/0370-8799-2023-1-13. – EDN OIEXNK.
10. Яковлев, Н.С. Техническое оснащение технологии возделывания зерновых культур / Н.С. Яковлев, Н.Н. Назаров // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2017. – №3. – С.68-75.

References

1. Zhitov, V.V., Dmitriev, N.N. Zonal'nye sistemy udobrenij v zemledelii Irkutskoj oblasti [Zonal fertilizer systems in agriculture of the Irkutsk region]. Irkutsk: izd-vo IrGSKHA, 2013, 140 p.
2. Ivan'o, Ya.M. et all. Prostranstvenno-vremennaya ocenka redkih poter' urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Spatiotemporal assessment of rare crop yield losses]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, 2024, no. 50, pp. 65-73, DOI 10.51215/2411-6483-2024-50-65-73.
3. Kolmakov, P.P., Nesterenko A.M. Minimal'naya obrabotka pochvy [Minimal tillage]. Moscow: Kolos, 1981, 240 p.
4. Kondrat'ev, R.B. Semennoe zerno Sibiri [Seed grain of Siberia]. Moscow: Rosagropromizdat, 1988, 135 p
5. Nazarov, N.N., Milaev P.P. Inzhenernoe proektirovanie agrotekhnologij rastenievodstva [Engineering design of agricultural technologies of crop production]. Novosibirsk: SFNCA RAN, 2019, 255 p.
6. Polyakov, G.N. et all. Tekhnicheskoe obespechenie uborochnyh processov na osnove resursosberegayushchih tekhnologij uborki zernovyh kul'tur [Technical support of harvesting processes based on resource-saving technologies for harvesting grain crops]. Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2023, no. 7(225), pp. 72-78. DOI 10.53083/1996-4277-2023-225-7-72-78. – EDN SAWBZU.
7. Chernyshova, E. Startap v meshke krupnye kompanii v poiskah novyh idej [Startup in the bag large companies in search of new ideas]. Aгротехника i tekhnologii maj-iyun', 2021, no. 3(85), pp. 18-22.
8. Yakovlev, D.A., Polyakov, G.N. Izmenenie temperaturnogo rezhima pochvy pri poseve yarovoј pshenicy v gryady [Changes in the temperature regime of the soil when sowing spring wheat in ridges]. Kormoproizvodstvo, 2023, no. 1, pp. 31-35.
9. Yakovlev, D.A. et all. Ocenka vliyaniya vlazhnosti pochvy pri poseve na glubinu zadelki semyan zernovyh kul'tur [Assessment of the effect of soil moisture during sowing on the depth of planting of grain seeds]. Sibirskij vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki, 2023, vol. 53, no. 1, pp. 104-110. – DOI 10.26898/0370-8799-2023-1-13.
10. Yakovlev, N.S., Nazarov, N.N. Tekhnicheskoe osnashchenie tekhnologii vzdelyvaniya zernovyh kul'tur [Technical equipment of the technology of cultivation of grain

crops]. Sibirskij vestnik sel'skhozyajstvennoj nauki, 2017, no. 3, pp. 68-75.

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: 06.06 2024

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 18.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторах

Поляков Геннадий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения АПК инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 8(902)5669965, e-mail: sxm1953@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8628-2541>.

Шуханов Станислав Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры технического обеспечения АПК инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, тел. 8(908)654-60-32, e-mail: shuhanov56@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2134-6871>.

Косарева Анна Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса и общеинженерных дисциплин инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, пос. Молодежный, тел. 8(914)944-42-28, e-mail: ankosar@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1613-5394>.

Яковлев Даниил Александрович – кандидат технических наук, доцент инженерного института, кафедра эксплуатации машинно-тракторного парка, Новосибирского аграрного университета.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ; e-mail: dyagro@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0283-9753>.

Information about authors

Gennady N. Polyakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Support of Agro-Industrial Complex, Faculty of Engineering, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 8(902)5669965, e-mail: sxm1953@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8628-2541>.

Stanislav N. Shukhanov – doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Support of Agro-Industrial Complex, Faculty of Engineering, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 8(908)654-60-32, e-mail: shuhanov56@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2134-6871>.

Anna V. Kosareva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service and General Engineering Disciplines, Faculty of Engineering, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 8(914)944-42-28, e-mail: ankosar@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1613-5394>.

Daniil A. Yakovlev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Engineering Institute, Department of Machine and Tractor Fleet Operation, Novosibirsk Agrarian University.

Contact information: FSBEI HE Novosibirsk State Agrarian University; e-mail: dyagro@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0283-9753>.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-36-46

УДК 621.313

Научная статья

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ ДОЖДЕВАТЕЛЕЙ С НИЗКИМ НАПОРОМ

А.Г. Черных

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

Аннотация. В системах орошения централизованного полива с использованием крупных мобильных ирригационных машин, например дождевальных, вода в трубопроводы любого функционального назначения подается под давлением. Основной трубопровод является составной частью конструкции дождевальной машины в не зависимости от способа ее перемещения в плоскости орошения. Трубопровод предназначен для подачи воды в конечное число устройств (дождевателей), как правило, несколько десятков, реализующих функцию создания искусственного дождя в зоне полива. Линейная конструкция трубопровода предопределяет их линейное расположение вдоль трубопровода. Однако с учетом локальных требований к нормам полива вдоль трубопровода, расстояния между отводами в точках крепления дождевателей к трубопроводу являются членами конечного числового ряда. Кроме того, для повышения равномерности орошения конструкция каждого дождевателя должна включать узел, который в процессе работы максимально обеспечивает в месте полива требуемые параметры искусственного дождя. Основу конструкции такого узла составляет регулятор давления. Регулятор давления состоит из различных отдельных компонентов, которые работают совместно друг с другом для выполнения специально разработанной функции – обеспечения постоянного давления на выходе независимо от давления на входе. В пределах диапазона регулировки он может гарантировать, что изменения давления на входе не повлияют на давление на выходе. Таким образом, контролируется влияние изменений давления в трубопроводной сети на расход воды дождевателем. Когда давление на входе регулятора давления изменяется, регулировочный шток подвергается воздействию давления, как на входе, так и на выходе. Возникшая разница давлений между входным и выходным участками Т-образного дроссельного стержня устраняется в динамике под действием сил инерции, упругости и трения пружины, обеспечивая тем самым поддержание заданной жесткости кривой производительности регулятора. Для исследования во времени величины смещения дроссельного стержня в функции конструктивных параметров регулятора и распределения статического давления внутри регулятора предложена соответствующая математическая модель. Экспериментально исследованы регулировочные свойства дождевателей с низким расходом компании Nelson Irrigation Co.

Ключевые слова: динамическая модель, дождеватель, регулятор давления, кривая производительности, поток, давление, пружина

Для цитирования: Черных А.Г. Динамическая модель регулятора давления прямого действия дождевателей с низким напором. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2 (51):36-46. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-36-46.

DYNAMIC MODEL OF PRESSURE REGULATOR FOR DIRECT ACTION OF SPRINKLERS WITH LOW PRESSURE

Aleksey G. Chernykh

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

Abstract. In centralized irrigation systems using large mobile irrigation machines, such as sprinklers, water is supplied to pipelines for any functional purpose under pressure. The main pipeline is an integral part of the structure of the sprinkler, regardless of the method of its movement in the irrigation plane. The pipeline is designed to supply water to a finite number of devices (sprinklers), usually several dozen, that implement the function of creating artificial rain in the irrigation zone. The linear design of the pipeline determines their linear location along the pipeline. However, taking into account local requirements for irrigation standards along the pipeline, the distances between branches at the points of attachment of sprinklers to the pipeline are members of a finite number series. In addition, to increase the uniformity of irrigation, the design of each sprinkler must include a unit that, during operation, maximally provides the required parameters of artificial rain at the irrigation site. The basis of the design of such a unit is the pressure regulator. A pressure regulator is made up of various individual components that work together to perform the specially designed function of providing a constant outlet pressure regardless of the inlet pressure. Within the adjustment range, it can ensure that changes in inlet pressure will not affect the outlet pressure. In this way, the effect of changes in pressure in the pipeline network on the water consumption of the sprinkler is controlled. When the inlet pressure of a pressure regulator changes, the control rod is subjected to both inlet and outlet pressure. The resulting pressure difference between the inlet and outlet sections of the T-shaped throttle rod is eliminated dynamically under the influence of inertia forces, elasticity and friction of the spring, thereby maintaining the specified rigidity of the regulator performance curve. To study the magnitude of the throttle rod displacement over time as a function of the design parameters of the regulator and the distribution of static pressure inside the regulator, a corresponding mathematical model is proposed. The control properties of low-flow sprinklers from Nelson Irrigation Co. were experimentally studied.

Keywords: dynamic model, sprinkler, pressure regulator, performance curve, flow, pressure, spring.

For citation: Chernykh A.G. Dynamic model of pressure regulator for direct action of sprinklers with low pressure. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 2 (51):36-46. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-36-46.

Введение. Ирригационные системы любой конструкции и функционального назначения испытывают колебания давления воды в пределах участков основного и дополнительных трубопроводов, а также в локальных местах ее подачи на орошаемую поверхность [1]. Колебания давления могут быть обусловлены перепадом высот в пределах орошаемой территории, потерями давления в трубах и фитингах, циклическим режимом работы насосного оборудования входящего в ирригационную систему [6]. Регуляторы давления регулируют избыточное и изменяющееся давление на входе до постоянного давления на выходе и значительно повышают общую

эффективность ирригационной системы [2]. В целом, их повсеместное применение в ирригационной системе приводит к снижению затрат на электроэнергию, потребляемую насосным оборудованием, и экономит общее количество расходуемой системой воды. Например, использование дождевателей с регулятором давления позволяет обеспечить подачу воды на “единичную” орошаемую площадь с учетом влияния ветрового потока на параметры искусственного дождя, испарения и стока [4]. Как отмечалось выше, давление на дождевателе может изменяться из-за перепадов давления в гидравлической системе или перепада геодезических высот. В процессе работы, регулятор поддерживает постоянное давление на выходе дождевателя, что позволяет стабилизировать его объемный расход воды для заданного промежутка времени. Регулирующие свойства регулятора зависят от его конструкции и жесткости кривых производительности [7]. Необходимо отметить, что регуляторы не накапливают и не вырабатывают энергию, поэтому давление на выходе не может превышать давление на входе. Идеальный регулятор должен поддерживать постоянное давление на выходе независимо от давления на входе или расхода, при условии, что давление на входе превышает установленное регулятором давление. Когда давление на входе падает ниже заданного, т.е. расчетного давления, установленного производителем, теоретически давление на выходе регулятора должно быть равно давлению на входе [10]. Однако потери на гидравлическое трение, трение между деталями и конструктивные различия приводят к отклонениям реальных кривых производительности от заводских кривых. Функции стабилизации давления регулятором, обеспечивается работой неподвижной пружины сжатия из нержавеющей стали, помещенной в камеру, отделенную от обычного канала подачи воды. Регулятор, работающий так, как описано выше, представляет собой редукционный клапан переменного давления [3]. Численное моделирование работы регулятора давления прямого действия позволяет исследовать влияние геометрии и величины перемещения регулирующего узла на качество стабилизации выходного давления.

Цель исследования. В рамках предложенной нелинейной математической модели, характеризующей процесс линейного перемещения подвижной части регулятора, предлагается рассчитать соответствующие кривые производительности при различных величинах входных потоков и давлений воды, жесткости пружины сжатия, длины ее предварительного натяжения и силы сопротивления; определить величины и построить кривые изменения давления на выходе регулятора при различных давлениях на входе, заданном диапазоне смещения дроссельного стержня регулятора при максимальной величине указанного смещения; установить степень адекватности предложенной модели путем сравнения отклонений давлений на выходе регулятора, соответствующих данным моделирования и эксперимента.

Материалы, методы и объекты исследований. Регулятор давления с

прямого действия с боковым проточным отверстием состоит из одиннадцати функционально связанных частей (рис. 1). Регулирующий узел, который состоит из входного отверстия регулирующего узла, пружины и Т-образного регулирующего поршня (дрессельного стержня), обеспечивает регулирование давления на выходе. Когда вода проходит через регулятор давления, в зазоре между входом в регулирующий узел и верхней поверхностью Т-образного регулирующего поршня происходит потеря напора [8]. После этого полый поршень подает воду к выпускному отверстию. Когда давление на входе ниже заданного, давление на выходе увеличивается с увеличением давления на входе. Регулирующий плунжер дроссельного стержня остается неподвижным, пока усилие, создаваемое перепадом давления на плунжер, меньше усилия предварительно натяженной пружины. Поскольку входное давление выше заданного, сила, действующая на поршень, преодолевая предварительное натяжение пружины, заставляет поршень двигаться против направления потока. Таким образом, проточное отверстие становится узким, и потери на трение увеличиваются. Как следствие, давление на выходе снижается, что позволяет регулятору поддерживать постоянное давление на выходе.

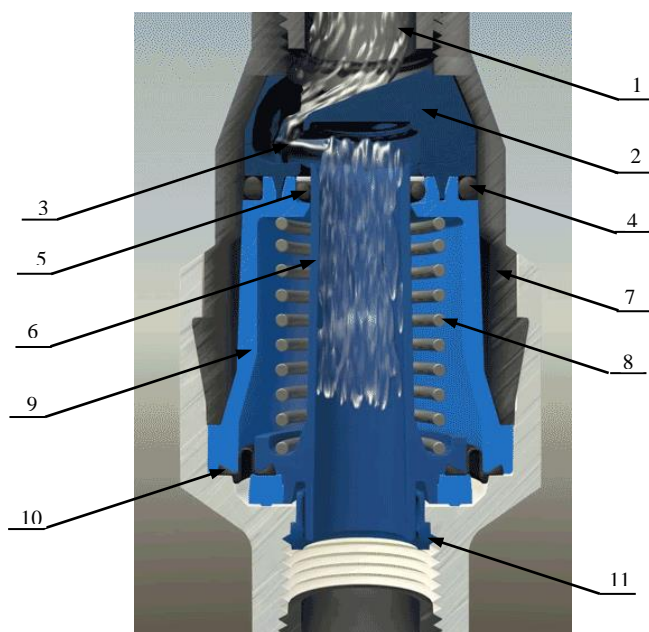


Рисунок 1 – Схематичное поперечное сечение регулятора давления: 1 – входной патрубок регулятора; 2 – седло; 3 – проточное отверстие; 4 – статическое уплотнительное кольцо; 5 – динамическое уплотнительное кольцо; 6 – дроссельный стержень; 7 – запатентованное соединение корпуса; 8 – сбалансированная пружина сжатия; 9 – стабилизирующая чашка; 10 – вращающаяся диафрагма; 11 – антивибрационная проточная лопасть

Figure 1 – Schematic cross section of the pressure regulator: 1 – inlet pipe of the regulator; 2 – seat; 3 – flow hole; 4 – static O-ring; 5 – dynamic O-ring; 6 – throttle rod; 7 – patented housing connection; 8 – balanced compression spring; 9 – stabilizing cup; 10 – rotating diaphragm; 11 – anti-vibration flow blade

В дальнейшем, по мере снижения давления на входе с высокого значения до заданного, процесс перемещения дроссельного стержня становится обратным.

Динамическое уравнение линейного перемещения подвижной части (рис. 1, поз. б) регулятора имеет вид

$$M \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + F_c \cdot \text{signum}\left(\frac{dy(t)}{dt}\right) + F_s - F = 0, \quad (1)$$

где M – масса дроссельного стержня, кг; $y(t)$ – величина линейного перемещения Т-образного регулирующего поршня, мм; F_c – сила сухого трения, Н; F_s – сила упругости пружины, Н; F – сила обусловленная разницей давлений между входным и выходным участками дроссельного стержня, Н.

В свою очередь, с учетом принятых обозначений силы F_s и F могут быть вычислены с помощью выражений

$$F = p_2 \cdot s_2 - p_1 \cdot s_1 \quad (2)$$

где s_2 – площадь нижней поверхности дроссельного стержня регулятора, м²; s_1 – площадь верхней поверхности дроссельного стержня регулятора, м²; p_2 – давление на выходном участке регулировочного стержня, Па; p_1 – давление на входном участке регулировочного стержня, Па.

$$F_s = K_s \cdot (L_0 + y(t)) \quad (3)$$

где K_s – жесткость пружины, Н/мм; L_0 – длина предварительно напряженной пружины, мм.

Для численного решения уравнения (1), поставим в соответствие введенным выше переменным следующие числовые значения:

$$s_2 = 0.000568 \text{ мм}^2; s_1 = 0.000082 \text{ м}^2; p_2 = 50000 \text{ Па}; p_1 = 300000 \text{ Па}; F = 50000 \cdot 0.000568 - 300000 \cdot 0.000082 = 28.4 - 24.6 = 3.8 \text{ Н}; K_s = 2.3 \text{ Н/мм} \quad (5.0 \text{ Н/мм}); L_0 = 0.5 \text{ мм}; M = 0.026 \text{ кг}.$$

С учетом выражений (2) и (3) решение уравнения (1) при $K_s = 2.3$ Н/мм удовлетворяет тождеству

$$y(t) = \int \text{RootOf}(13_Z + 3 \cdot \text{signum}(_Z) \cdot t - 1325 \cdot t + 575 \cdot t^2 - 3 \cdot t \cdot \text{signum}(1, _Z) - 13 \cdot \ln(2) - 13 \cdot \ln(5) - 13 \cdot \ln(13) - 13 \cdot \ln(23) + 13 \cdot \ln(2990_C1 + 3 \cdot \text{signum}(1, _Z)) \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{299} \cdot \text{erf} \cdot \left(\frac{1}{2990} \cdot \sqrt{299} \cdot (1150 \cdot t + 3 \cdot \text{signum}(_Z) - 1325 - 3 \cdot \text{signum}(1, _Z))\right) \cdot e^{-_Z + \frac{9}{2990} \cdot \text{signum}(_Z)^2} - \left(\frac{159}{598} \cdot \text{signum}(_Z) - \frac{9}{14950} \cdot \text{signum}(_Z) \cdot \text{signum}(1, _Z) + \frac{70225}{1196} + \frac{159}{598} \cdot \text{signum}(1, _Z) + \frac{9}{29900} \cdot \text{signum}(1, _Z)^2\right) dt + _C2 \quad (4)$$

Соответственно, при $K_s = 5.0$ Н/мм решение уравнения (1) определится в виде

$$y(t) = \int \text{RootOf}(13_Z + 3 \cdot \text{signum}(_Z) \cdot t - 650 \cdot t + 1250 \cdot t^2 - 3 \cdot t \cdot \text{signum}(1, _Z) - 26 \cdot \ln(2) - 26 \cdot \ln(5) - 13 \cdot \ln(13) + 13 \cdot \ln(1300_C1 + 3 \cdot \text{signum}(1, _Z) \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{26} \cdot \text{erf} \cdot (\frac{1}{1300} \sqrt{26} \cdot (2500 \cdot t + 3 \cdot \text{signum}(_Z) - 650 - 3 \cdot \text{signum}(1, _Z))) \cdot e^{-Z + \frac{9}{65000} \cdot \text{signum}(_Z)^2} - (\frac{3}{50} \cdot \text{signum}(_Z) - \frac{9}{32500} \cdot \text{signum}(_Z) \cdot \text{signum}(1, _Z) + \frac{13}{2} + \frac{3}{50} \cdot \text{signum}(1, _Z) + \frac{9}{65000} \cdot \text{signum}(1, _Z)^2)) dt + _C2 \quad (5)$$

Для удобства анализа, построим графические зависимости вида $y(t)$ соответствующие выражениям (4) и (5). Для $K_s = 2.3$ Н/мм графическое решение уравнения (4) приведено на (рис. 2, а). Соответственно для $K_s = 5.0$ Н/мм решение приведено (рис. 2, б).

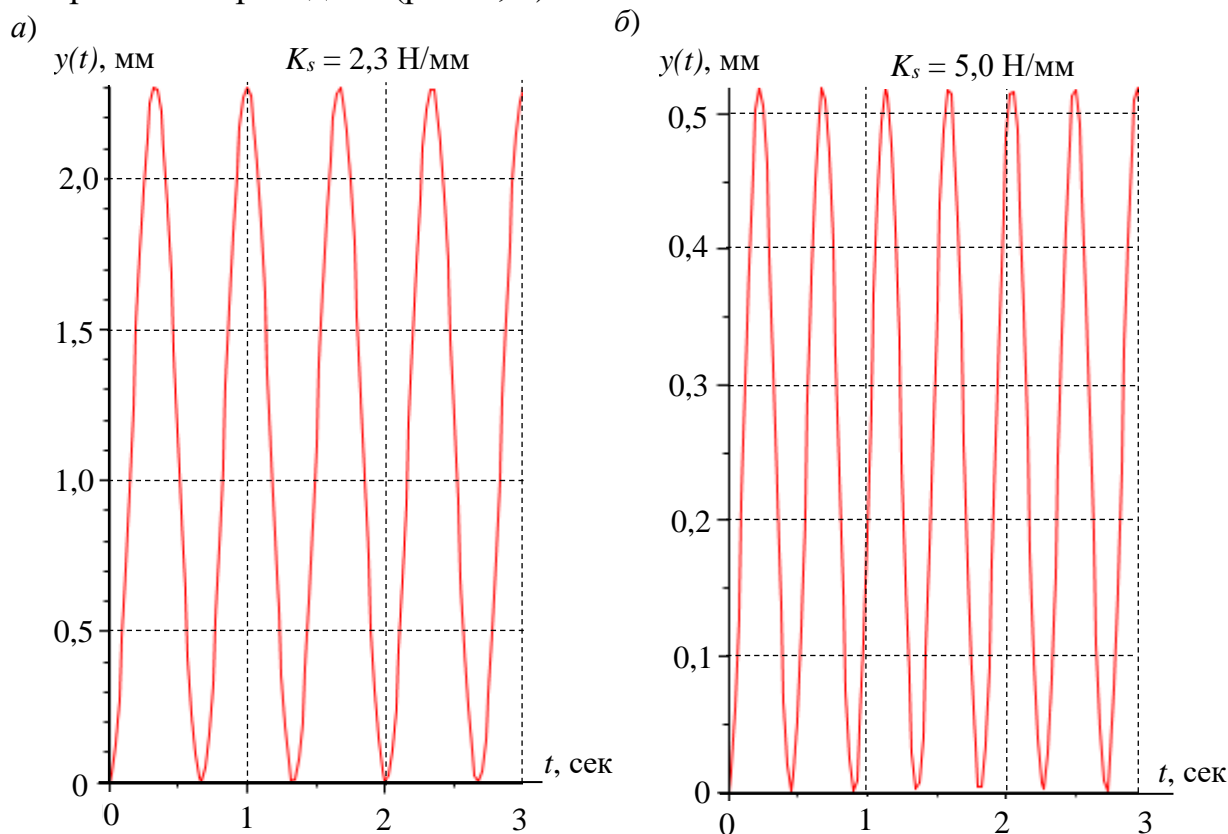


Рисунок 2 – Кривая перемещения дроссельного стержня регулятора давления

Figure 2 – Displacement curve of the throttle rod of the pressure regulator

Анализ кривых приведенных на рисунке 2 позволяет сделать вывод о том, что при отработке регулятором воздействия связанного с давлением потока воды на верхнюю поверхность регулирующего плунжера, перемещение дроссельного стержня носит колебательный характер. При этом, с увеличением жесткости пружины, уменьшается абсолютная величина линейного смещения стержня.

Для расчета кривых производительности регулятора давления с учетом различных значений давления на входном участке регулировочного стержня и возможного диапазона осевого смещения дроссельного стержня воспользуемся выражением

$$P_{вых}^{def} = P_{вх} - \frac{\rho \cdot Q_{дожд}^2}{\left[a \cdot \ln \left(1 - \frac{L_{см}}{L_{см,max}} + b \right) \right]^2 \cdot C_{max}^2} \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где $Q_{дожд}$ – скорость потока (величина расхода) воды через регулятор давления дождевателя, л/сек; C – коэффициент расхода, б/р; $P_{вх}$ – входное давление регулятора, МПа; $P_{вых}$ – выходное давление регулятора, МПа; ρ – плотность воды, 1000 кг/м³; $L_{см}$ – осевое смещение дроссельного стержня регулятора, мм; $L_{см,max}$ – максимальное осевое смещение стержня, мм; $C_{max} = C \cdot L_{см,max} / (L_{см,max} - L_{см})$ – максимальный коэффициент расхода a , b – коэффициенты аппроксимации, б/р.

Коэффициенты a , b и C принимают дискретные значения в зависимости от натурального ряда чисел соответствующих величине $L_{см,max}$.

Например, для осевого смещения $L_{см,max} = 5$ мм, имеем: $a = 0.3442$; $b = 1.0567$; $C = 0.93$.

Величины расходов дождевателей типа Nelson D3000 с форсунками 3TN Nozzle приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1 – Величины расходов дождевателей фирмы Nelson D3000 для системы форсунок 3TN Nozzle (по возрастанию)

Table 1 – The cost values of Nelson D3000 sprinklers for the 3TN Nozzle nozzle system (in ascending order)

Тип	32	33	34	35
Расход, л/сек	0.500	0.526	0.556	0.588

С использованием выражения (6) и данных табл. 1, произведем расчет и построим кривую производительности регулятора давления для форсунки 3TN Nozzle типа 34.

При этом, для определения диапазона входных давлений воды на верхнюю поверхность дроссельного стержня регулятора воспользуемся данными производителя, приведенными на графике для диапазона значений давлений, связанных с “осью абсцисс” (рис. 3) [9].

Расчетные кривые производительности регулятора в соответствии с выражением (6) для дискретного ряда входного давления (рис. 3) применительно к форсунке 3TN Nozzle типа 34, приведены на рисунке 4.

Давление на выходе регулятора, МПа

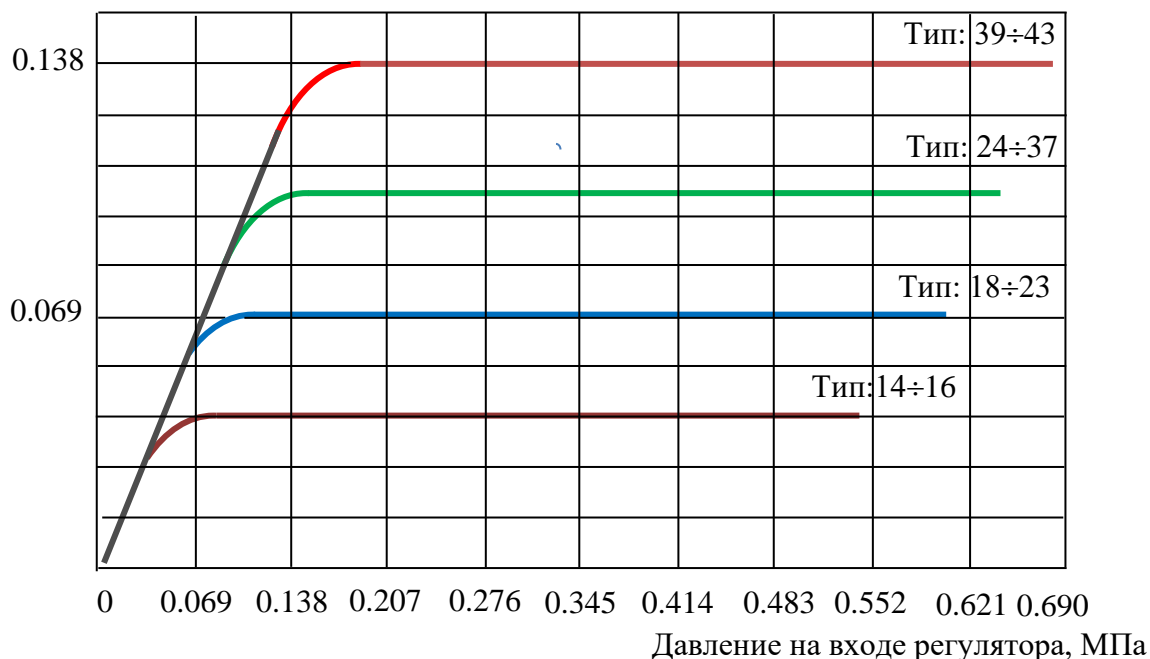


Рисунок 3 – Кривые производительности регулятора давления

Figure 3 – Pressure regulator performance curves

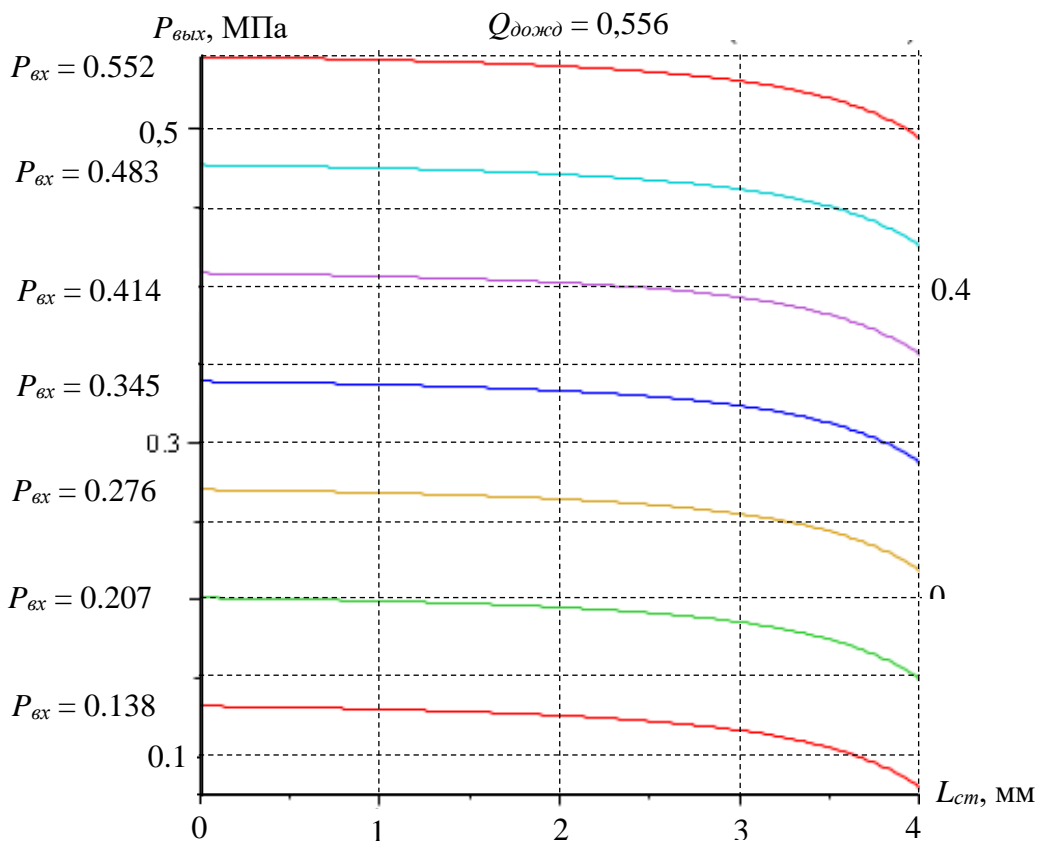


Рисунок 4 – Кривые изменения давления на выходе регулятора в функции осевого смещения дросельного стержня для заданного давления на его входе

Figure 4 – Pressure curves at the outlet of the regulator as a function of the axial displacement of the throttle rod for a given pressure at its inlet

В целом, результаты расчета позволяют сделать вывод о том, что давление на выходе медленно изменяется при малом объеме (величине расхода). При увеличении объема давление на выходе быстро уменьшается. Более высокое давление на входе соответствует большему изменению давления на выходе при большом объеме. Скорость потока влияет на давление на выходе.

Данные отклонений численного и экспериментального значений давлений для четырех типов форсунок, относительного паспортной величины стабилизируемого регулятором давления равного 0.1 МПа приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Отклонения численного и экспериментального значений давлений дождевателей фирмы Nelson D3000 для системы форсунок 3TN Nozzle

Table 2 – Deviations of numerical and experimental pressure values of Nelson D3000 sprinklers for the 3TN Nozzle nozzle system

Тип	32	33	34	35
Расход, л/сек	0.500	0.526	0.556	0.588
Численное значение давления, МПа	0.107	0.103	0.1	0.097
Экспериментальное значение давления, МПа	0.114	0.111	0.106	0.1
Относительная погрешность, %	-5.5	-7.4	-5.8	-2.5

Выводы. Рассчитанные с помощью предложенной нелинейной математической модели перемещения подвижной части регулятора кривые его производительности позволяют графически определить величину смещения, которое достигает Т-образный регулирующий поршень при данном давлении на входе с учетом величины входного потока воды, жесткости пружины сжатия, длины ее предварительного натяжения и силы сопротивления. Результаты численного моделирования показывают, что высота проточного отверстия регулятора, определяющая максимальную величину осевого смещения дроссельного стержня, является ключевым фактором, влияющим на потерю давления внутри регулятора. Относительная погрешность между моделируемым значением давления на выходе и измеренным значением для четырех дождевателей типа Nelson D3000 с форсунками 3TN Nozzle не превышает 7.4%.

Список литературы

1. Вышпольский, Ф.Ф. Технологии водосбережения и управления почвенно-мелиоративными процессами при орошении / Ф.Ф. Вышпольский, Х.В. Мухамеджано // – Тараз: ИЦ “Аква”, 2005. – 162 с.
2. Грузинов, А.Б. Повышение эффективности водопользования на оросительных системах Нижнего Дона с учетом требований экологии / Грузинов А.Б. // Исследования в области решения проблем мелиорации. – М.: 2002. – С. 76-82.

3. Наземцев, А.С. Пневматические приводы и системы. Ч.2: Гидравлические приводы и системы / А.С. Наземцев, Д.Е. Рыбальченко. – М.: ФОРУМ, 2007. – 304 с.
4. Хабаров, В.Е. Потери воды на испарение и снос ветром при дождевании / В.Е. Хабаров // Рациональное использование и охрана природных ресурсов: сб. науч. тр. / ЮжНИИГиМ. – Новочеркасск, 1980. – С. 28-36.
5. Черных, А.Г. Влияние средней интенсивности дождя дождевальной машины на скорость инфильтрации воды в почву / А.Г. Черных // Исследования в современной науке 2024: сб. матер. междунар. научно-практ. конф. – Краснодар: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ “РЭА” Минэнерго России, 2024. – С. 147-156.
6. Черных, А.Г. Уравнение непрерывности водяного потока основного трубопровода дождевальной машины кругового действия: матер. XII междунар. научно-практ. конф. “Климат, экология и сельское хозяйство Евразии”, 27-28 апреля 2023 г. – Молодежный: Изд-о: Иркутский ГАУ, том II. – С. 127-134.
7. Bemuth, R.D. Characteristics of the operation of the pressure regulator / R.D. von Bemuth, D. Baird // Proceedings of ASME. – 1990, vol. 33(1). – pp. 0145-0150.
8. Lamaddalena, N. Assessing the impact of flow regulators with a pressure-driven performance analysis model / N. Lamaddalena, L.S. Pereira // Journal of Agricultural Water Management. – 2007, vol. 90(1/2) – pp. 27-35.
9. Ross, G. Understanding pressure regulation / G. Ross, M. Fletcher // A joint presentation from Nelson Irrigation and Senninger Irrigation at the 2019 Irrigation Show & Education Conference. – 2019. – pp. 1-12.
10. Yan, H. Performance test and force analysis of pressure regulator used in irrigation system / H. Yan, P. Yao, Meng Vang // Journal of Drainage and Irrigation Engineering. – 2010, vol. 28(6). – pp. 548-552.

Referenses

1. Vyshpol'skij, F.F., Muhamedzhano, H.V. Tekhnologii vodosberezheniya i upravleniya pochvenno-meliorativnymi processami pri oroshenii [Technologies of water conservation and management of soil reclamation processes in irrigation]. Taraz: IC “Akva”, 2005, 162 p.
2. Gruzinov, A.B. Povyszenie effektivnosti vodopol'zovaniya na orositel'nyh sistemah Nizhnego Dona s uchetom trebovanij ekologii [Improving the efficiency of water use in irrigation systems of the Lower Don, taking into account environmental requirements]. Issledovaniya v oblasti resheniya problem melioracii, Moscow, 2002, pp. 76-82.
3. Nazemcev, A.S., Rybal'chenko, D.E. Pnevmaticheskie privody i sistemy. Ch.2: Gidravlicheskie privody i sistemy [Pneumatic actuators and systems. Part 2: Hydraulic actuators and systems]. Moscow: FORUM, 2007, 304 p.
4. Habarov, V.E. Poteri vody na isparenie i snos vetrom pri dozhdevanii [Water losses due to evaporation and wind drift during sprinkling]. Novoчеркасск, 1980, pp. 28-36.
5. Chernyh, A.G. Vliyanie srednej intensivnosti dozhdya dozhdeval'noj mashiny na skorost' infil'tracii vody v pochvu [The effect of the average rain intensity of the sprinkler machine on the rate of water infiltration into the soil]. Krasnodar: Krasnodarskij CNTI – filial FGBU “REA” Minenergo Rossii, 2024, pp. 147-156.
6. Chernyh, A.G. Uravnenie nepreryvnosti vodyannogo potoka osnovnogo truboprovoda dozhdeval'noj mashiny krugovogo dejstviya [The equation of continuity of the water flow of the main pipeline of a circular sprinkler machine]. Molodejnnii, 2023, vol. II, pp. 127-134.

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: 17.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 25.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторе

Черных Алексей Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники энергетического Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, тел. 89500633102, e-mail: kandida2006@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3498-6579>.

Information about author

Aleksey G. Chernykh – Candidate of Technical Sciences, Ass. Prof. of the Department of “Power Supply and Electrical Engineering”, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, tel. 89500633102, e-mail: kandida2006@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3498-6579>.



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

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

DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-47-59

УДК 519.862:631.559

Научная статья

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПРОИЗВОДСТВА
РАСТЕНИЕВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Я.М. Иванько, Л.С. Ананьев

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

Аннотация. В работе описаны результаты применения задачи параметрического программирования с вероятностными коэффициентами при неизвестных в левых частях ограничений. Проанализированы особенности характеристик модели, которые разделены на две группы. Часть из них представляет собой случайные величины, а другая – зависит от параметра в виде времени. В приведенной модели многолетняя изменчивость рядов характеристик описывается логистической функцией, реже степенной и линейной. При этом случайные характеристики зачастую подчиняются вероятностному распределению Пирсона III типа. В случае описания характеристик модели с помощью значимых трендов результатом решения экстремальной задачи являются оптимальные планы объемов производства сельскохозяйственной продукции, соответствующие максимальной прибыли с упреждением на среднесрочную перспективу. Если характеристики модели являются случайными величинами, то полученная прибыль и соответствующие ей планы описываются вероятностным распределением. Как правило, чаще всего встречаются ситуации, которые моделируются с помощью параметрического программирования с вероятностными характеристиками. Модель оптимизации объемов производства растениеводческой продукции реализована для трех сельскохозяйственных муниципальных районов Иркутской области: Куйтунского, Аларского и Тулунского. Результаты статистической обработки урожайности зерновых культур, картофеля и овощей для всех категорий хозяйств рассматриваемых муниципальных районов показывают, что наиболее непредсказуема изменчивость этой характеристики для Тулунского района. В двух других районах преобладающее большинство временных рядов урожайности сельскохозяйственных культур описываются значимыми трендами. Алгоритм получения оптимальных решений имеет значение для планирования объемов производимой продукции, как для муниципальных районов, так и сельскохозяйственных организаций.

Ключевые слова: параметрическое программирование, вероятность, тренд, растениеводство.

Для цитирования: Иванько Я.М., Ананьев Л.С. Моделирование потенциала производства растениеводческой продукции в условиях неопределенности. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2 (51):47-59. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-47-59.

MODELING THE PRODUCTION POTENTIAL OF CROP PRODUCTS UNDER UNCERTAINTY

Yaroslav M. Ivanyo, Leonid S. Ananyev

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

Abstract. The paper describes the results of applying a parametric programming problem with probabilistic coefficients with unknown constraints on the left sides. The characteristics of the model are analyzed and divided into two groups. Some of them are random variables, while others depend on a parameter in the form of time. In the above model, long-term variability of series of characteristics is described by a logistic function, less often a power function and a linear one. In this case, random characteristics often obey the Pearson type III probability distribution. In the case of describing the characteristics of the model using significant trends, the result of solving the extreme problem is optimal plans for the volume of agricultural production, corresponding to maximum profit in advance for the medium term. If the characteristics of the model are random variables, then the profit obtained and the plans corresponding to it are described by a probability distribution. As a rule, the most common situations are those that are modeled using parametric programming with probabilistic characteristics. A model for optimizing crop production volumes was implemented for three agricultural municipal districts of the Irkutsk region: Kuytunsky, Alarsky and Tulunsky. The results of statistical processing of the yield of grain crops, potatoes and vegetables for all categories of farms in the municipal districts under consideration show that the variability of this characteristic is most unpredictable for the Tulun district. In the other two regions, the vast majority of crop yield time series are characterized by significant trends. The algorithm for obtaining optimal solutions is important for planning the volume of production, both for municipal districts and agricultural organizations.

Keywords: parametric programming, probability, trend, crop production.

For citation: Ivanyo Ya. M., Ananyev L.S. Modeling the production potential of crop products under uncertainty. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 2 (51):47-59. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-47-59.

Введение. Оценка потенциала получения растениеводческой продукции – это процесс анализа и оценки возможностей и ограничений сельскохозяйственного производства. Она включает в себя изучение таких факторов, как плодородие почв, климатические условия, доступность ресурсов, технологии и организационные возможности. Оценка потенциала помогает определить наиболее перспективные направления развития производства, а также оценить его экономическую эффективность и экологическую устойчивость.

Потенциал производства зависит от множества факторов, согласно которым можно выделять агроландшафтные районы [12, 13]. Некоторые из факторов и сочетания факторов, влияющих на производственно-экономические характеристики и, прежде всего, на урожайность

сельскохозяйственных культур являются случайными. В этой ситуации применимы стохастические задачи математического программирования.

Между тем анализ динамики биопродуктивности сельскохозяйственных культур показывает тенденцию их роста [2, 3, 12]. Причем во многих случаях наблюдаются значимые линейные и нелинейные тренды в виде выпуклых функций. Кроме того, временные ряды рассматриваемой характеристики могут быть описаны многоуровневыми трендами для благоприятных, усредненных и неблагоприятных условий получения продукции [5, 8].

Вместе с тем существуют ограничивающие факторы в устойчивом повышении урожайности [11]. Рост урожайности сельскохозяйственных культур и сдерживающие факторы этого процесса влияют на процессы управления производством аграрной продукции на разных уровнях агрегирования [1, 10].

Исходя из сказанного, изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур может быть описана с помощью тренда или закона распределения вероятностей при наличии ряда определенного объема.

При наличии в рядах урожайности значимых трендов для оптимизации объемов производства сельскохозяйственной продукции могут быть использованы задачи параметрического программирования [5, 9]. В случае неопределенности этой характеристики применимы экстремальные задачи с интервальными и случайными характеристиками [14]. Возможно использование задач параметрического программирования с неопределенными характеристиками.

Перечисленные экстремальные задачи могут использоваться для планирования аграрного производства, в том числе в условиях рисков [4, 14]. Другими словами, в зависимости от особенностей характеристик для решения управленческих задач можно использовать детерминированные модели и модели в условиях неопределенности. В ряде случаев для компромиссных решений применимы многокритериальные задачи.

Разные агроландшафтные районы Иркутской области имеют разный потенциал развития, что связано с особенностями климатических условий, спецификой подстилающей поверхности, а также их взаимодействием.

Целью работы является оценка потенциала производства растениеводческой продукции муниципальных районов (на примере Иркутской области) с использованием задачи параметрического программирования с вероятностными характеристиками.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1) построение модели параметрического программирования с вероятностными характеристиками;

2) реализация модели параметрического программирования с вероятностными характеристиками для оценки потенциала производства растениеводческой продукции.

Материалы и методы. В работе использованы данные о производстве сельскохозяйственной продукции в муниципальных районах Центрального лесостепного агроландшафтного района за 1996-2021 гг.

Для оценки планов объемов производства растениеводческой продукции использованы методы параметрического программирования в условиях неопределенности. Кроме того, для вероятностной оценки урожайности некоторых сельскохозяйственных культур применен метод построения закона распределения вероятностей. Для описания низких значений биопродуктивности сельскохозяйственных культур выделялись последовательности локальных минимумов из многолетних рядов [8].

Полученные результаты дополняют исследования разных авторов по применению математического моделирования для управления производством аграрной продукции в условиях неопределенности различных факторов [5, 7, 14].

Основные результаты. В работе [5, 9] описан потенциал производства растениеводческой продукции в стабильных условиях, который представляет собой совокупность возможностей и ресурсов, которые обеспечивают устойчивое и эффективное производство сельскохозяйственных культур.

Для получения оценки потенциала производства растениеводческой продукции в Куйтунском, Аларском и Тулунском районах использованы данные по урожайности растениеводческой продукции Иркутской области со специфическими природно-климатическими условиями за 1996-2021 годы, а также годовые бухгалтерские отчеты хозяйств. Рассмотрены сведения о всех категориях хозяйств. Статистическому анализу подвергались урожайности пшеницы, ячменя, овса, капусты, картофеля, моркови и свеклы.

Для прогнозирования и планирования производства растениеводческой продукции использован алгоритм, приведенные в работе [5] с дополнением, связанным с динамико-стохастическими особенностями временных рядов характеристик математической модели. Другими словами, часть характеристик в модели оценивается с помощью закона распределения вероятностей, а другая часть зависит от параметра, характеризующего время.

Согласно используемому алгоритму:

- 1) осуществляется сбор многолетних данных о производственно-экономических и климатических характеристиках по муниципальному району;
- 2) на основе корреляционно-регрессионного анализа определяются значимые тренды с использованием линейной и нелинейных функций;
- 3) выбирается наилучшая зависимость из значимых функций согласно статистическим критериям точности, значимости выражений и коэффициентов выражений;
- 4) выполняется прогнозирование характеристик с определением заблаговременности;
- 5) при отсутствии трендов по временным рядам строятся законы

распределения вероятностей с использованием трехпараметрического гамма-распределения и распределения Пирсона III типа;

б) на основе выбранных трендов и значений вероятностных характеристик осуществляется оптимизация производства аграрной продукции на максимум выручки или прибыли;

7) по полученным оптимальным решениям оценивается потенциал производства растениеводческой продукции в муниципальном образовании.

При оптимизации производства растениеводческой продукции можно использовать задачи математического программирования с детерминированными и неопределенными характеристиками.

Задача параметрического программирования с вероятностными характеристиками, в которой целевая функция описывает максимум прибыли сельскохозяйственного предприятия, имеет вид:

$$\sum_{s \in S} c_s x_s \rightarrow \max, \quad (1)$$

при условиях:

ограниченности производственных ресурсов

$$\sum_{s \in S} a_{ls} x_s \leq A_l(t), l \in L, \quad (2)$$

ограниченности размера растениеводческой отрасли

$$\underline{n}_r \leq \sum_{s \in S} (1 + \beta_s) x_s \leq \overline{n}_r, r \in R, \quad (3)$$

производства конечной продукции заданного объема

$$\sum_{s \in S} v_{qs}^p(t) x_s \geq V_q, q \in Q, \quad (4)$$

определенного количества вносимых удобрений и средств защиты растений

$$\sum_{s \in S} b_{ms} x_s \leq B_m, m \in M, \quad (5)$$

неотрицательности переменных

$$x_s \geq 0 \quad (6)$$

где x_s – искомая переменная, площадь сельскохозяйственной культуры s ; c_s – прибыль от производства единицы s -культуры; a_{ls} – расход ресурса l на единицу площади культуры s или вида кормовых угодий; L – множество ресурсов; $A_l(t)$ – наличие ресурса l -вида; V_q – гарантированный (обязательный объем) производства продукции вида q ; $\overline{n}_r, \underline{n}_r$ – максимальная и минимальная возможная площадь культур группы r ; R – множество групп культур; $v_{qs}^p(t)$ – выход товарной продукции q -вида с единицы площади культуры s ; Q – множество видов продукции; β_s – коэффициент, учитывающий площадь семенных посевов для культуры s ; b_{ms} – расход удобрений видов m и средств защиты на единицу площади культуры s или вида кормовых угодий; B_m – необходимый объем удобрений вида m ; M – множество видов удобрений.

Приведенная задача согласно [5] видоизменена. В модели (1)-(6) многолетние тенденции изменения земельных ресурсов земельные ресурсы $A(t)$ и урожайности сельскохозяйственных культур $v_{qs}^p(t)$ могут быть описаны функциями роста. Вместе с тем некоторые урожайности сельскохозяйственных культур являются вероятностными, значения которых соответствуют вероятностям p . Таким образом, задача (1)-(6) является параметрической с вероятностными характеристиками.

Для описания вероятностных характеристик применимо распределение Пирсона III типа [6]:

$$F(y, \gamma, l, y_c) = \int_{-\infty}^y \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)(y_c - l)} \left(\frac{y - l}{y_c - l} \right)^{\gamma-1} e^{-\gamma \left(\frac{y-l}{y_c-l} \right)} dy, \quad (7)$$

где $F(y, \gamma, l, y_c)$ – функция распределения, y_c – среднее значение ряда; γ и l – параметры распределения; $\Gamma(\gamma)$ – гамма-функция. В некоторых случаях применимо трехпараметрическое степенное гамма-распределение [6].

В работе [9] приведены результаты построения трендов урожайности на основе статистической обработки данных по урожайности сельскохозяйственных культур Куйтунского и Аларского районов (табл. 1), которые могут быть использованы для оптимизации производства растениеводческой продукции согласно модели (1)-(6). Часть результатов таблицы 1 заимствована из работы [9] за исключением урожайности свеклы Куйтунского и Аларского районов, для описания изменчивости которой предложены линейные тренды. При этом для этих двух районов приведена урожайность капусты.

Следует иметь в виду, что площади сельскохозяйственных культур в Куйтунском и Аларском районах ежегодно увеличиваются примерно на 2%. Согласно таблице 1 для Куйтунского района имеют место пять значимых регрессионных выражений за исключением урожайности свёклы. Для Аларского района не значимым регрессионным выражением является урожайность картофеля.

Отметим, что урожайность картофеля для Куйтунского района имеет значимый тренд убывания. Поэтому предлагается эту характеристику оценивать, как усредненную, или увеличивать на определенное значение согласно экспертной оценке.

В работе [9] приведены результаты построения трендов урожайности на основе статистической обработки данных по урожайности сельскохозяйственных культур Тулунского района (табл. 1). По данным таблицы имеют место значимые регрессионные выражения для урожайности овса, картофеля и моркови. Остальные виды культур характеризуются незначимыми трендами с коэффициентами детерминации R^2 ниже 0.50. Для

рядов этих культур рассчитаны статистические параметры, приведенные в таблице 2.

Таблица 1 – Тренды уровней рядов урожайности сельскохозяйственных культур по данным Куйтунского, Аларского и Тулунского районов за 1996-2021 гг. с использованием результатов статьи [9]

Table 1 – Trends in crop yield series levels according to data from Kuytunsky, Alarsky and Tulunsky districts for 1996-2021 using the results of the article [9]

Зерновая культура	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2	F-критерий Фишера	t-статистики Стьюдента
Куйтунский район				
Пшеница	$y=26,8/(1+e^{-0,094t})$	0.69	54.5	7.4
Ячмень	$y=25,7/(1+e^{-0,089t})$	0.67	49.5	7.0
Овес	$y=24,7/(1+e^{-0,086t})$	0.66	45.6	6.8
Картофель	$y=210,7t^{0,115}$	0.64	41.2	6.4
Капуста	$y=306,3/(1+e^{-0,134t})$	0.69	52.2	7.2
Свекла	$y=294,6/(1+e^{-0,07t})$	0.30	10.4	3.2
Аларский район				
Пшеница	$y=24,9/(1+e^{-0,09213t})$	0.57	32.31	-5.7
Ячмень	$y=24,3/(1+e^{-0,102t})$	0.52	21.5	-4.6
Овес	$y=22,6/(1+e^{-0,126t})$	0.60	27.9	-5.3
Картофель	$y=141,9/(1+e^{-0,104t})$	0.44	16.25	-4.0
Капуста	$y=286,6/(1+e^{-0,241t})$	0.79	79.83	-8.9
Свекла	$y=187,8+4,64t$	0.58	27.62	5.3
Тулунский район				
Пшеница	$y=24,5/(1+e^{-0,075t})$	0,48	23,2	-4,8
Овес	$y=23,1/(1+e^{-0,099t})$	0,64	46,0	-6,8
Ячмень	$y=30,1-20,7e^{-0,059t}$	0,42	18,7	-4,3
Картофель	$y=155,4/(1+e^{-0,180t})$	0,82	118,4	-10,9
Морковь	$y=278,7/(1+e^{-0,0119t})$	0,53	29,0	-5,4
Свекла	$y=314,5/(1+e^{-0,084t})$	0,28	8,56	-2,9

Отсюда следует, что производство некоторых сельскохозяйственных культур согласно полученным данным по урожайности сельскохозяйственных культур является не стабильным, что предполагает для оценки рядов некоторых характеристик использование методов теории вероятностей и математической статистики.

В таблице 2 приведены средние значения рядов сельскохозяйственных характеристик u_c с оценкой их вероятности p , в которых не выявлены значимые тренды. При этом эти ряды обладают низкими первыми коэффициентами автокорреляции R_1 и невысокими коэффициентами вариации C_v . Все рассматриваемые последовательности обладают асимметрией C_s .

Помимо описанных статистических параметров в таблице 2 приведены средние значения локальных минимумов рядов y_c^{\min} , ниже которых наблюдаются неблагоприятные события, вызванные, прежде всего, засушливыми явлениями. Согласно соотношению этого показателя и среднего значения ряда, можно судить об уровне перехода значения ряда в событие.

Таблица 2 – Статистические параметры многолетних рядов урожайности сельскохозяйственных культур по данным Куйтунского, Аларского и Тулунского районов за 1996-2021 гг.

Table 2 – Statistical parameters of long-term crop yield series according to data from Kuytunsky, Alarsky and Tulunsky districts for 1996-2021.

Культура	y_c , ц/га	P	C_v	C_s	R_I	y_c^{\min} , ц/га	y_c^{\min} / y_c , ц/га
Куйтунский район							
Свекла	227.10	0.57	0.12	0.90	0.22	208.3	0.92
Картофель	162.40	0.61	0.13	1.90	0.60	152.8	0.94
Аларский район							
Картофель	115.70	0.45	0.10	-0.32	0.24	107.3	0.92
Тулунский район							
Пшеница	18.60	0.50	0.14	0.0	-0.15	15.9	0.85
Ячмень	18.20	0.53	0.22	0.50	0.16	14.5	0.80
Свекла	213.30	0.41	0.28	-1.30	0.51	189.8	0.88

Приведенные результаты статистической оценки (табл. 2) и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур согласно трендам (табл. 1) использованы для моделирования объемов производства продукции растениеводства. Для этого применена задача параметрического программирования [5], которая дополнена вероятностными характеристиками. В первом приближении для оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с использованием задачи параметрического программирования привлечены прогностические значения урожайности сельскохозяйственных культур, полученные с помощью значимых трендов (табл. 1). Характеристики, подчиняющиеся законам распределения вероятностей (табл. 2), приняты в виде средних значений.

В таблице 3 приведены оптимальные решения задачи параметрического программирования с вероятностными характеристиками, полученные согласно модели (1)-(6), для Куйтунского и Аларского районов. Вероятность p средних значений случайных характеристик приведена в табл. 2.

Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что Куйтунский район обладает высоким потенциалом производства растениеводческой продукции. Возможность ежегодного увеличения

продукции составляет 2.6%. Темпы производства продукции могут быть более значительными при увеличении производства картофеля и свеклы.

Потенциал производства в Аларском районе также обладает высоким потенциалом. Так, возможность ежегодного увеличения продукции составляет 2.7%. Увеличение темпов роста может быть достигнуто путем увеличения объемов производства картофеля. В частности, эту проблему можно решить за счет использования новых сортов с высоким потенциалом биопродуктивности, качественных семян, соблюдения адекватных технологических операций.

Таблица 3 – Оптимальные решения задачи параметрического программирования с вероятностными характеристиками для Куйтунского и Аларского районов

Table 3 – Optimal solutions to the parametric programming problem with probabilistic characteristics for Kuytunsky and Alarsky districts

Год	Пшеница	Ячмень	Овес	Картофель	Капуста	Свекла	Прибыль, млн руб.
	x_1, t	x_2, t	x_3, t	x_4, t	x_5, t	x_6, t	
Куйтунский район							
2023	119977.5	20616.2	12192.5	12082.5	323.1	234	1710.61
2024	123181.5	21177.6	12527.6	12272.7	330.9	238.6	1754.34
2025	126401.1	21742.1	12864.7	12467.7	338.8	243.4	1798.34
Аларский район							
2023	47355.3	22153.6	21888.0	5192.6	58.3	122.1	942.79
2024	48630.8	22790.3	22483.0	5296.5	59.5	126.4	968.04
2025	49913.0	23427.4	23075.8	5402.4	60.7	130.9	987.41
Тулунский район							
2023	49159.3	13041.1	12641.2	11866.7	399.3	105	916.53
2024	50142.5	13301.9	12953.1	12119.7	408.4	107.1	935.58
2025	51145.4	13567.9	13272.5	12370.1	417.6	109.2	954.90

Согласно полученным результатам можно заключить, что Тулунский район обладает хорошими темпами роста объемов продукции, учитывая высокую неопределенность факторов. Ежегодно возможно увеличение производства продукции на 2.1%. Однако развитие производства растениеводческой продукции в этом районе уступает производству аналогичной продукции в Куйтунском районе. Одна из причин – неустойчивое производство пшеницы и ячменя. Не стабильно производство свёклы.

Высокая неопределенность получения объемов сельскохозяйственных культур, приведенных в табл. 2, за исключением зерновых культур, объясняется неустойчивым производством личных подсобных хозяйств, на долю которых приходится большая часть объемов овощей и картофеля. Что

касается Тулунского района, то здесь необходимо учитывать значительные потери продукции, имевшие место в период паводка 2019 года.

Заключение. Для прогнозирования и планирования производства растениеводческой продукции описан алгоритм, предложенный в работах других авторов, дополненный операциями вероятностной оценки некоторых производственных характеристик.

Для оптимизации производства растениеводческой продукции в условиях неопределенности использована модель параметрического программирования с вероятностными характеристиками.

Предложенные модели использованы для оценки потенциала получения растениеводческой продукции в Куйтунском, Аларском и Тулунском районах Иркутской области до 2025 года.

Полученные прогнозы и планы для Куйтунского, Аларского и Тулунского районов предлагается использовать министерством сельского хозяйства Иркутской области при подготовке ежегодных заданий для сельскохозяйственных товаропроизводителей по производству растениеводческой продукции.

Приведенный и реализованный алгоритм оценки потенциала получения растениеводческой продукции можно использовать для сельскохозяйственных организаций и муниципальных районов для прогнозирования и планирования производства растениеводческой продукции.

Для улучшения приведенного алгоритма в дальнейшем предполагается применять многоуровневые модели и разработать программный комплекс с целью решения задач прогнозирования и планирования аграрного производства.

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

Список литературы

1. Анохина, М.Е. Экономическая динамика сельского хозяйства: факторы, управление, стратегия / М.Е. Анохина // Аграрный вестник Урала. – 2019. – № 11(190). – С. 71-79.
2. Ариничева, И.В. Рост урожайности зерновых культур за счет селекции как важнейший фактор экономического развития Краснодарского края / И.В. Ариничева, И.В. Ариничев, И.О. Сергеева // Вестник Академии знаний. – 2020. – № 39 (4). – С. 52-60.
3. Архипова, М.Ю. Современные направления прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе использования эконометрических моделей / М.Ю. Архипова, А.И. Смирнов // Вопросы статистики. – 2020. – Т. 27, № 5. – С. 65-75.
4. Бараева, Ю.В. Классификация экономического риска в сельском хозяйстве / Ю.В. Бараева, Н.А. Кабанова, Н.Е. Рыженкова // Экономика сельского хозяйства России. – 2020. – № 6. – С. 44-49.
5. 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. – 2020. – № 3 (19). – С. 73-85.

6. Блохинов, Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока / Е.Г. Блохинов. – М.: Наука, 1974. – 169 с.

7. Глухов, С.Г. Применение метода динамического программирования для расчета вариантов стимулирования сельскохозяйственного производства / С.Г. Глухов // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 8. – С. 75-78.

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

9. Иваньо, Я.М. Прогнозирование и планирование производства растениеводческой продукции для агроландшафтных районов лесостепной зоны региона / Я.М. Иваньо, М.Н. Синицын, В.В. Цыренжапова // 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. 193-204.

10. Нуретдинова, Ю.В. Применение нормативной урожайности, как элемента повышения эффективности использования сельскохозяйственных угодий / Ю.В. Нуретдинова, И.Г. Нуретдинов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2013. – Т. 8, № 2(28). – С. 44-48.

11. Ограничивающие факторы и перспективы устойчивого повышения урожайности пшеницы в Таджикистане / М.Г. Отамбекова, Б.Т. Солихов, Б.Ю. Хусенов, Х.А. Муминджанов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15, № 3(59). – С. 31-36.

12. Система ведения сельского хозяйства Иркутской области: монография в 2-х ч. / Под ред. Я.М. Иваньо, Н.Н. Дмитриева. – Иркутск: Изд-во Мегапринт, 2019 – Ч. 1 – 319 с.

13. Солодун, В.И. Сельскохозяйственное районирование и использование агроландшафтов в земледелии Иркутской области / В.И. Солодун. – Иркутск: Иркутский ГАУ, 2018. – 200 с.

14. Ivanyo, Ya.M. Modeling of the production of agrarian products under the conditions of influence of droughts, rainfall and their combinations / Ya. M. Ivanyo, S. A. Petrova, M.N. Polkovskaya, N.I.Fedurina // Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security. Proceedings of the Vth International workshop. Advances in Intelligent Systems Research. Irkutsk, 2018, – pp. 78-84.

References

1. Anokhina, M.E. Ekonomicheskaya dinamika selskogo khozyaystva: faktory. upravleniye. strategiya [Economic dynamics of agriculture: factors, management, strategy]. Ekaterinburg, 2019, pp. 71-79.

2. Arinicheva, I.V. et all. Rost urozhaynosti zernovykh kultur za schet selektsii kak vazhneyshiy faktor ekonomicheskogo razvitiya Krasnodarskogo kraya [Increase in the yield of grain crops due to selection as the most important factor in the economic development of the Krasnodar region]. Krasnodar, 2020, pp. 52-60.

3. Arkhipova, M.Yu., Smirnov A.I. Sovremennyye napravleniya prognozirovaniya urozhaynosti selskokhozyaystvennykh kultur na osnove ispolzovaniya ekonometricheskikh modeley [Modern directions of forecasting the yield of agricultural crops based on the use of econometric models]. Moscow, 2020, pp. 65-75.

4. Baraeva, Yu.V. et all. Klassifikatsiya ekonomicheskogo riska v selskom khozyaystve [Classification of economic risk in agriculture]. Balashikha, 2020, pp. 44-49.

5. Barsukova, M.N. et all. Ob odnoy modeli optimizatsii proizvodstva agrarnoy produktsii v blagopriyatnykh i neblagopriyatnykh vneshnikh usloviyakh [On one model for optimizing the production of agricultural products in favorable and unfavorable external conditions]. Irkutsk, 2020, pp. 73-85.

6. Blokhinov, E.G. Raspredeleniye veroyatnostey velichin rechnogo stoka [Probability distribution of river flow values]. Moscow, 1974, pp. 169.

7. Glukhov, S.G. Primeneniye metoda dinamicheskogo programmirovaniya dlya rascheta variantov stimulirovaniya selskokhozyaystvennogo proizvodstva [Application of the dynamic programming method for calculating options for stimulating agricultural production]. Saratov, 2018 pp. 75-78.

8. Ivanyo, Ya.M., Petrova, S.A. Ob odnom algoritme vydeleniya anomalnykh urovney vremennogo ryada dlya otsenki riskov [About one algorithm for identifying anomalous levels of a time series for risk assessment]. Molodezhny, 2022, pp. 48-57.

9. Ivanyo, Ya.M. et all. Prognozirovaniye i planirovaniye proizvodstva rasteniyevodcheskoy produktsii dlya agrolandshaftnykh rayonov lesoctepnoy zony regiona [Forecasting and planning of crop production for agrolandscape areas of the forest-temple zone of the region]. Molodezhny, 2023, pp. 193-204.

10. Nuretdinova, Yu.V., Nuretdinov, I.G. Primeneniye normativnoy urozhaynosti. kak elementa povysheniya effektivnosti ispolzovaniya selskokhozyaystvennykh ugodiy [Application of standard yield as an element of increasing the efficiency of use of agricultural land]. Kazan, 2013, pp. 44-48.

11. Otambekova, M.G. et all. Ogranichivayushchiye faktory i perspektivy ustoychivogo povysheniya urozhaynosti pshenitsy v Tadzhikistane [Limiting factors and prospects for a sustainable increase in wheat yield in Tajikistan]. Kazan, 2020, pp. 31-36.

12. Ivanyo, Ya.M. Sistema vedeniya selskogo khozyaystva Irkutskoy oblasti [Agricultural system of the Irkutsk region]. Irkutsk, 2019, 319 p.

13. Solodun, V.I. Selskokhozyaystvennoye rayonirovaniye i ispolzovaniye agrolandshaftov v zemledelii Irkutskoy oblasti [Agricultural zoning and use of agricultural landscapes in agriculture of the Irkutsk region]. Molodezhny, 2018, pp. 200.

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: 23.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 24.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторах

Иваньо Ярослав Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. Автор монографий и свыше 500 научных работ, связанных с моделированием производственных процессов и применение цифровых технологий в сельском хозяйстве.

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>.

Ананьев Леонид Сергеевич – аспирант кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, e-mail: veinanalleo@yandex.ru.

Information about authors

Yaroslav M. Ivano – 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>.

Leonid S. Ananyev – graduate student of the Department of Computer Science and Mathematical Modeling Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, e-mail: veinanalleo@yandex.ru.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-60-72

УДК 519.711.2

Научная статья

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ

В.В. Куликов, Н.Н. Куцый

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

Аннотация. В настоящей работе рассматривается параметрическая оптимизация регулятора с переменной структурой (РПС), содержащего пропорциональный и интегральный блок с переключаемыми параметрами, с использованием линейного интегрального критерия и штрафной функции по допустимому максимальному значению выходной координаты регулятора. Данный регулятор использует зону нечувствительности для реализации режима с конечным числом переключений. Использование в интегральном критерии оптимизации функций без изменения их знака позволяет минимизировать колебательность и, как следствие, перерегулирование в автоматической системе. В этой работе используется алгоритм на основе градиентной процедуры для решения задачи параметрической оптимизации РПС, так как используемый регулятор содержит нелинейные элементы типа “ключ” и рассматривается объект с запаздыванием, что препятствует применению аналитических подходов для данной задачи. Необходимые составляющие градиента критерия оптимизации вычисляются с помощью функций чувствительности на основе операторного метода. Сформированный алгоритм автоматической параметрической оптимизации (АПО) позволил вычислить оптимальные параметры РПС для заданного объекта исходя из минимального значения линейного интегрального критерия на серии запусков алгоритма АПО. Достоверность найденного алгоритмом АПО вектора настройки РПС, задействованного в модели автоматической системе поддержания заданной температуры туннельной печи для обжига кирпича, подтверждается вычислительной методикой.

Ключевые слова: ПИ-регулятор, системы с переменной структурой, функции чувствительности, градиентный алгоритм, автоматические системы с запаздыванием, штрафная функция, линейный интегральный критерий.

Для цитирования: Куликов В.В., Куцый Н.Н. Параметрическая оптимизация регулятора с переменной структурой с использованием линейного интегрального критерия. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2 (51):60-72. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-60-72.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF A CONTROLLER WITH VARIABLE STRUCTURE USING A LINEAR INTEGRAL CRITERION

Vladimir V. Kulikov, Nikolay N. Kutsy

Irkutsk National Research Technical University, *Irkutsk, Russia*

Abstract. This article examines the parametric optimization of a variable structure controller (VSC), containing a proportional and integral block with switchable parameters, using a linear integral criterion and a penalty function for the permissible maximum value of the controller output coordinate. This controller uses a deadband to implement a mode with a finite number of switchings. The use of functions in the integral optimization criterion without changing their sign makes it possible to minimize oscillations and, as a consequence, overshoot in the automatic system. In this work, an algorithm based on the gradient procedure is used to solve the problem of parametric optimization of the VSC, since the controller used contains nonlinear elements of the “key” type and an object with a delay is considered, which prevents the use of analytical approaches for this problem. The necessary components of the gradient of the optimization criterion are calculated using sensitivity functions based on the operator method. The generated automatic parametric optimization (APO) algorithm made it possible to calculate the optimal VSC parameters for a given object based on the minimum value of the linear integral criterion in a series of runs of the APO algorithm. The reliability of the VSC tuning vector found by the APO algorithm and involved in the model of an automatic system for maintaining a given temperature in a tunnel kiln for firing bricks is confirmed by a computational technique.

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

For citation: Kulikov V.V., Kutsy N.N. Parametric optimization of a controller with variable structure using a linear integral criterion. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 2 (51):60-72. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-60-72.

Введение. Способ компенсации запаздывания, в выходном сигнале объекта на основе методов теории систем с переменной структурой заключается в применении в ПИ-регуляторе нелинейных элементов типа “ключ” для реализации переключения параметров в таком регуляторе [1, 3, 8]. Для исключения переключения структур РПС в установившемся режиме (например, из-за помех) необходимо вводить зону нечувствительности [1]. Использование в интегральном критерии параметрической оптимизации РПС функций без изменения их знака позволяет минимизировать колебательность и, как следствие, перерегулирование в автоматической системе.

Цель настоящей работы заключается в повышении грубости автоматической системы поддержания заданной температуры туннельной печи для обжига кирпича [11] путём решения задачи параметрической оптимизации регулятора с переменной структурой при использовании линейного интегрального критерия со штрафной функцией [6].

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

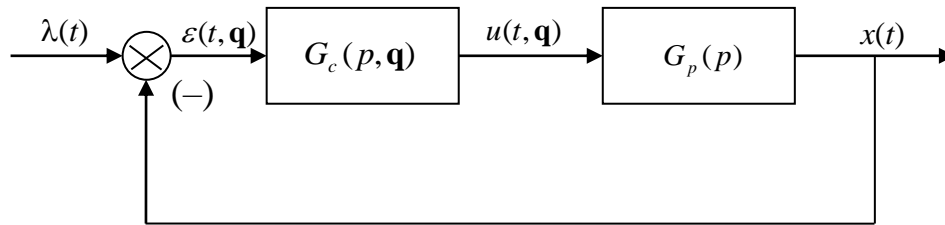


Рисунок 1 – Структурная схема автоматической системы

Figure 1 – Block diagram of an automatic system

Описание процессов в автоматической системе (рис. 1) при использовании РПС имеет следующий вид [1, 5, 9, 10]:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \mathbf{q}) &= \lambda(t) - x(t); \\ u(t, \mathbf{q}) &= G_c(p, \mathbf{q}^{(i)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), (i = 1, 2, 3); \\ u(t, \mathbf{q}) &= \begin{cases} u_1(t, \mathbf{q}) = G_c(p, \mathbf{q}^{(1)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^+; \\ u_2(t, \mathbf{q}) = G_c(p, \mathbf{q}^{(2)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^-; \\ u_3(t, \mathbf{q}) = G_c(p, \mathbf{q}^{(3)})\varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^0; \end{cases} \\ x(t) &= G_p(p)u(t, \mathbf{q}); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Psi^+ = ((\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q})) > 0) \vee (0 < t < t_{ob})) \wedge (|\varepsilon(t, \mathbf{q})| > \alpha\lambda(t));$$

$$\Psi^- = ((\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q})) < 0) \wedge (|\varepsilon(t, \mathbf{q})| > \alpha\lambda(t)));$$

$$\Psi^0 = |\varepsilon(t, \mathbf{q})| < \alpha\lambda(t);$$

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 $\Psi(t, \varepsilon(t, \mathbf{q}))$; $q_5 = 0, q_6 = 0$ – параметры не оптимизируются; α – зона нечувствительности регулятора; $\lambda(t)$ – 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; $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования; \wedge – операция логического умножения; \vee – операция логического сложения.

С помощью оператора объекта $G_p(p)$ моделируется процесс нагрева или охлаждения туннельной печи для обжига кирпича [11]:

$$G_p(p) = \frac{k_{ob}}{(T_{ob1} + T_{ob2})p^2 + T_{ob1}T_{ob2}p^2 + 1} e^{-\tau_{ob}p}, \quad (2)$$

где k_{ob} – статический коэффициент усиления; T_{ob1} , T_{ob2} – постоянные времени; τ_{ob} – время запаздывания.

Параметры объекта (2) [11]:

$$T_{ob1} = 5,2; T_{ob2} = 6,4; k_{ob} = 0,75; \tau_{ob} = 1,8. \quad (3)$$

Основные результаты. В качестве критерия оптимизации формируемого алгоритма АПО выбран линейный интегральный критерий со штрафной функцией для минимизации перерегулирования в автоматической системе (1), разработанный на основе подхода Широкова Л.А. из работы [4]:

$$I = \int_0^{\infty} (\varepsilon(t, \mathbf{q}) + y(t)) dt; \quad (4)$$

$$y(t) = \begin{cases} (u(t, \mathbf{q}) - \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}), & \text{при } u(t, \mathbf{q}) > \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \\ 0, & \text{при } u(t, \mathbf{q}) \leq \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \end{cases} \quad (5)$$

где $y(t)$ – штрафная функция. Отметим, что на этапе оптимизации в модели системы (1) ограничения на выходную координату РПС не используются.

Для реализации алгоритма на основе градиентной процедуры продифференцируем (4), (5) по настраиваемым параметрам \mathbf{q} РПС:

$$\frac{\partial I}{\partial q_i} = \int_0^{\infty} (-\xi_i(t) + \frac{\partial y(t)}{\partial q_i}) dt, \quad (i=1,2,\dots,4); \quad (6)$$

$$\frac{\partial y(t)}{\partial q_i} = \begin{cases} \frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_i}, & \text{при } u(t, \mathbf{q}) > \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \\ 0, & \text{при } u(t, \mathbf{q}) \leq \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \end{cases} \quad (7)$$

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

Составляющие градиента критерия оптимизации (4) определяются с помощью функций чувствительности на основе операторного метода [2, 7]. Приведем уравнения чувствительности для системы (1) при РПС [4]:

$$\xi_i(t) = G_p(p) \frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_i}, \quad (i=1,2,\dots,4); \quad (8)$$

Представим выражения для вычисления $\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}$, полученные в работе [4]:

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_1(t)) + \varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_1(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_1} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_1(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_2(t)) + \frac{1}{p} \varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_2(t)) + \frac{1}{p} 0(t), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_2} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_2(t)) + \frac{1}{p} 0(t), \Psi^0. \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_3(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_3(t)) + \varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_3} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_3(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\partial u(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = \begin{cases} \frac{\partial u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_4(t)) + \frac{1}{p} 0(t), \Psi^+; \\ \frac{\partial u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_4(t)) + \frac{1}{p} \varepsilon(t, \mathbf{q}), \Psi^-; \\ \frac{\partial u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_4} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_4(t)) + \frac{1}{p} 0(t), \Psi^0. \end{cases} \quad (12)$$

Для сформированного алгоритма АПО необходимо проверить вычисленные им значения настраиваемых параметров \mathbf{q}^* с точки зрения нахождения локального минимума критерия (4). Поэтому необходима матрица Гессе критерия (4), которую можно получить продифференцировав (4), (5) по настраиваемым параметрам \mathbf{q} РПС дважды:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial q_i \partial q_j} = \int_0^\infty (-\xi_{ij}(t) + \frac{\partial^2 y(t)}{\partial q_i \partial q_j}) dt, \quad (i, j = 1, 2, \dots, 4); \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 y(t)}{\partial q_i \partial q_j} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_i \partial q_j}, \text{ при } u(t, \mathbf{q}) > \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \\ 0, \text{ при } u(t, \mathbf{q}) \leq \frac{\lambda(t)}{k_{ob}}; \end{cases} \quad (14)$$

где $\xi_{ij}(t) (i, j = 1, 2, \dots, 4)$ – функции чувствительности второго порядка.

Представим выражения для расчёта $\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial^2 \mathbf{q}}$ матрицы Гессе [8]:

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_1} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_1} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{11}(t)) + (-\xi_1(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_1} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{11}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_1} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{11}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_2} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_2} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{12}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_1(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_2} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{12}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_2} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{12}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_3} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_3} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{13}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_3} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{13}(t)) - \xi_1(t), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_3} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{13}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_4} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_4} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{14}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_4} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{14}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_1(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_1 \partial q_4} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{14}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_1} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_1} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{21}(t)) + (-\xi_2(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_1} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{21}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_1} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{21}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_2} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_2} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{22}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_2(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_2} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{22}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_2} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{22}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_3} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_3} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{23}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_3} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{23}(t)) + (-\xi_2(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_3} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{23}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_4} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_4} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{24}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_4} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{24}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_2(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_2 \partial q_4} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{24}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_1} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_1} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{31}(t)) + (-\xi_3(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_1} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{31}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_1} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{31}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_2} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_2} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{32}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_3(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_2} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{32}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_2} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{32}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_3} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_3} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{33}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_3} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{33}(t)) + (-\xi_3(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_3} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{33}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_4} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_4} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{34}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_4} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{34}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_3(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_3 \partial q_4} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{34}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_1} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_1} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{41}(t)) + (-\xi_4(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_1} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{41}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_1} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{41}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_2} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_2} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{42}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_4(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_2} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{42}(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_2} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{42}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (28)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_3} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_3} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{43}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_3} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{43}(t)) + (-\xi_4(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial q_4 \partial q_3} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{43}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_4} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_1(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_4} = (q_1 + \frac{q_2}{p})(-\xi_{44}(t)), \Psi^+; \\ \frac{\partial^2 u_2(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_4} = (q_3 + \frac{q_4}{p})(-\xi_{44}(t)) + \frac{1}{p}(-\xi_4(t)), \Psi^-; \\ \frac{\partial^2 u_3(t, \mathbf{q})}{\partial^2 q_4} = (0 + \frac{0}{p})(-\xi_{44}(t)), \Psi^0. \end{cases} \quad (30)$$

При запуске алгоритма АПО для системы (1) получена матрица Гессе для начальных значений настраиваемых параметров РПС $\mathbf{q}^0 = (0,01; 0,01; 0,01; 0,01)$:

$$H(I) = \begin{bmatrix} 0,00000096 & 0,0002 & 0 & 0 \\ 0,0002 & 0,000041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

На основе полученных знаков угловых миноров (31) $\Delta_1 > 0, \Delta_2 < 0, \Delta_3 = 0, \Delta_4 = 0$ и значения определителя $\det H(I) = 0$ (31) можно сделать вывод о том, что аналитически исследовать сходимость критерия оптимизации (4) крайне сложно, поэтому в настоящей работе используется вычислительная методика [5].

Согласно вычислительной методике из работы [5] выполняется серия

запусков алгоритма АПО с различных начальных значений вектора настраиваемых параметров $\mathbf{q}_k^0 = (q_{1k}^0; q_{2k}^0; q_{3k}^0; q_{4k}^0) (k = 1, 2, \dots)$. Для реализации критерия (4) принципиально важно, чтобы начальные переходные процессы были с нулевым перерегулированием. Полученные соответствующие итоговые значения в оптимальной точке $\mathbf{q}_k^* = (q_{1k}^*; q_{2k}^*; q_{3k}^*; q_{4k}^*)$ должны обеспечивать выполнение необходимого условия экстремума:

$$\frac{\partial I(\varepsilon(t, \mathbf{q}^*))}{\partial \mathbf{q}} = 0 \pm c, \quad (32)$$

где c – погрешность вычисления.

Дополнительно для проверки на достоверность результатов работы сформированного алгоритма АПО, привлекается условие:

$$I(\mathbf{q}^*) \leq I(\mathbf{q}) \quad (33)$$

для всего возможного диапазона изменения настраиваемых параметров.

На основе выше сказанного в настоящей работе показателем работоспособности сформированного алгоритма АПО является выполнение условий (32), (33) для \mathbf{q}^* .

Далее представим проверку работоспособности алгоритма АПО на численных примерах при задающем воздействии $\lambda(t) = 1(t)$ и $\mathbf{q}_k^0 = (q_{1k}^0; q_{2k}^0; q_{3k}^0; q_{4k}^0) (k = 1, 2, 3)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1^0 &= (0,01; 0,01; 0,01; 0,01); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_1^0)) = 44,73. \\ \mathbf{q}_2^0 &= (0,02; 0,02; 0,02; 0,02); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_2^0)) = 39,81. \\ \mathbf{q}_3^0 &= (0,03; 0,03; 0,03; 0,03); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_3^0)) = 35,31. \end{aligned} \quad (34)$$

В результате работы алгоритма АПО получены следующие

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_k^* &= (q_{1k}^*; q_{2k}^*; q_{3k}^*; q_{4k}^*) (k = 1, 2, 3): \\ \mathbf{q}_1^* &= (0,39849; 0,19446; 0,75521; 0,08035); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_1^*)) = 15,08. \\ \mathbf{q}_2^* &= (0,31178; 0,18647; 0,76174; 0,08117); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_2^*)) = 15,25. \\ \mathbf{q}_3^* &= (0,37534; 0,19404; 0,75635; 0,07650); I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_3^*)) = 15,12. \end{aligned} \quad (35)$$

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

Для начальных запусков $\mathbf{q}_k^0 (k = 1, 2, 3)$ алгоритма АПО выполняется условие (33), что подтверждается значениями критерия $I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_k^0)) (k = 1, 2, 3)$ (34), $I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_k^*)) (k = 1, 2, 3)$ (35) и графиками изменения критерия I в ходе работы алгоритма АПО (рис. 2б).

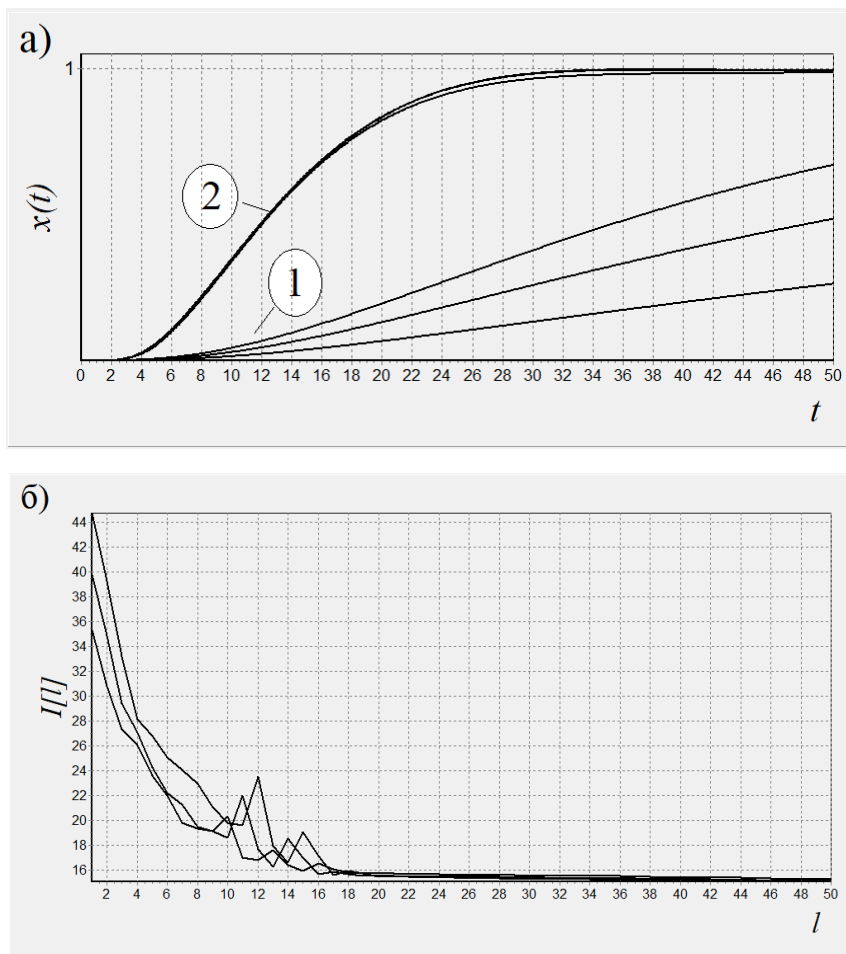


Рисунок 2 –Графики переходных процессов $x(t)$ в начальных (34) и конечных (35) точках работы алгоритма АПО (а) и значения критерия оптимизации $I[l]$ в ходе работы алгоритма АПО (б)

Figure 2 – Graphs of transients $x(t)$ at the initial (34) and final (35) points of the APO algorithm (a) and values of the optimization criterion $I[l]$ during the operation of the APO algorithm Block diagram of an automatic system (b)

Рисунок 3 показывает, что после запуска алгоритма АПО с различных начальных значений вектора настраиваемых параметров (34) соответствующие итоговые значения, полученные в оптимальной точке (35), обеспечивают выполнение необходимого условия экстремума (32) критерия (4) с допустимой для практики погрешностью:

$$-4 < \frac{\partial I(\varepsilon(t, \mathbf{q}_k^*))}{\partial \mathbf{q}_k} < 4. \quad (36)$$

Согласно рисунку 4 значения вектора настраиваемых параметров $\mathbf{q}_k[l]$ в ходе работы алгоритма АПО стремятся к одной области, что говорит о сходимости данного алгоритма.

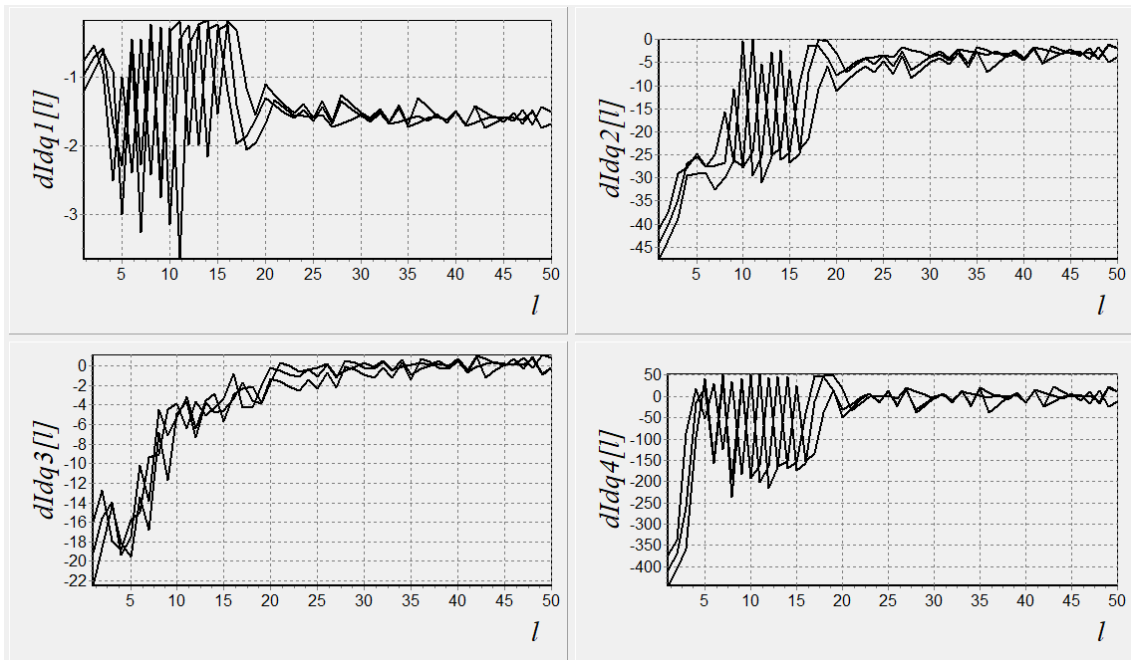


Рисунок 3 – Значения составляющих градиента $dI/dq_1[l]$, $dI/dq_2[l]$, $dI/dq_3[l]$, $dI/dq_4[l]$ критерия оптимизации (4) в ходе работы алгоритма АПО

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 (4) during the operation of the APO algorithm

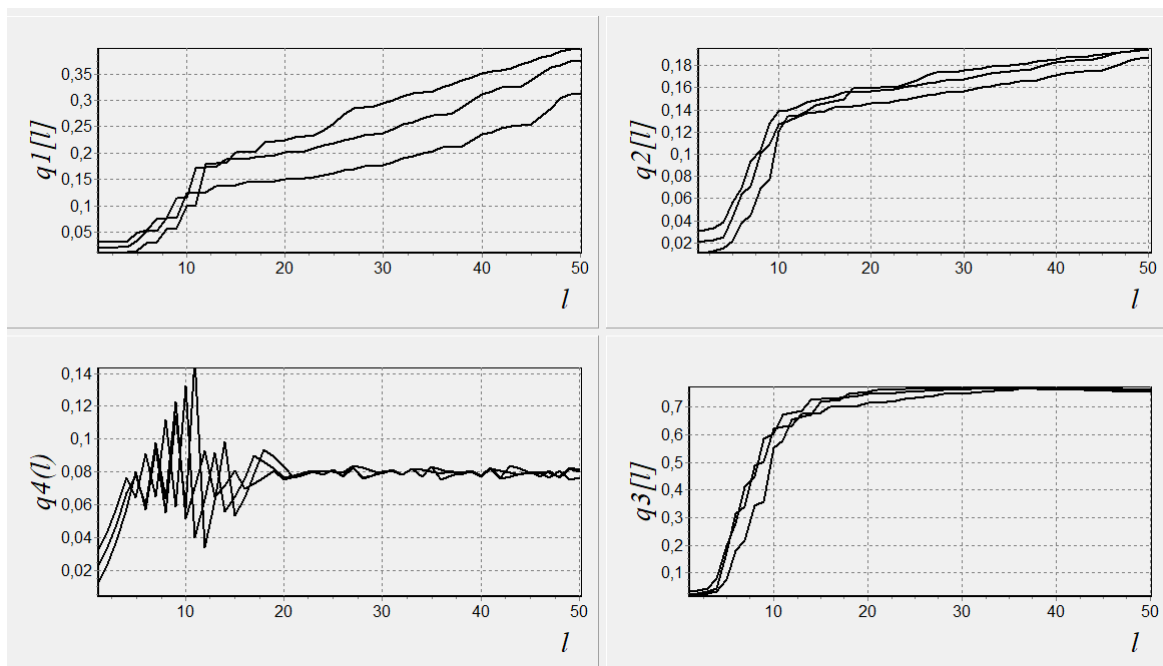


Рисунок 4 – Значения настраиваемых параметров регулятора $q_1[l]$, $q_2[l]$, $q_3[l]$, $q_4[l]$ в ходе работы алгоритма АПО

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

Выше представленные данные показывают выполнение критериев (32), (33), что говорит о нахождении сформированным алгоритмом АПО

оптимальных параметров регулятора (1) исходя из минимального значения критерия (4) на серии запусков алгоритма АПО, при параметрах объекта (3).

Выводы. В работе с помощью сформированного алгоритма на основе градиентной процедуры решена задача параметрической оптимизации пропорционально-интегрального регулятора с переменной структурой для объекта с запаздыванием при использовании линейного интегрального критерия со штрафной функцией для минимизации перерегулирования в модели автоматической системы поддержания температуры туннельной печи для обжига кирпича. Работоспособность сформированного алгоритма АПО подтверждена вычислительной методикой из работы [5].

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. Городецкий, В.И. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении / В.И. Городецкий, Ф.М. Захарин, Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – М: Энергоиздат, 1971. – 343 с.
3. Емельянов, С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой / С.В. Емельянов. – М: Наука, 1967. – 335 с.
4. Костюк, В.И. Автоматическая параметрическая оптимизация систем регулирования / В.И. Костюк, Л.А. Широков. – М: Энергоиздат, 1981. – 96 с.
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. Kulikov, V.V. et all. Formation of an algorithm of automatic parametric optimization of PI-controller with variable parameters while using Internal Model Control. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.
10. Kulikov, V.V. et all. The Gradient-Based Algorithm for Parametric Optimization of a Variable Structure PI Controller with Dead Band. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2020;21(9):530-534.
11. Tseligorov, N.A. et all. Investigation of the robust absolute stability of the tunnel kiln control system with delay WSEAS Transactions on Systems. 2021. T. 20. C. 25-30.

References

1. Govorov, A.A. Metody i sredstva postroyeniya regulyatorov s rasshirennymi funktsionalnymi vozmozhnostyami dlya nepreryvnykh tekhnologicheskikh protsessov [Methods and tools for constructing regulators with advanced functionality for continuous technological processes]. Moscow, 2002, 499 p.
2. Gorodetskiy, V.I. et all. Metody teorii chuvstvitelnosti v avtomaticheskom upravlenii [Methods of sensitivity theory in automatic control]. Moscow: Energoizdat, 1971, 343 p.
3. Emelianov, S.V. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy [Automatic control systems with variable structure]. Moscow: Nauka, 1967, 335 p.

4. Kostyuk, V.I., Shirokov L.A. Avtomaticheskaya parametricheskaya optimizatsiya sistem regulirovaniya [Automatic parametric optimization of control systems]. Moscow: Energoizdat, 1981, 96 p.

5. Kutsyy, N.N. Avtomaticheskaya parametricheskaya optimizatsiya diskretnykh sistem re-gulirovaniya [Automatic parametric optimization of discrete control systems]. Irkutsk, 1997, 382 p.

6. Polyak, B.T. Vvedeniye v optimizatsiyu [Introduction to optimization]. Moscow: LENAND, 2019, 392 p.

7. Rozenvasser, E.N., Yusupov, R.M. Chuvstvitelnost sistem upravleniya [Sensitivity of control systems]. Moscow: Nauka, 1981, 464 p.

8. Shigin, E.K. Avtomaticheskoye regulirovaniye obyekta s chistym zapazdyvaniyem regulyatorom s pereklyuchayemyimi parametrami II [Automatic control of an object with pure delay by a controller with switchable parameters II]. Avtomatika i telemekhanika, 1966, no. 6, pp. 72-81.

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: 20.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 28.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторах

Куликов Владимир Валерьевич – соискатель, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

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

Куцый 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: godefired@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 10.51215/2411-6483-2024-51-73-85

УДК 631.173

Научная статья

ВЕРИФИКАЦИЯ И ДОРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТОВ ОСЕВЫХ И РАДИАЛЬНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН

О.В. Репецкий

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

Аннотация. Данная работа посвящена верификации разработанных математических моделей и созданного программного обеспечения на тестовых моделях академических радиальных и осевых рабочих колес турбомашин, применяемых в АПК и в других отраслях промышленности. Проведен расчет собственных частот колебаний академической модели радиального колеса с 34-мя лопатками на основе двухмерных и трехмерных конечных элементов и оригинальных моделей стыковки. Выполнено сравнение точности расчета с экспериментом и данными других авторов. Определение динамических характеристик (собственных частот и форм колебаний) является важной научной задачей и позволяет решать проблему устранения явления резонанса, например, путём изменения формы деталей, а, следовательно, и повышения ресурса деталей турбомашин под действием различных факторов, таких как вращение, температура расстройка параметров и т.д. В настоящей работе дополнительно представлены результаты определения и верификации динамических академических рабочих колес осевых турбомашин. Получено, что результаты численных расчетов собственных частот колебаний исследуемых конструкций хорошо согласуются с экспериментальными данными и исследованиями других авторов, а также с аналитическими решениями. Дополнительно исследовано изменение связанности колебаний лопаток за счёт увеличения толщины диска рабочего колеса. Получено изменение, как форм колебаний, так и спектра собственных частот колебаний исходной конструкции. Значительное увеличение толщины диска приводит к локализации форм колебаний лопаток, как единичных конструкций. Данный вариант является одним из видов введения расстройки параметров и верификации исследования колебаний колес с неидентичными лопатками.

Ключевые слова: рабочие колеса, турбомашин, метод конечных элементов, математическое моделирование, программное обеспечение.

Для цитирования: Репецкий О.В. Верификация и доработка математических моделей и программного обеспечения на примере расчетов осевых и радиальных рабочих колес турбомашин. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2(51):73-85. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-73-85.

VERIFICATION AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS AND SOFTWARE USING THE EXAMPLE OF CALCULATIONS OF AXIAL AND RADIAL IMPELLERS OF TURBOMACHINES

Oleg V. Repetskii

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

Abstract. This work is devoted to the verification of the developed mathematical models and created software on test models of academic radial and axial impellers of turbomachines used in the agro-industrial complex and in other industries. The natural frequencies of oscillations of an academic model of a radial wheel with 34 blades were calculated based on two-dimensional and three-dimensional finite elements and original docking models. The calculation accuracy was compared with experiment and data from other authors. Determining dynamic characteristics (natural frequencies and vibration modes) is an important scientific problem and allows us to solve the problem of eliminating the phenomenon of resonance, for example, by changing the shape of parts, and therefore increasing the service life of turbomachinery parts under the influence of various factors, such as rotation, temperature, detuning of parameters, etc. This paper further presents the results of the determination and verification of dynamic academic impellers of axial turbomachines. It was found that the results of numerical calculations of the natural vibration frequencies of the structures under study are in good agreement with experimental data and studies of other authors, as well as with analytical solutions. Additionally, the change in the coupling of blade vibrations due to an increase in the thickness of the impeller disk was studied. A change in both the vibration modes and the spectrum of natural vibration frequencies of the original structure was obtained. A significant increase in the thickness of the disk leads to localization of the vibration modes of the blades as single structures. This option is one of the types of introducing parameter detuning and verification of the study of vibrations of wheels with non-identical blades.

Keywords: impellers, turbomachine, finite element method, mathematical modeling, software.

For citation: Repetskii O.V. Verification and development of mathematical models and software using the example of calculations of axial and radial impellers of turbomachines. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 2(51):73-85. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-73-85.

Введение. Исследования разных авторов показывают, что повреждение конструктивных частей роторов вызывает вибрацию всей конструкции и может привести к отрыву или разрушению одной лопатки или всего рабочего колеса, а, следовательно, и всего двигателя [1, 2, 8, 9, 10]. В свою очередь, вибрация связана с частотами собственных колебаний отдельных элементов конструкций. Кроме этого, при проектировании радиальных и осевых лопаточных дисков, применяемых в промышленности, проводится множество численных и экспериментальных испытаний, в том числе на специализированных стендах. Данные испытания являются дорогостоящими и требуют больших усилий и времени. В этой связи компьютерное моделирование для изучения частот собственных колебаний

рабочих колес необходимо проводить на этапах проектирования, изготовления и доводки, чтобы сравнить точность численного расчета с экспериментом и выполнить верификацию и доработку, при необходимости, математических моделей и созданного или применяемого программного обеспечения [3, 4, 5, 6, 7, 11]. Проверенные и эффективные математические модели на академических изделиях могут быть направлены на изучение других уже реальных объектов машиностроения и значительно сократить затраты на их производство.

Для верификации разработанных математических моделей и созданного программного обеспечения рассмотрено модельное радиальное колесо из работы [2] с 34-мя прямоугольными лопатками, для которого имеются экспериментальные и расчетные данные, основанные на двухмерных и трехмерных конечных элементах и двумерно-трехмерной модели стыковки с использованием алгоритма статической конденсации в динамических задачах на основе пакета программ BLADIS+ [2]. Другим примером верификации и унифицирования является исследование осевого рабочего академического колеса с 16-ю лопатками, для которого имелись численные и экспериментальные данные из работы [9].

Математическое моделирование и верификация расчетов. Метод конечных элементов (МКЭ) является эффективным численным методом для решения инженерных и физических задач. С его помощью рассматривается движение жидкости по трубам, исследуются потоки газов, решаются задачи электростатики и смазки, анализируются колебания систем и др. [1, 2]. Метод конечных элементов прост в использовании и имеет достаточно общий алгоритм, позволяющий быстро выполнять расчеты различных вариантов сложных конструкций. В данной работе МКЭ используется для решения задачи тестирования статики и колебаний пластин и академических радиальных рабочих колес турбомашин с целью верификации математических моделей и программ и их применения для анализа реальных промышленных конструкций, в том числе в АПК.

Уравнения движения с использованием МКЭ для статики и колебаний могут быть представлены в следующем виде [1, 8, 9, 10]:

$$(K_E + K_G + K_R)\delta = F_\Omega + F_T + F_G, \quad (1)$$

где δ – вектор перемещений, K_E – матрицы жесткости, K_G – матрица геометрической жесткости, зависящая от скорости и температуры, K_R – дополнительная матрица жесткости, возникающая в результате вращения или матрица псевдомасс, F_Ω, F_T, F_G – векторы, соответствующие силам вращения, температуры и давления газа или пара соответственно.

В случае свободных колебаний:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + (K_E + K_G + K_R)\delta = 0, \quad (2)$$

где M – матрица массы, C – матрица демпфирования.

Метод статической конденсации (МСК), также известный как редукция Гайана используется в вычислительной механике как метод уменьшения размерности. В настоящей работе он применен для математической модели стыковки двух- и трехмерных конечных элементов в КЭМ радиального рабочего колеса. Суть метода заключается в уменьшении количества степеней свободы при игнорировании инерционных членов уравнений равновесия и выражении ненагруженных степеней свободы в терминах нагруженных степеней свободы [10].

Опишем концепцию данного метода более подробно. Уравнение статического равновесия для одного конечного элемента можно записать в виде:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

здесь K_{ij} – блоки матрицы жесткости, δ_i и F_i – перемещения и вектор нагрузок, причем $i, j = 1, 2$; 1 – описывает “внешние”, участвующие в вычислениях, 2 – “внутренние”, не участвующие в вычислениях степени свободы. Для решения уравнения (3) используются соотношения, детально описанные в работе [8].

Уравнение движения в случае свободных колебаний без демпфирования МСК примет вид:

$$(K^* - \omega^2 M^*) \delta_1 = 0, \quad (4)$$

где

$$M^* = T^{*T} M T^*, \quad (5)$$

а

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Здесь T - переходная матрица, а M^* и K^* - матрицы масс и жесткости после конденсации [10].

В качестве первого объекта исследования для верификации математических моделей и программ рассмотрено радиальное колесо с 34-мя лопатками. Основные механические характеристики академического модельного колеса: материал – сталь 3, модуль Юнга – $2.1 \cdot 10^5$ МПа, плотность – 8060 кг/м^3 , коэффициент Пуассона – 0.3. Геометрические характеристики модельного колеса: внешний радиус диска – 0.3045 м, радиус внутренний – 0,06 м, радиус лопаток – 0.2915 м, толщина лопатки – 0.003 м, число лопаток – 34. Модельное рабочее колесо имеет относительно тонкие лопатки и массивный диск (рис. 1). Конечноэлементная модель стыковки на основе двух и трехмерных КЭ рабочего колеса представлена на рис. 2 [2].

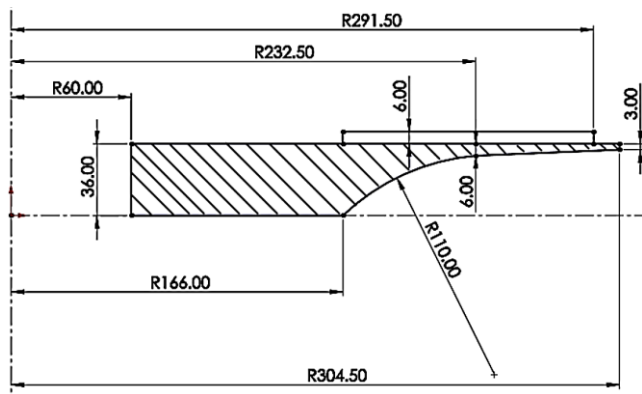


Рисунок 1 – Чертеж модельного колеса с 34-мя лопатками (мм)

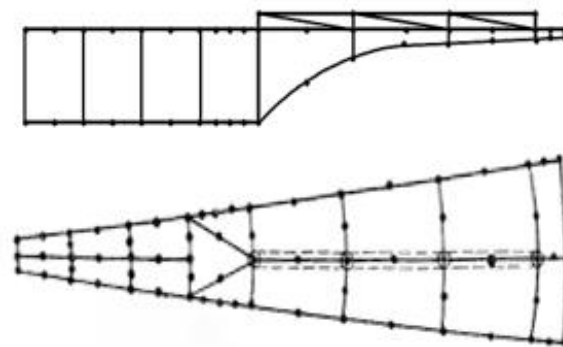


Рисунок 2 – Конечноэлементная модель стыковки рабочего колеса

Figure 1 – Drawing of a model wheel with 34 blades (mm)

Figure 2 – Finite element model of impeller docking

Трехмерная конечноэлементная модель рабочего колеса, сгенерированная с помощью программы SolidWorks, представлена в программе ANSYS на рисунке 3.

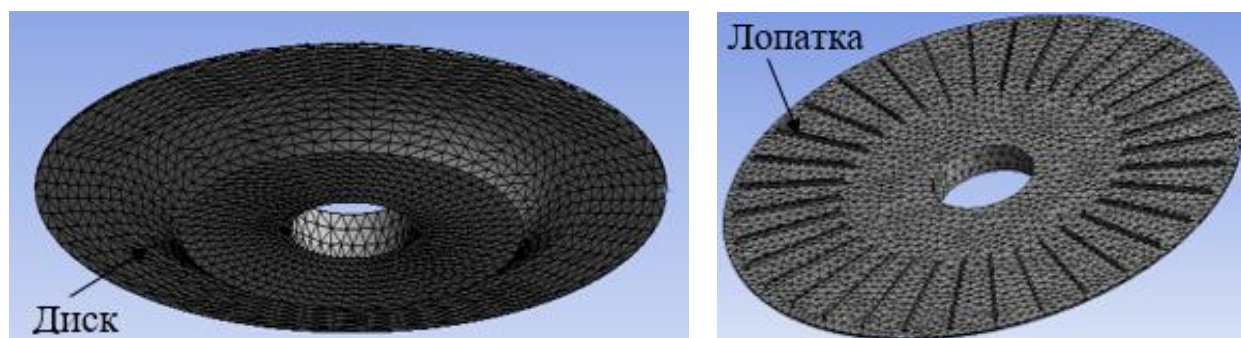


Рисунок 3 – Трехмерная конечноэлементная модель рабочего колеса в ANSYS

Figure 3 – 3D finite element model of impeller in ANSYS

Согласно данным таблицы 1, следует отметить, что двухмерная модель для академического рабочего колеса дает большую погрешность. Для модели стыковки форма колебаний с 3-мя узловыми диаметрами имеет наибольшее расхождение по частоте (программа VLADIS+). Для трехмерной модели (КЭ TET10) в программе ANSYS значения собственных частот колебаний приблизительно согласуются с экспериментом, что подтверждает достаточную точность предложенных конечно-элементных подходов.

В данной работе проведены расчеты тестовых моделей пластин и академического радиального колеса с 34-мя лопатками, чтобы сравнить точность созданных математических моделей и программ с экспериментом и известными решениями. В настоящей публикации также приводится

сравнение численных результатов автора с экспериментом и известными расчетами в программах BLADIS+ и ANSYS. Достаточная точность предлагаемых математических моделей и программного обеспечения позволила распространить их на численное исследование прочностных характеристик реальных промышленных конструкций. Данный подход направлен на проектирование новых турбомашин, применяемых в АПК, а также на правильную оценку и увеличение ресурса уже работающих конструкций радиальных роторов турбомашин.

Таблица 1 – Численные результаты расчета собственных частот колебаний (Гц) открытого колеса турбины на основе двух и трехмерных КЭ

Table 1 – Numerical results of calculating the natural frequencies of oscillations (Hz) of an open turbine wheel based on two and three-dimensional FE

Форма n/m	Двухмерная КЭМ (STIO18) BLADIS+	Трехмерная КЭМ (TET10) ANSYS	Трехмерная КЭМ (IQT48) BLADIS+	Модель стыковки BLADIS+	Эксперимент
2/0	1117	834.84	806	1120	-
3/0	1263	984.55	999	1141	958
4/0	1423	1117.4	1153	1171	1095
5/0	1550	1282.4	1270	1218	1199

На втором этапе верификации выполнено изучение собственных колебаний и процесса искажения собственных частот и форм свободных колебаний осевого рабочего колеса с нарушением циклической симметрии при уменьшении связи колебаний лопаток (за счет увеличения толщины диска) вплоть до ее полного исчезновения. В качестве объекта исследования рассмотрено модельное рабочее колесо с 16-ю лопатками [2]. Рабочее колесо изготовлено из нержавеющей стали: модуль Юнга – $1.93 \cdot 10^5$ МПа, плотность – 8000 кг/м^3 , коэффициент Пуассона – 0.29. Общий вид рабочего колеса представлен на рис. 4а. Диаметр колеса – 300 мм, толщина диска – 7 мм, толщина лопаток – 4 мм. На рисунке 4б показана сетка конечных элементов, построенная на базе Ansys Workbench с 46001 трехмерными конечными элементами.

При изучении характеристик свободных колебаний колеса предполагается, что колесо имеет неподвижную опору в центре. На рисунке 5 представлена частотная диаграмма академического рабочего колеса. Синими треугольниками отмечены численные результаты на Ansys Workbench. А красная линия показывает экспериментальные результаты, приведенные авторами работы [2]. Из представленных данных видно, что численные результаты с использованием предложенного конечного элемента и программного обеспечения дают результаты, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

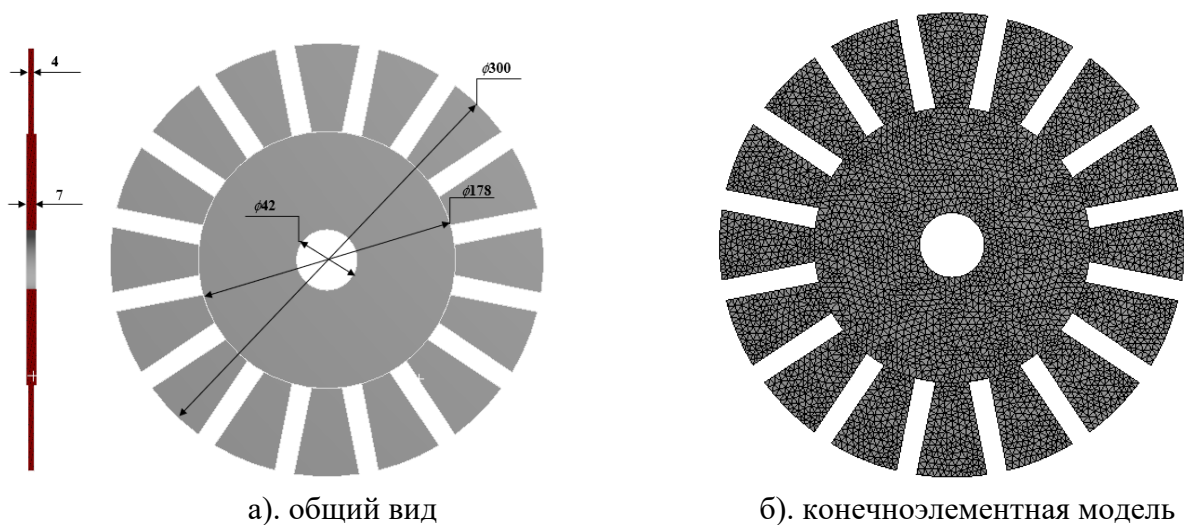


Рисунок 4 – Рабочее колесо компрессора с 16-ю лопатками

Figure 4 – Compressor impeller with 16 blades

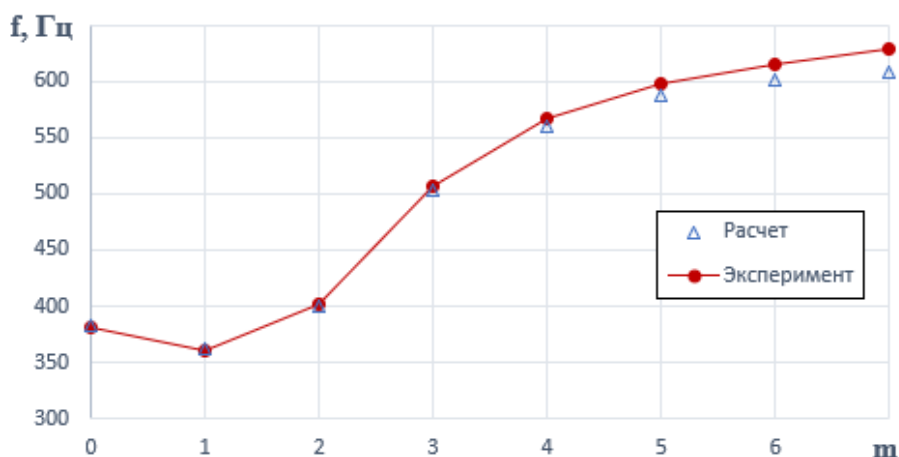


Рисунок 5 – Спектр собственных частот колебаний исследуемой конструкции (m – количество узловых диаметров)

Figure 5 – Spectrum of natural vibration frequencies of the structure under study (m – number of nodal diameters)

В таблице 2 представлены частоты собственных колебаний лопаток по 1-й изгибной форме при жёстком закреплении по всей поверхности диска. Из полученных результатов видно, что собственные частоты колебаний практически одинаковы для всех лопаток, то есть лопатки колеблются без взаимосвязи через диск.

Для исследования изменения связанности колебаний лопаток в модельном колесе увеличиваются толщины диска. Процессы искажения собственных форм модельного колеса показаны на рисунках 6 и 7, где N –

номер лопаток, а q_z – нормированное смещение на их периферии. Линия 1 на них указывает на начальную форму колебаний, имеющую вид периодической симметричной функции. Линии 2, 3 и 4 указывают различные стадии искажения формы колебаний рабочего колеса при увеличении толщины диска ($h=7-140$ мм) до возникновения полной локализации.

Таблица 2 – Собственные частоты колебаний лопаток (f) модельного рабочего колеса

Table 2 – Natural vibration frequencies of the blades (f) of the model impeller

Номер лопатки	1	2	3	4	5	6	7	8
f, Гц (расчет)	680.39	680.7	680.74	680.81	680.84	680.88	680.93	680.93
f, Гц (эксперимент)	675	670	684	663	676	688	687	684
Номер лопатки	9	10	11	12	13	14	15	16
f, Гц (расчет)	681.12	681.2	681.35	681.64	681.67	681.7	681.94	682.05
f, Гц (эксперимент)	684	675	670	679	686	687	684	673

При увеличении толщины модельного диска меняется не только форма колебаний, но и собственные частоты. В таблице 3 представлены собственные частоты колебаний исходной конструкции диска. При толщине диска рабочего колеса $h = 7$ мм, собственные частоты колебаний увеличиваются с ростом количества узловых диаметров. При увеличении толщины диска ($h = 140$ мм) собственные частоты колебаний практически одинаковы для всех узловых диаметров, а связанность колебаний между лопатками исчезает (табл. 4).

В вышеприведенной части исследования представлено изменение формы и частот собственных колебаний академического колеса с 16-ю лопатками при изменении толщины диска. При увеличении толщины диска наблюдается процесс искажения форм колебаний до наступления полной локализации форм рабочих лопаток при существенном увеличении амплитуды колебаний (табл. 4).

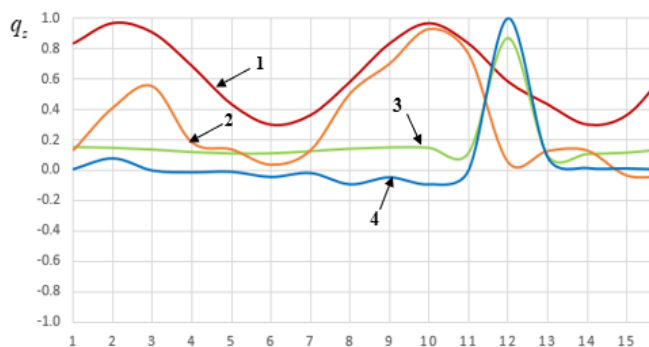


Рисунок 6 – Изменение амплитуд колебаний с $m=0$ при утолщении диска: 1) $h = 7$ мм; 2) $h = 14$ мм; 3) $h = 70$ мм; 4) $h = 140$ мм

Figure 6 – Change in vibration amplitudes from $m=0$ with thickening of the disk: 1) $h = 7$ mm; 2) $h = 14$ mm; 3) $h = 70$ mm; 4) $h = 140$ mm

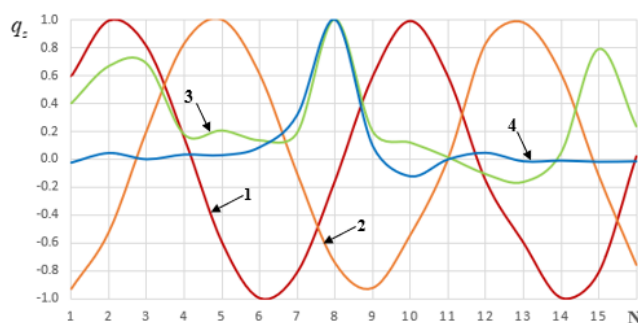


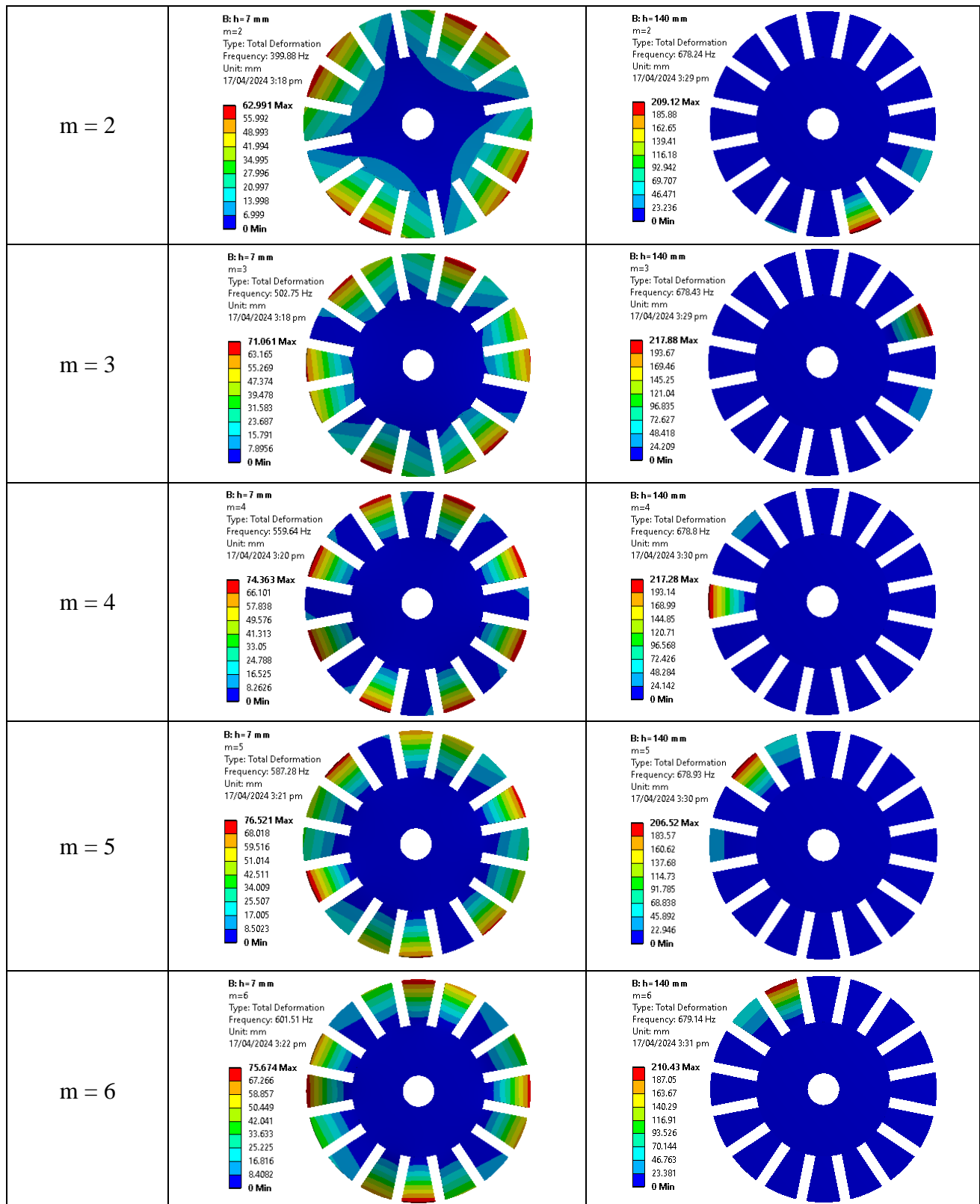
Рисунок 7 – Изменение амплитуд колебаний с $m=2$ при утолщении диска: 1) $h = 7$ мм; 2) $h = 14$ мм; 3) $h = 70$ мм; 4) $h = 140$ мм

Figure 7 – Change in vibration amplitudes from $m=2$ with thickening of the disk: 1) $h = 7$ mm; 2) $h = 14$ mm; 3) $h = 70$ mm; 4) $h = 140$ mm

Таблица 4 – Формы колебаний модельного рабочего колеса при варьировании толщины диска (от $h = 7$ мм до $h = 140$ мм)

Table 4 – Vibration forms of the model impeller when varying disc thickness (from $h = 7$ mm to $h = 140$ mm)

Количество узловых диаметров	$h = 7$ мм	$h = 140$ мм
$m = 0$	<p>B: $h = 7$ mm $m=0$ Type: Total Deformation Frequency: 382.28 Hz Unit: mm 17/04/2024 3:16 pm</p> <p>44.623 Max 39.665 34.707 29.749 24.79 19.832 14.874 9.9162 4.9581 0 Min</p>	<p>B: $h = 140$ mm $m=0$ Type: Total Deformation Frequency: 678.01 Hz Unit: mm 17/04/2024 3:28 pm</p> <p>161.36 Max 143.43 125.51 107.58 89.647 71.717 53.788 35.859 17.929 0 Min</p>
$m = 1$	<p>B: $h = 7$ mm $m=1$ Type: Total Deformation Frequency: 362.6 Hz Unit: mm 17/04/2024 3:17 pm</p> <p>61.472 Max 54.642 47.812 40.981 34.151 27.321 20.491 13.66 6.8302 0 Min</p>	<p>B: $h = 140$ mm $m=1$ Type: Total Deformation Frequency: 678.07 Hz Unit: mm 17/04/2024 3:28 pm</p> <p>196.98 Max 175.1 153.21 131.32 109.44 87.549 65.662 43.774 21.887 0 Min</p>



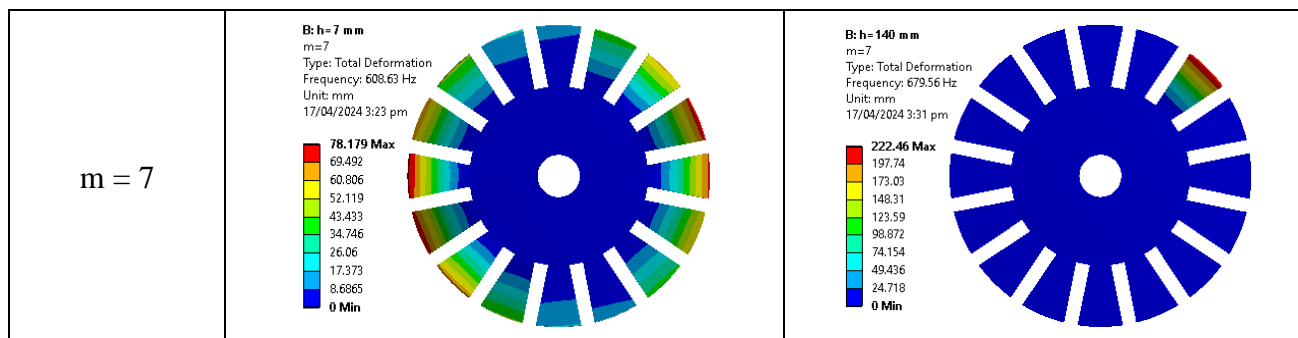


Таблица 5 – Изменение спектра собственных частот колебаний конструкции

Table 5 – Changing the spectrum of natural vibration frequencies of the structure

Количество узловых диаметров	Частота (Гц)			
	h = 7 мм	h = 14 мм	h = 70 мм	h = 140 мм
m = 0	382.28	600.9	677.1	678.07
m = 1	362.6	588.47	676.73	678.01
m = 2	399.88	604.01	677.22	678.24
m = 3	502.75	636.62	677.51	678.43
m = 4	559.64	648.54	677.77	678.8
m = 5	587.28	653.66	678.12	678.93
m = 6	601.51	656.06	678.34	679.14
m = 7	608.63	657.36	678.52	679.56

Заключение. Проведённые исследования для верификации результатов математического моделирования позволяют сделать заключение о том, что возможно с высокой точностью использовать численное решение в ANSYS Workbench на основе МКЭ для определения динамических характеристик колебаний деталей турбомашин. Также представлены результаты исследования и верификации на двух конструкциях осевого и радиального академических рабочих колес. Полученные спектры собственных частот колебаний конструкций с различными формами колебаний совпадают с экспериментальными данными. Результаты данного численного исследования могут быть распространены на процесс анализа прочностных характеристик реальных лопаток компрессоров и турбин на этапе проектирования и доводки новых промышленных конструкций для увеличения ресурса реальных рабочих колес турбомашин или продления их ресурса на стадии эксплуатации.

Благодарность. Данная работа выполнена в рамках гранта РФФ № 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”. Автор благодарит РФФ за поддержку настоящих исследований.

Список литературы

1. Еловенко, Д.А. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, О.В. Репецкий, Д.В. Татаринов // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD (Байкальский государственный университет экономики и права). – 2010. – № 1. – С. 11-19.
2. Ермаков, А.И. Влияние связанности колебаний на собственные формы рабочего колеса с неидентичными лопатками / А.И. Ермаков, А.В. Урлапкин, Д.Г. Федорченко // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014 – № 5. – С. 76-81.
3. Beirow, B. et all. Effect of mistuning and damping on the forced response of a compressor blisk rotor // Proceedings of ASME Turbo Expo. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 2015, vol. 7B, GT2015-42036, 12p.
4. Castanier, M.P., Pierre, C. Using intentional mistuning in the design of turbomachinery rotors // AIAA J, 2002, no. 10 (40), pp. 2077-2086.
5. Feiner, D.M., Griffin, J.H. A fundamental model of mistuning for a single family of modes // Journal of Turbomachinery. 2002, vol. 124, pp. 597-605.
6. Figaschewsky, F., Kühhorn, A. Analysis of mistuned blade vibrations based on normally distributed blade individual natural frequencies // ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. 2015, vol. 7B, GT2015-43121, 13p.
7. Kaneko, Y. Study on vibration characteristics of single crystal blade and directionally solidified blade. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, vol. 6, pp. 931-940.
8. Repetckii O. Et all. Investigation of mistuning impact on vibration of rotor bladed disks // Journal of Physics: Conference Series. 2018, 012097 p.
9. Repetskiy, O., Ryjikov, I. Modeling and simulation of dynamic processes with the help of program package BLADIS+// Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering. 2008, vol. 920, pp. 219-20.
10. Repetsky, O.V. et all. Investigation of vibration and fatigue life of mistuned bladed disks // Proceedings of the international conference actual issues of mechanical engineering 2017(AIME 2017), 2017, pp. 702-707.
11. Yuan, J. et all. Reduced order method based on an adaptive formulation and its application to fan blade system with dovetail joints // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2020, – GT2020-14227, p. V011T30A004.

References

1. Yelovenko, D.A. et all. Eksperimental'noye issledovaniye modeli avtoklava dlya gidrotermal'nogo sinteza mineralov [Experimental study of an autoclave model for hydrothermal synthesis of minerals]. Vestnik Baykal'skogo soyuza stipendiatov DAAD (Baykal'skiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i prava), 2010, no. 1, pp. 11-19.
2. Yermakov, A.I. et all. Vliyaniye svyazannosti kolebaniy na sobstvennyye formy rabocheho kolesa s neidentichnymi lopatkami [The influence of vibration coupling on the natural shapes of an impeller with non-identical blades]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2014, no. 5, pp. 76-81.

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: 06.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 07.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторе

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, п. Молодежный, e-mail: repetckii@igsha.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>.

Information about author

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

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, e-mail: repetckii@igsha.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>.



DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-86-94

УДК 330.4

Научная статья

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАДРОВЫХ УГРОЗ

П.А. Туктарова

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

Аннотация. Эффективность кадровой политики предприятий может быть крайне низкой, что создает угрозы и негативное влияние на ее процессы. Тем самым, организация сталкивается с ситуацией, при которой у нее может быть нехватка квалифицированных трудовых ресурсов. Как итог, нарушается кадровая безопасность предприятия, а вместе с ней и общая экономическая безопасность и устойчивость производственной деятельности.

Использование регрессионного анализа для определения угроз кадровой безопасности удобно тем, что предприятия сами могут подбирать набор показателей, которые имеют важность для данного предприятия в зависимости от его размера, формы собственности и других причин.

Своевременная оценка кадровых рисков, психологической надежности работника в процессе отбора, подбора, увольнения способствует обеспечению безопасности организации, а также эффективному и качественному выполнению работником профессиональных функций в соответствии с установленным должностным регламентом. Как итог, нарушается кадровая безопасность предприятия, а вместе с ней и общая экономическая безопасность и устойчивость производственной деятельности.

В статье приведена модель определения уровня кадровой безопасности предприятия с целью выявления угроз. Экспертным путем выбраны факторы, влияющие на кадровую безопасность, и определен результирующий признак “количество нарушений”. С помощью корреляционно-регрессионного анализа построено уравнение регрессии для моделирования результирующего показателя в зависимости от выбранных факторов. Проведено моделирование с критическими значениями факторов с целью определения оптимальных подбора персонала.

Данная модель подходит для предприятий промышленного комплекса. Выделенные факторы носят рекомендательный характер и могут быть изменены для других предприятий.

Ключевые слова: кадровая безопасность, корреляционно-регрессионный анализ, безопасность предприятия, кадровые показатели.

Для цитирования: Туктарова П.А. Использование регрессионного анализа для моделирования кадровых угроз. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2024; 2 (51):86-94. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-86-94.

USING REGRESSION ANALYSIS TO MODEL PERSONNEL THREATS

Polina A. Tuktarova

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

Abstract. The effectiveness of enterprise personnel policies can be extremely low, which creates threats and a negative impact on its processes. Thus, the organization is faced with a situation in which it may have a shortage of qualified labor resources. As a result, the personnel security of the enterprise is violated, and with it the overall economic security and sustainability of production activities.

The use of regression analysis to identify threats to personnel security is convenient because enterprises themselves can select a set of indicators that are important for a given enterprise depending on its size, form of ownership and other reasons.

Timely assessment of personnel risks, the psychological reliability of an employee in the process of selection, selection, dismissal helps to ensure the safety of the organization, as well as the effective and high-quality performance of professional functions by the employee in accordance with the established job regulations. As a result, the personnel security of the enterprise is violated, and with it the overall economic security and sustainability of production activities.

The article provides a model for determining the level of personnel security of an enterprise in order to identify threats. Factors influencing personnel security were selected by expert means, and the resulting indicator “number of violations” was determined. Using correlation and regression analysis, a regression equation was constructed to model the performance indicator depending on the selected factors. Modeling was carried out with critical values of factors in order to determine optimal personnel selection.

This model is suitable for industrial enterprises. The selected factors are advisory in nature and can be changed for other enterprises.

Keywords: personnel security, correlation and regression analysis, enterprise security, personnel indicators.

For citation: Tuktarova P.A. Using regression analysis to model personnel threats. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2024; 2 (51):86-94. DOI 10.51215/2411-6483-2024-51-86-94.

Введение. Персонал является основным источником риска для предприятия [1, 6, 9, 11]. Как показывает статистика, свыше 75 % правонарушений в рамках отдельных предприятий совершаются их сотрудниками. При этом большинство из них обнаруживаются случайно. Поэтому обеспечение кадровой безопасности является одной из главных задач, стоящих перед руководством любого предприятия.

Кадровая безопасность заключается в предотвращении негативного воздействия на бизнес-процессы человеческого фактора (халатности, ошибок на производстве, хищений, и т.д.). Риски, связанные с персоналом, могут быть, как преднамеренными, так и неумышленными. Зачастую, возникновение неумышленных рисков происходит вследствие

некачественной работы персонала, ошибок на производстве, что может повлечь за собой крупные убытки для предприятия [2, 3, 5].

Кадровый риск – ситуация, отражающая опасность нежелательного развития событий, которые напрямую или косвенно затрагивают функционирование и развитие организации, персонала, общества в целом и наступление которых связано с объективно существующей неопределенностью, обусловленной рядом причин: неэффективностью системы управления персоналом; поведением, действием (бездействием) персонала и внешней средой организации.

Цель работы – определение оптимального набора показателей для оценки кадровых угроз на примере промышленного предприятия.

Материалы и методы. При решении задачи кадровой безопасности использованы методы множественного корреляционно-регрессионного анализа [8] для определения наиболее важных факторов, влияющих на угрозы кадровой безопасности. Данные получены на основе метода экспертных оценок для предприятия АО “Нефтеавтоматика” Республика Башкортостан. В качестве результативного признака принят показатель ошибок, характеризующий количество нарушений кадровой безопасности на предприятии, а за факторы размер заработной платы, уровень квалификации персонала, условия труда, качество труда, стаж работы, удовлетворенность персонала работой.

Результаты исследований, приведенные в данной работе, позволят предприятиям моделировать состояние кадровой безопасности и выделять наиболее важные факторы определения угроз.

При этом наличие значимых факторных связей позволяет моделировать различные значения результативного признака на основе генерации факторов с использованием метода Монте-Карло. Подобные алгоритмы моделирования климатических и производственно-экономических показателей приведены в работах [4, 7, 10].

Основные результаты. Для повышения эффективности деятельности предприятия необходимо проводить анализ причин возникновения тех или иных угроз, связанных с работой персонала. Основными факторами, влияющими на риски, могут послужить недостаточный уровень квалификации персонала, неудовлетворенность условиями работы и т.п. В данной работе проводится моделирование зависимости показателя качества труда, который характеризуется безошибочной работой персонала, от различных показателей. Использование регрессионного анализа для определения угроз кадровой безопасности позволит моделировать данные для выявления негативных явлений и принимать меры для предварительного их устранения.

Проведем расчеты по тестовым данным для предприятия АО “Нефтеавтоматика”. Существует множество показателей, влияющих на кадровую безопасность предприятия. Включение в модель слишком

большого числа факторов может негативно сказаться на результате моделирования. Проведя анализ различных групп факторов, принято решение о включении в модель шести факторов, которые в большей степени отражают уровень угроз кадровой безопасности предприятия и о которых имеются данные на предприятии. На основе экспертных оценок выявлены показатели, в наибольшей степени влияющие на кадровую безопасность: y – показатель ошибок, характеризующий количество нарушений кадровой безопасности на предприятии, x_1 – размер заработной платы, x_2 – уровень квалификации персонала, x_3 – условия труда, x_4 – качество труда, x_5 – стаж работы, x_6 – удовлетворенность персонала работой.

Так как необходимо оценить взаимосвязь между одним результативным показателем y и несколькими факторами x_m , то это задача связана с построением множественной регрессионной модели.

Несколько показателей будут оцениваться по 10 – балльной шкале:

1) уровень квалификации персонала:

– 1-5 баллов – наличие среднего или средне профессионального образования, свидетельства о повышении квалификации;

– 6-8 баллов – наличие у работников высшего образования, а также свидетельства о повышении квалификации;

– 9-10 баллов – наличие второго высшего образования и более;

2) условия труда:

– 1-3 балла – наличие вредный фактор в условия работы;

– 4-6 баллов – наличие опасного производственного фактора в условия работы (присутствует риск производственной травмы);

– 7-10 баллов – безопасные условия труда (на работающего сотрудника не воздействуют ни опасные, вредные факторы, либо их воздействие минимально и не выходит за рамки установленных законодателем нормативов);

3) качество труда:

– 1-4 балла – удовлетворительное качество выполнения работы;

– 5-7 баллов – среднее качество выполнения работы;

– 8-10 баллов – высокое качество выполнения работы;

4) удовлетворенность персонала работой:

– 1-4 балла – удовлетворительное качество, имеются претензии;

– 5-7 баллов – среднее качество выполнения работы, имеются пожелания;

– 8-9 баллов – высокое качество, все устраивает.

Прежде всего, исследование необходимо начать с изучения степени влияния каждого показателя на качество труда и проверить мультиколлинеарность между факторами. На основе корреляционно-регрессионного анализа, определяется многофакторная зависимость:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m, \quad (1)$$

где y – результативный признак; x_i – значения факторов в анализируемом периоде., b_i – коэффициенты аналитического выражения, a – свободный член. При этом $i \in I$.

Приведем исходные данные задачи в таблице.

Следующим этапом анализа является оценка корреляционной взаимосвязи шести факторов на основе построения матрицы мультиколлинеарности.

Таблица – Исходные данные для построения регрессионной модели по данным АО “Нефтеавтоматика”

Table – Initial data for building a regression model based on Nefteavtomatika

№	Количество нарушений, балл y	Заработная плата, x_1 , тыс. руб.	Уровень квалификации персонала, x_2 , балл	Условия труда, x_3 ,	Качество труда, x_4 , балл	Стаж работы, x_5 , лет	Удовлетворенность персонала работой, x_6 , балл
1	3	2050	6	5	7	20	4
2	4	2080	8	4	8	25	5
3	4	2100	9	5	7	11	4
4	2	2080	6	6	9	30	2
5	2	2112	3	6	6	32	2
6	4	2050	5	4	5	34	4
7	5	2080	6	3	8	8	5
8	0	2100	8	7	9	38	4
9	2	2080	7	2	6	40	2
10	3	2112	8	8	9	41	3
11	4	2010	5	3	7	14	4
12	2	2080	9	4	8	44	1
13	4	2015	8	6	5	45	4
14	5	2100	9	6	6	18	5
15	2	2112	5	6	9	48	1
16	3	2050	7	6	8	20	3
17	2	2080	7	7	7	47	2
18	4	2650	6	6	8	14	2
19	4	2080	10	6	5	41	4
20	8	2700	9	8	4	15	2
21	5	2620	8	4	4	45	5
22	6	2580	7	5	5	20	8
23	5	2400	8	7	5	48	5
24	3	2320	6	8	6	41	4
25	5	2200	5	9	5	47	6

Необходимо исключить факторы, которые обладают наибольшими показателями коэффициентов парной корреляции (по модулю). Исходя из полученных результатов, связи в виде коэффициента корреляции между большинством переменными являются удовлетворительными, т.к. не превышают критерий 0.75. В то же время связь между факторами x_3 и x_6 является не допустимой. Таким образом, принимается решение о необходимости исключения одного из факторов пары x_3 и x_6 из модели с целью повышения качества дальнейшего исследования. Поскольку связь x_6 с прочими факторами исследования сильнее, чем аналогичная связь фактора x_3 , из модели исключен фактор x_6 .

Анализируя регрессионную статистику без исключенного фактора, заключаем, что согласно коэффициенту множественной корреляции (R) имеет место достаточно высокая степень тесноты связи между факторами и результативным признаком ($0.86 > 0.75$). Поэтому модель считается точной [8], а по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0.05$ – значимой. При этом значимыми являются коэффициенты b_i по t -критерию Стьюдента.

На основании значимости выражения и его коэффициентов исключены дополнительно не значимые факторы. В результате получено следующее регрессионное уравнение:

$$y = 10,3 - 0,73x_4 - 0,059x_5. \quad (2)$$

Таким образом, количество нарушений в наибольшей степени зависит от качества труда и стажа работы. Множественный коэффициент корреляции равен 0.84. Выражение (2) значимо, как и его коэффициенты в соответствии с F -критерием Фишера и t -статистиками Стьюдента.

На основе полученного уравнения регрессии смоделируем значение результативного признака “количество нарушений” исходя из критических значения факторов, влияющие на кадровую безопасность.

Для предприятия АО “Нефтеавтоматика” изменение фактора “качество труда” согласно экспертным оценкам изменяется от 5 до 9. При этом, чем выше показатель, тем лучше качество труда. Фактор “стаж работы” колеблется в пределах 11-48.

На основе метода Монте-Карло, моделируя факторы случайным образом в рамках приведенных интервалов, можно получить различные значения результативного признака, характеризующего количество нарушений. На предварительном этапе проведено 300 вычислений.

Согласно полученным результатам с увеличением факторов “качества труда” и “стаж работы” происходит уменьшение результативного признака - “показатель ошибок, характеризующий количество нарушений кадровой безопасности на предприятии”. Используя сетку расчетных значений, можно

определить критерии для подбора персонала с наименьшими угрозами для кадровой безопасности.

Результаты моделирования показали, что при независимой генерации факторов с помощью метода Монте-Карло результативный признак изменяется от 0.9 до 5.8. Понятно, что показатель наименьших ошибок соответствует ситуации, когда $x_4=9$, $x_5=48$. Однако нужно понимать, что такой вариант, по сути, невозможен, поскольку предприятие не имеет возможность развиваться ввиду отсутствия молодых кадров. Поэтому обратим внимание на медиану результативного признака $y=3.6$, соответствующую значениям факторов $x_4=8$, $x_5=14$.

Приведенный результат интересен при ориентации предприятия на постоянное возобновление кадров и повышение качества труда.

Приведенный алгоритм можно использовать не только для приведенных факторов, но и для других (например, степень удовлетворенности оплатой труда, наличие профессиональных заболеваний, вероятность сохранения коммерческой тайны и т.д.).

Для предприятий различных сфер экономики факторы могут изменяться в зависимости от направлений деятельности предприятия и его размера, модернизации, уровня технологий и др.

Выводы. В условиях рыночных преобразований конкурентоспособность предприятия зависит от многих факторов, основными из которых являются технологии, организация производства, управление и качество персонала.

Кадровая безопасность предприятия играет ведущую роль в обеспечении его безопасного функционирования.

Для уменьшения угроз предприятию предложен алгоритм моделирования различных ситуаций формирования кадрового состава на основе многофакторного моделирования с использованием метода статистических испытаний. При этом предложено моделировать факторы с помощью экспертных оценок.

Приведена реализация алгоритма для промышленного предприятия с некоторыми рекомендациями.

Список литературы

1. Алавердов, А.Р. Управление кадровой безопасностью организации: учебник / А.Р. Алавердов. – М.: Маркет ДС, 2018. – 176 с.
2. Алтухов, А.Р. Кадровая составляющая в системе экономической безопасности предприятия / А.Р. Алтухов. – Кемерово. 2019. – 149 с.
3. Бадалова, А.Г. Управление кадровыми рисками на предприятии / А.Г. Бадалова // Российское предпринимательство – 2018. – № 7. [Электронный ресурс]. URL: <http://bgscience.ru/lib/1437> (дата обращения 10.02.2022).
4. Белякова, А.Ю. Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур в подтаежно-таежном агроландшафтном районе Предбайкалья / А.Ю. Белякова, Т.С. Бузина // Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”. – 2023; 2 (47). – 47-58.

5. Бражникова, А.С. Методика оценки кадровой составляющей экономической безопасности предприятия / А.С. Бражникова, А.С. Глотова // Экономическая безопасность социально-экономических систем: вызовы и возможности. – Белгород: ООО “Эпицентр”, 2021. – С. 117-121. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46636595> (дата обращения 10.02.2022).

6. Дорофеев, К.Н. Кадровая безопасность в системе экономической оценки деятельности фирмы / К.Н. Дорофеев, Е.В. Гараева // Молодой ученый. – 2013. – №6. С. 327-331. [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/53/7076/> (дата обращения 10.11.2020).

7. Задача параметрического программирования с моделями прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / Я.М. Иваньо, М.Н. Барсукова, Ю.В. Столопова, С.А.Петрова // Прикладная информатика. - 2021. - Т. 16. - № 6 (96). - С. 131-143.

8. Мансурова, Ю.Т. Эконометрика: курс лекций: учебное пособие / Ю.Т. Мансурова, П.А. Туктарова // Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2022. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-173.pdf.

9. Фокина, Н.А. Классификация рисков кадровой безопасности предприятия / Н.А. Фокинат // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. – 2020. – № 3 (52). – С. 25-28.

10. Buzina, T.S. Method of statistical tests in solving problems of food production management / T.S. Buzina, A.Yu. Belyakova, Ya.M. Ivanyo // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 16–19 июня 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. vol. 839. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – p. 32051. – DOI 10.1088/1755-1315/839/3/032051. – EDN KYPGSP.

11. Chupryakova, A.G., Grigashkina, S.I. & Merkuryev, V.V. Effects of human resource risks on organizational changes in coal mining companies. Ugol', 2023, (10), pp. 36-41

References

1. Alaverdov, A.R. Upravleniye kadrovoy bezopasnost'yu organizatsii: uchebnyk [Organizational personnel security management]. Moscow, 2018, 176 p.

2. Altukhov, A.R. Kadrovaya sostavlyayushchaya v sisteme ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiya [Personnel component in the enterprise's economic security system]. Kemerovo, 2019, 149 p.

3. Badalova, A.G. Upravleniye kadrovymi riskami na predpriyatii [Personnel risk management at the enterprise]. Rossiyskoye predprinimatel'stvo, 2018, no. 7. <http://bgscience.ru/lib/1437> (data obrashcheniya 10.02.2022).

4. Belyakova, A.Yu., Buzina, T.S. Modelirovaniye urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v podtayezhno-tayezhnom agrolandschaftnom rayone Predbaykal'ya [Modeling of agricultural crop yields in the subtaiga-taiga agrolandscape region of Cisbaikalia]. Elektronnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal “Aktual'nyye voprosy agrarnoy nauki”, 2023, no. 2 (47), pp. 47-58.

5. Brazhnikova, A.S., Glotova, A.S. Metodika otsenki kadrovoy sostavlyayushchey ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiya [Methodology for assessing the personnel component of the economic security of an enterprise]. Ekonomicheskaya bezopasnost' sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: vyzovy i vozmozhnosti. – Belgorod: Epitsentr, 2021, pp. 117-121, <https://elibrary.ru/item.asp?id=46636595> (data obrashcheniya 10.02.2022).

6. Dorofeyev, K.N., Garayeva, Ye.V. Kadrovaya bezopasnost' v sisteme ekonomicheskoy otsenki deyatel'nosti firmy [Personnel security in the system of economic

assessment of a company’s activities]. *Molodoy uchenyy*, 2013, no. 6, pp. 327-331, <https://moluch.ru/archive/53/7076/>

7. Ivanyo Ya. M. et al. *Zadacha parametriceskogo programmirovaniya s modelyami prognozirovaniya urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The problem of parametric programming with models for predicting crop yields]. *Prikladnaya informatika*, 2021, vol. 16, no. 6 (96), pp. 131-143.

8. Mansurova, Yu.T., Tuktarova, P.A. *Ekonometrika* [Econometrics]. Ufa: UGATU, 2022, [https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite /Ob%20universitete/Izdateli/EI_izd/2022-173.pdf](https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EI_izd/2022-173.pdf).

9. Fokina, N.A. *Klassifikatsiya riskov kadrovoy bezopasnosti predpriyatiya* [Classification of enterprise personnel security risks]. *Nauchnyy vestnik: finansy, banki, investitsii*, 2020, no. 3 (52), pp. 25-28.

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: 13.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 19.06.2024

Дата принятия к печати / Accepted: 28.06.2024

Сведения об авторе

Туктарова Полина Андреевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный, e-mail: ptuktarova@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-3138>.

Information about author

Tuktarova Polina Andreevna – Candidate of Economic Sciences, Ass. Prof. of the Department of informatics and mathematical modeling of Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, e-mail: ptuktarova@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-3138>.

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: *iydex@rambler.ru*.

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

Выпуск 2(51)

июнь

Технический редактор – Н.В. Спиридонова

Перевод – П.Г. Асалханов

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Дата выхода: 01.07.2024.

Усл. печ. л. 6,31.

Адрес редакции, издателя, типографии:

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