

электронный научно-практический журнал
ELECTRONIC SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

актуальные вопросы аграрной науки

ACTUAL ISSUES
OF AGRARIAN SCIENCE

выпуск 3(60)
сентябрь
VOLUME 3(60)
SEPTEMBER

ISSN: 2411-6483

МОЛОДЁЖНЫЙ 2026



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

2026 Выпуск 3(60)

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

2026 Volume 3(60)

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 10.51215/2411-6483-2026-60

Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”, 2026, выпуск 3(60), сентябрь.

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

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

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

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

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

Иные организации: *Россия:* Байкальский государственный университет: В.И. Зоркальцев, д.т.н.

Иркутский государственный университет путей сообщения: Ю.М. Краковский, д.т.н.

Иркутский национальный исследовательский технический университет: С.Н. Кривцов, д.т.н.

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

Республика Беларусь: Белорусский государственный аграрный технический университет: В.П. Чеботарев, д.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”, 2026, issue 3(60), September. It is edited under the decision of the Scientific Council of the Irkutsk State Academy of Agriculture since November, 2011.

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

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

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

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

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

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

Irkutsk National Research Technical University: **S.N. Krivtsov**, Doctor of Technical Sc.

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

Republic of Belarus: Belarusian State Agrarian Technical University: **V.P. Chebotarev**, Doctor 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.* Повышение эффективности слоевого сжигания при организации движения дымовых газов над слоем топлива 8
- Бузунова М.Ю.* Конструкция привода движения самоходной дождевальная машины барабанного типа 19
- Степанов А.В., Разяпов М.М., Неговора А.В., Козеев А.А., Магафуров Р.Ж.* Моделирование процесса распределения масла в системе смазки ДВС с турбонаддувом 29
- Хабардин В.Н., Лончаков И.А.* Анализ методов и средств экспресс-оценки моторных масел по “капельной пробе” при помощи искусственного интеллекта 39

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Полковская М.Н.* Классификация многоэтапных моделей в управлении аграрным производством в условиях неопределенности 49
- Репецкий О.В.* Численный анализ долговечности при блочной расстройке параметров от влияния эксплуатационных дефектов турбомашин 66
- Тырышкин С.Ю.* Применение квантовых алгоритмов и нейросетевых ускорителей для оптимизации производственных циклов в рамках цифровой трансформации предприятий 74
- Энхбат Ариунжаргал.* Особенности моделирования структуры и поголовья пастбищных животных Монголии 84

CONTENS

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AGRO-ENGINEERING SYSTEMS

- Bochkarev V.A., Ochirov V.D.* Increasing the efficiency of stack combustion by organizing the movement of flue gases above the fuel layer 8
- Buzunova M.Yu.* Drive mechanism design for a self-propelled drum-type irrigation machine 19
- Stepanov A.V., Razyapov M.M., Negovora A.V., Kozev A.A., Magafurov R.Z.* Modeling the oil distribution process in the lubrication system of a turbocharged internal combustion engine 29
- Khabardin V.N., Lonchakov I.A.* Analysis of methods and tools for the rapid assessment of engine oils using the “drop test” and artificial intelligence 39

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING, MANAGEMENT, MATHEMATICAL MODELING

- Polkovskaya M.N.* Classification of multi-stage models for agricultural production management under uncertainty 49
- Repetskii O.V.* Numerical analysis of durability under block-type parameter deviation caused by operational defects in turbomachines 66
- Tyryshkin S.Yu.* Application of quantum algorithms and neural accelerators for optimization of production cycles in the framework of digital transformation of enterprises 74
- Enkhbat Ariunjargal.* Features of modeling the structure and population of grazed animals in Mongolia 84



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

DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-8-18
УДК 662.66:662.61

Научная статья

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СЛОЕВОГО СЖИГАНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ
ДВИЖЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НАД СЛОЕМ ТОПЛИВА**

^{1,2} В.А. Бочкарев, ¹В.Д. Очиров

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

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

Аннотация. При обследовании угольных котельных выявлен ряд недостатков в их работе. Обращает на себя внимание такой параметр, как коэффициент полезного действия котлов, значение которого ниже паспортных данных заводов-изготовителей. Для повышения коэффициента полезного действия котлов предлагается внедрить способ слоевого сжигания топлива путем организации вихревого движения воздуха и дымовых газов в топочной камере над слоем воздуха в котлах. Представлены результаты по снижению затрат на сжигание топлива паровыми котлами марки КЕ с теплопроизводительностью от 1.4 до 14.1 Гкал/ч, водогрейного котла марки КВ-1, водогрейных котлов марки КВ-ТС с теплопроизводительностью от 1.0 до 20.0 Гкал/ч. В качестве расчетного топлива принят уголь азейского месторождения. Экономия топлива за отопительный сезон рассчитана при повышении коэффициента полезного действия паровых котлов с 73 до 78% и водогрейных котлов с 70 до 75%. В расчетах стоимость одной тонны угля принята равной 2000 рублей. Внедрение предлагаемого способа сжигания топлива не требует больших затрат на расходные материалы, изготовление и монтаж. Продолжительность работ по модернизации котлов составляет 10-12 дней. Снижение затрат на топливо для указанного диапазона теплопроизводительности при эксплуатации паровых котлов составило от 258000 до 2624000 руб./год и водогрейных котлов – от 258000 до 4032000 руб./год. Стоит отметить, что повышение коэффициента полезного действия котлов при внедрении в них вихревого движения дымовых газов произойдет при сжигании различных видов углей.

Ключевые слова: паровой котел, водогрейный котел, твердое топливо, слоевое сжигание топлива, повышение эффективности, экономия топлива.

Для цитирования: Бочкарев В.А., Очиров В.Д. Повышение эффективности слоевого сжигания при организации движения дымовых газов над слоем топлива. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):8-18. DOI: 10.51215/2411-6483-2026-60-8-18.

INCREASING THE EFFICIENCY OF STACK COMBUSTION BY ORGANIZING THE MOVEMENT OF FLUE GASES ABOVE THE FUEL LAYER

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

¹Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
Molodezhny, Molodezhnoye rural settlement, Irkutsk municipal district, Irkutsk region, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. An assessment of coal-fired boiler plants revealed several operational shortcomings. Particular attention is drawn to the boiler efficiency, which falls below the values specified by the manufacturers. To improve boiler efficiency, a stack combustion method is proposed that involves inducing vortex motion of the air and flue gases within the furnace chamber above the fuel stack. The paper presents results regarding the reduction of fuel consumption costs for KE-series steam boilers (thermal output: 1.4-14.1 Gcal/h), the KV-1 hot-water boiler, and KV-TS series hot-water boilers (thermal output: 1.0-20.0 Gcal/h). Coal from the Azey deposit was selected as the reference fuel. Fuel savings over the heating season were calculated based on increasing the efficiency of steam boilers from 73% to 78% and hot-water boilers from 70% to 75%. A cost of 2,000 rubles per tonne of coal was used for the calculations. Implementing the proposed fuel combustion method does not require significant expenditure on consumables, fabrication, or installation. The boiler modernization process takes 10-12 days. Fuel cost savings within the specified heat output range amounted to 258.000-2.624.000 rubles/year for steam boilers and 258.000-4.032.000 rubles/year for hot-water boilers. It is worth noting that boiler efficiency increases when a vortex flow of flue gases is introduced, regardless of the type of coal burned.

Keywords: steam boiler, hot-water boiler, solid fuel, stack combustion, efficiency improvement, fuel savings.

For citation: Bochkarev V.A., Ochirov V.D. Increasing the efficiency of stack combustion by organizing the movement of flue gases above the fuel layer. *Electronic scientific-practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2026; 3(60):8-18. DOI: 10.51215/2411-6483-2026-60-8-18.

Введение. При разработке различных государственных программ по развитию малых населенных пунктов и сельских территорий особое внимание обычно уделяется развитию инфраструктуры и жилищного строительства. Строительство и ввод в эксплуатацию новых жилых и социальных объектов всегда приводит к повышению расхода топливно-энергетических ресурсов для их теплоснабжения. В свою очередь рост расхода энергоресурсов требует его рационального использования. В этом плане ученые и практики нашей страны на протяжении многих лет ведут работы по совершенствованию способов выработки тепловой энергии, ее транспортирования, отпуска и потребления, что позволяет получить экономию и повысить эффективность использования органического топлива.

В суровых климатических условиях Сибири, Севера и Дальнего Востока отрасль теплоснабжения (система обеспечения теплом зданий и сооружений) является наиважнейшей сферой услуг и играет ключевую роль в обеспечении социальной стабильности, конкурентоспособности и развития экономики федеральных округов и регионов [7, 10, 11]. В отечественной теплоэнергетике основными источниками тепловой энергии являются два вида теплоисточников: теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и котельные. В крупных городах высока доля получения и потребления тепловой энергии от ТЭЦ, в малых и средних городах, в поселках городского типа тепловая энергия отпускается от котельных [1]. В небольших селах и деревнях от котельных в основном отапливаются здания административного и социального назначения.

В России большая часть (более 60%) котельных эксплуатируется на твердом топливе со слоевым сжиганием. В нашем регионе доля котельных со слоевым сжиганием твердого топлива составляет около 90%, что показывает на низкий уровень использования (10%) в качестве топлива на котельных таких энергоресурсов, как газ и мазут. В отличие от Сибирских регионов в регионах Европейской части России доля котельных, работающих на газе и мазуте, составляет 70%. Имея такой малый процент вовлечения газа и мазута в топливно-энергетический баланс, котельные нашей области заведомо функционируют с низкими эксплуатационными и экологическими показателями.

Обследование работы угольных котельных в городах и сельских территориях региона позволили выявить в них ряд недостатков. Основные недостатки, имеющих место быть в большинстве котельных, представлены на рисунке 1.

При оценке эффективности сжигания топлива обычно используют значение коэффициента полезного действия (КПД) котла [12]. Испытания, проведенные на котлах со слоевым сжиганием, показывают, что котельные агрегаты эксплуатируются с КПД на 10-30 процентов ниже паспортных значений, которые гарантируют заводы-изготовители [3]. Данное обстоятельство указывает на необходимость проведения исследований по повышению показателя КПД котлов путем увеличения эффективности сжигания твердого топлива и снижения объемов загрязнения окружающей среды.

Цель работы – повышение эффективности слоевого сжигания твердого топлива за счет снижения расхода угля на котельный агрегат и уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу.

Материалы и результаты исследования. Слоевой способ сжигания твердого топлива получил наибольшее применение в малой энергетике из-за возможности сжигания различных марок топлива в одном топочном устройстве [4, 7, 8].



Рисунок 1 – Недостатки, характерные для большинства угольных котельных, эксплуатируемых на территории Иркутской области

Figure 1 – Disadvantages typical of most coal-fired boiler plants operating in the Irkutsk region

При таком способе горения твердого топлива наблюдаются две зоны (окислительная и восстановительная), что показано на рисунке 2. В данном случае скорость протекания химических реакций горения определяется скоростью подвода окислителя в восстановительной зоне к поверхности частиц угля и концентрацией окислителя.

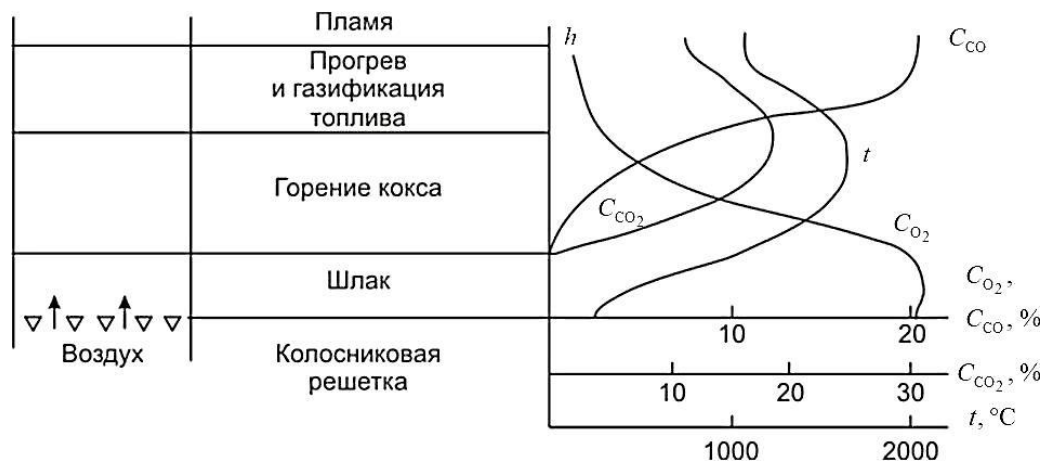
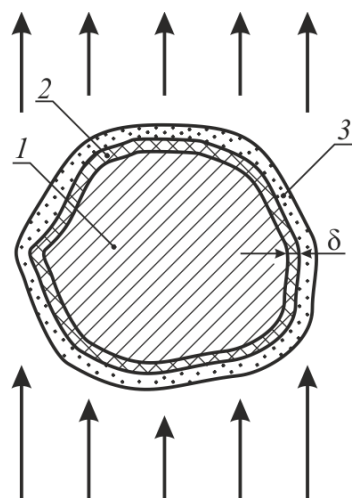


Рисунок 2 – Изменение концентрации дымовых газов и температуры по высоте слоя топлива при горении [9]

Figure 2 – Variation of flue gas concentration and temperature along the height of the fuel bed during combustion [9]

При горении из топлива выделяются летучие вещества и образуются продукты сгорания, которые создают препятствие поступлению кислорода к поверхности частиц топлива (рис. 3). Для уменьшения размеров восстановительной зоны и количества, поступающих в топочный объем горючих газов, следует уменьшить толщину пограничного слоя газов.



Скорость горения топлива зависит от:

- толщины пограничного слоя;
- температуры и концентрации кислорода вблизи поверхности угля и омывающем потоке;
- размеров золовой корочки, образующейся при выгорании углерода на поверхности частиц топлива.

Рисунок 3 – Схема пограничного слоя газов вокруг горящей частицы угля: 1 – частица угля; 2 – корочка золы; 3 – пограничный слой газов

Figure 3 – Diagram of the gas boundary layer around a burning coal particle: 1 – coal particle; 2 – ash crust; 3 – gas boundary layer

В независимости от вида и марки сжигаемого топлива при работе котельных агрегатов необходимо обеспечить эффективное выгорание топлива при достижении соответствующей температуры горения [5]. При сжигании топлива в слое следует поддерживать оптимальную толщину слоя и добиваться равномерного распределения топлива на колосниковой решетке. Неравномерность слоя топлива создает прорывы воздуха и газа, которые идут через решетку и слой горящего топлива в топку. В такой

ситуации воздух лишь частично участвует в процессе горения и проходит транзитом к выходу из топки котла. Одним из способов повышения сжигания топлива в слое является организация вихревого движения воздуха и дымовых газов (ВДДГ) в топочной камере над слоем топлива [2]. Схема организации ВДДГ показана на примере котла КЕ-25-14С (рис. 4).

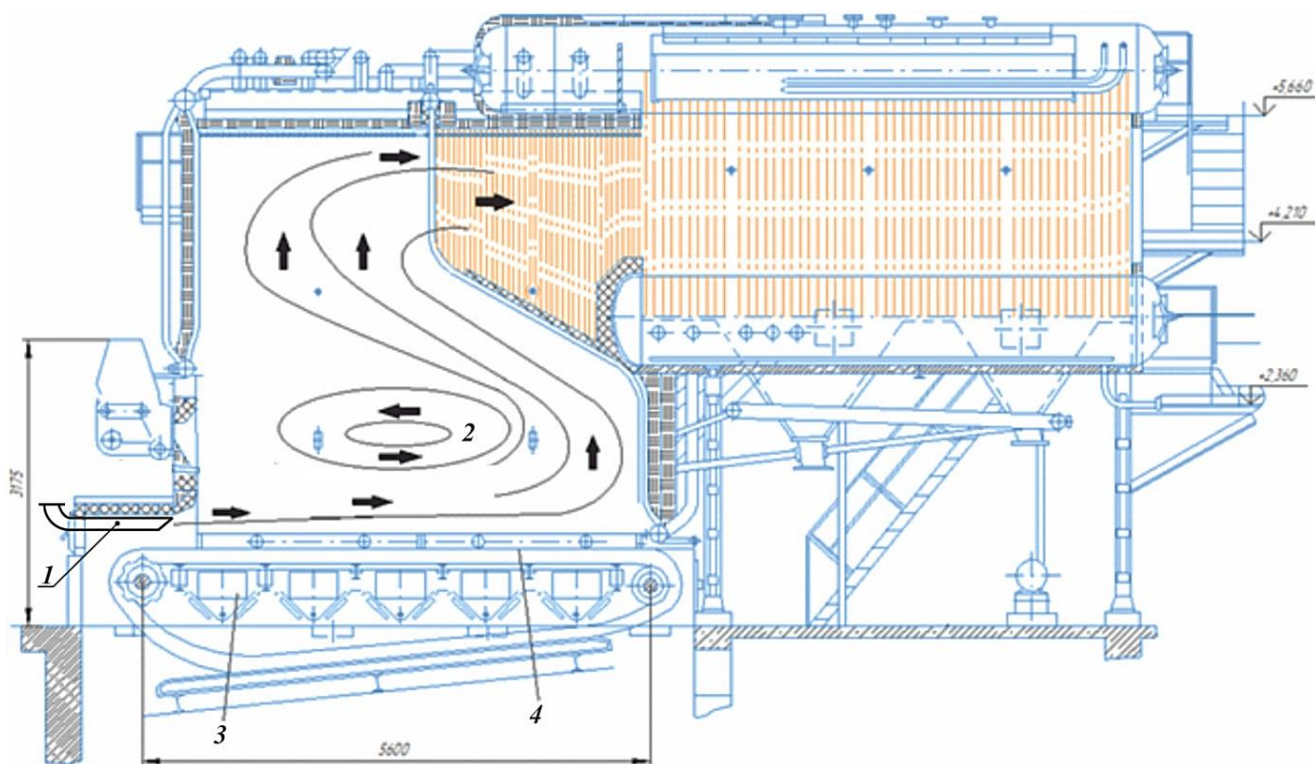
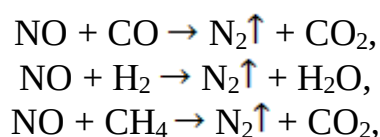


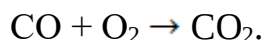
Рисунок 4 – Схема организации ВДДГ в котле КЕ-25-14С:
 1 – коллектор дополнительного дутья; 2 – вихревая зона;
 3 – подача воздуха под решетку; 4 – слоевая решетка

Figure 4 – Schematic of the VMAFG system arrangement in the KE-25-14S boiler:
 1 – auxiliary air blast header; 2 – vortex zone;
 3 – under-grate air supply; 4 – grate

Суммарное количество подаваемого над слоем топлива воздуха через воздушные сопла составляет до 15% от необходимого для горения, а под колосниковую решетку происходит подача остальной части воздуха. За счет создаваемого вихревого движения улучшается процесс перемешивания топлива с окислителем, уменьшается количество зон с недостатком кислорода, в топочной камере происходит улучшение процесса горения топлива и создается восстановительная среда (в вихревой зоне). В этой зоне протекают химические реакции между продуктами неполного сгорания твердого топлива и окисью азота [10]:



а также в вихревой зоне происходит сгорание окиси углерода



В таблицах 1 и 2 приведены результаты оценки снижения затрат на топливо в котельных агрегатах с применением подачи воздуха над слоем топлива в паровых и водогрейных котлах. При выполнении расчетов принимался азейский уголь с низшей теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 15.99$ МДж/кг (3820 ккал/кг). Экономия топлива за год рассчитана при повышении КПД котельного агрегата на 5%, продолжительности отопительного сезона 241 сутки, коэффициенте загрузки котельного агрегата 0.7 и стоимости тонны угля 2000 рублей. Стоимость угля в Иркутской области изменяется в пределах от 2000 до 8000 рублей за одну тонну. Такое изменение цены топлива зависит от транспортных расходов по доставке угля. При долгосрочном планировании эксплуатации котельных на твердом топливе необходимы оценочные расчеты по снижению затрат на топливо. В себестоимости вырабатываемой тепловой энергии затраты на топливо составляют до 70%. Здесь можно сказать, что при повышении стоимости топлива, затраты на топливо, с использованием предлагаемой технологии, будут кратны повышению стоимости одной тонны угля относительно указанной стоимости при расчетах, представленных в работе.

Результаты, полученные в ходе экспериментов на паровых и водогрейных котлах, отчетливо показывают эффективность предлагаемого способа сжигания топлива (табл. 1, 2). С увеличением тепловой мощности котла при внедрении ВДДГ происходит увеличение значений по годовой экономии топлива и, соответственно, снижения затрат на топливо. Наглядно видна существенная экономия топлива и денежных средств на закупку топлива, особенно в отопительный период, длящийся в наших климатических условиях не менее 8-9 месяцев.

Опыт работы с котельными различных организаций показывает, что высокий интерес к экономии твердого топлива при его сжигании активно проявляют только те руководители организаций, кто платит за энергоресурсы из собственных средств или, как говорят в народе, "из своего кармана". Организации, централизованно финансируемые из бюджета государства, не особо охотно идут на мероприятия по ресурсосбережению, несмотря на то, что для этого разработаны и действуют различные нормативные документы, регламентирующие реализацию разных мер по использованию меньшего количества энергоресурсов при сохранении прежнего полезного эффекта.

Выводы. Приведены результаты оценки снижения затрат на топливо в котельных агрегатах с применением подачи воздуха над слоем топлива в паровых и водогрейных котлах. В настоящее время в эксплуатации находятся более 140 паровых и водогрейных котлов с организацией ВДДГ.

Таблица 1 – Снижение затрат на топливо паровыми котлами

Table 1 – Reduction in fuel costs with steam boilers

Тип решетки, марка котла	Теплопроизво- дительность котельного агрегата, Гкал/ч	КПД котельного агрегата, %		Годовая экономия топлива, т/год	Снижение затрат на топливо, руб./год
		Слое- вое сжига- ние	С организа- цией ВДДГ		
Подвижная решетка обратного хода, КЕ-2,5-14С	1.4	73	78	129	258000
Подвижная решетка обратного хода, КЕ-4-14С	2.25	73	78	210	420000
Подвижная решетка обратного хода, КЕ-6,5-14С	3.66	73	78	340	680000
Подвижная решетка обратного хода, КЕ-10-14С	5.62	73	78	522	1044000
Подвижная решетка обратного хода, КЕ-25-14С	14.1	73	78	1312	2624000

Таблица 2 – Снижение затрат на топливо водогрейными котлами*

Table 2 – Reduction in fuel costs with water-heating boilers*

Тип решетки, марка котла	Теплопроизво- дительность котельного агрегата, Гкал/ч	КПД котельного агрегата, %		Годовая экономия топлива, ΔB , т/год	Снижение затрат на топливо, ΔZ_t , руб./год
		Слое- вое сжига- ние	С органи- зацией ВДДГ		
Неподвижная решетка, КВ-1	1.0	70	75	101	258000
Подвижная решетка обратного хода, КВ-ТС-4	4.0	70	75	405	420000
Подвижная решетка обратного хода, КВ-ТС-6,5	6.5	70	75	656	1312000
Подвижная решетка обратного хода, КВ-ТС-10	10.0	70	75	1013	2026000
Подвижная решетка обратного хода, КВ-ТС-20	20.0	70	75	2016	4032000

Практика внедрения предложенных в статье решений по эффективному сжиганию твердого топлива показывает, что КПД будет повышен на любых котлах при разных марках угля. На изготовление и монтаж данной технологии сжигания потребуется 10-12 дней в период небольших тепловых нагрузок или в летний период.

Список литературы

1. Бойко, Е.Е. Способы повышения эффективности территориальных систем энергоснабжения / Е.Е. Бойко, Ф.Л. Бык, П.В. Илюшин, Л.С. Мышкина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 4. – С. 108-117.
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. Бочкарев, В.А. Работа котлов КВТС-20 и КВТСВ-20 с организацией вихревого движения дымовых газов над слоем топлива / В.А. Бочкарев, А.Г. Фролов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 3(98). – С. 211-215.
4. Делягин, Г.Н. Теплогенерирующие установки / Г.Н. Делягин, В.Н. Лебедев, Б.А. Пермьяков. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
5. Лымбина, Л.Е. Влияние балласта на эффективность теплообмена в зоне интенсивного горения котельных агрегатов / Л.Е. Лымбина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19. – № 2. – С. 5-13.
6. Найден, С.Н. Реформа теплоснабжения: последствия для дальневосточных потребителей / С.Н. Найден, О.В. Демина // ЭКО. – 2019. – № 3(537). – С. 21-36.
7. Нечаев, Е.В. Механические топки для котлов малой и средней мощности / Е.В. Нечаев, А.Ф. Лубнин. – Л.: Энергия, 1968. – 311 с.
8. Ницкевич, Е.А. Проектирование котельных агрегатов малой и средней производительности / Е.А. Ницкевич. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 404 с.
9. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1986. – 309 с.
10. Семикашев, В.В. Отрасли топливно-энергетического комплекса в контексте пространственного развития экономики России / В.В. Семикашев, А.С. Терентьева, М.С. Гайворонская, И.К. Ростовский // Проблемы прогнозирования. – 2025. – № 4(211). – С. 143-156.
11. Стенников, В.А. Проблемы российского теплоснабжения и пути их решения / В.А. Стенников, А.В. Пеньковский // ЭКО. – 2019. – № 9(543). – С. 48-69.
12. Яковлев, В.А. Технология управления процессом эффективного сжигания топлива с помощью искусственного интеллекта / В.А. Яковлев, И.В. Ананченко, О.Н. Новиков, А.М. Гримитлин // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 3. – С. 24-30.

References

1. Bojko, E.E. et all. Spособы povysheniya effektivnosti territorial'nyh sistem energosnabzheniya [Methods for improving the efficiency of territorial energy supply systems]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika, 2022, vol. 65, no 4, pp. 108-117.
2. Bochkarev, V.A., Ochirov, V.D. Povyshenie effektivnosti sloevogo szhiganiya topliva [Improving the efficiency of fuel bed combustion]. Innovacii v sel'skom hozyajstve, 2015, no. 5(15), pp. 85-88.
3. Bochkarev, V.A., Frolov, A.G. Rabota kotlov KVTS-20 i KVTSV-20 s organizaciej vihrevogo dvizheniya dymovyh gazov nad sloem topliva [Operation of KVTS-20 and KVTSV-

20 boilers with the generation of vortex motion of flue gases above the fuel bed]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2015, no. 3(98), pp. 211-215.

4. Delyagin, G.N. et all. Teplogeneriruyushchie ustanovki [Heat-generating units]. Moscow, 1986, 559 p.

5. Lymbina, L.E. Vliyanie ballasta na effektivnost' teploobmena v zone intensivnogo goreniya kotel'nyh agregatov [Influence of ballast on heat transfer efficiency in the intense combustion zone of boiler units]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 5-13.

6. Najden, S.N., Demina, O.V. Reforma teplosnabzheniya: posledstviya dlya dal'nevostochnyh potrebitel'ej [Heat supply reform: consequences for Far East consumers]. EKO, 2019, no. 3(537), pp. 21-36.

7. Nechaev, E.V., Lubnin A.F. Mekhanicheskie topki dlya kotlov maloj i srednej moshchnosti [Mechanical stokers for small and medium-capacity boilers]. Leningrad, 1968, 311 p.

8. Nickevich, E.A. Proektirovanie kotel'nyh agregatov maloj i srednej proizvoditel'nosti [Design of small and medium-capacity boiler units]. Moscow-Leningrad, 1951, 404 p.

9. Pomerancev, V.V. et all. Osnovy prakticheskoy teorii goreniya [Fundamentals of practical combustion theory]. Leningrad, 1986, 309 p.

10. Semikashev, V.V. et all. Otrastli toplivno-energeticheskogo kompleksa v kontekste pro-stranstvennogo razvitiya ekonomiki Rossii [Fuel and energy sector industries in the context of Russia's spatial economic development]. Problemy prognozirovaniya, 2025, no. 4(211), pp. 143-156.

11. Stennikov, V.A., Pen'kovskij A.V. Problemy rossijskogo teplosnabzheniya i puti ih resheniya [Challenges in Russia's heat supply sector and ways to address them]. EKO, 2019, no. 9(543), pp. 48-69.

12. Yakovlev, V.A. et all. Tekhnologiya upravleniya processom effektivnogo szhiganiya topliva s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta [Technology for controlling the efficient fuel combustion process using artificial intelligence]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo, 2025, no. 3, pp. 24-30.

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: 16.09.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 28.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026

Сведения об авторах

Бочкарев Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения и теплотехники энергетического факультета. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, муниципальный район Иркутский, с.п. Молодежное, п. Молодежный, 1/1, e-mail: v_bochkariev@mail.ru.

Очиров Вадим Дансарунович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой энергообеспечения и теплотехники энергетического факультета. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, муниципальный район Иркутский, с.п. Молодежное, п. Молодежный, 1/1, e-mail: ochirov@igsha.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9978-9691>.

Information about the authors

Viktor A. Bochkarev – candidate of technical sciences, associate professor of the department of energy supply and heat engineering, energy faculty. Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk municipal district, Molodezhnoye village, 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 Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

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



DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-19-28

УДК 631.34

Научная статья

КОНСТРУКЦИЯ ПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ САМОХОДНОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ БАРАБАННОГО ТИПА

М.Ю. Бузунова

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
*п. Молодежный, с.п. Молодежное, муниципальный район Иркутский,
Иркутская область, Россия*

Аннотация. Дождевание – это внесение воды в виде распыления, образуемого потоком воды под давлением, проходящим через небольшие отверстия или форсунки. Благодаря гибкости современного дождевального оборудования и эффективному контролю подачи воды этот метод можно использовать в большинстве топографических условий, за исключением тех, которые накладывают ограничения, связанные с возможностями землепользования и экономическими факторами. Системы дождевания можно разделить на две основные категории. В системах периодического и фиксированного дождевания разбрызгиватели во время полива остаются в фиксированном положении, а в системах непрерывного дождевания разбрызгиватели перемещаются по круговой или прямой траектории. К наиболее распространенным системам непрерывного действия относятся круговые и линейные дождевальные установки. Системы с непрерывным перемещением обеспечивают наиболее равномерную подачу воды, чем системы с периодическим перемещением и стационарные системы. Скорость движения можно регулировать, чтобы обеспечить поверхностный полив, который уменьшает или полностью исключает сток воды. В свою очередь, среди систем с непрерывным перемещением все более широкое распространение получают дождевальные оросительные устройства, состоящие из стационарной тележки, на которой установлен вращающийся барабан, на который намотано определенное количество шланга в виде слоев, образованных последовательными витками. Один конец шланга соединен с напорной трубой, а другой – с ползком или кареткой, на которой установлен дождеватель, жестко закрепленный на каретке и предназначенный для распределения воды по поверхности земли. Учитывая, что скорость движения тележки напрямую влияет на количество воды в единицу времени, которая подается дождевателем на орошаемую поверхность, то требуют детального рассмотрения влияние конструкции и составных узлов привода движения машиной на эффективность орошения.

Ключевые слова: дождевательная машина, орошение, движение, привод, тележка, шланг, эффективность.

Для цитирования: Бузунова М.Ю. Конструкция привода движения самоходной дождевальной машиной барабанного типа. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):19-28. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-19-28.

DRIVE MECHANISM DESIGN FOR A SELF-PROPELLED DRUM-TYPE IRRIGATION MACHINE

Marina Yu. Buzunova

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky

Molodezhny, Molodezhnoye rural settlement, Irkutsk municipal district, Irkutsk region, Russia

Abstract. Sprinkler irrigation involves applying water as a spray generated by a pressurized flow passing through small orifices or nozzles. Thanks to the versatility of modern sprinkler equipment and effective control over water delivery, this method is suitable for most topographical conditions, barring limitations imposed by land-use constraints or economic factors. Sprinkler systems fall into two main categories: intermittent (or fixed) systems, where sprinklers remain stationary during irrigation, and continuous-movement systems, where sprinklers travel along circular or linear paths. Center-pivot and linear-move systems are among the most common continuous-movement setups. Continuous-movement systems provide more uniform water application than intermittent or stationary systems. Travel speed can be adjusted to ensure an application rate that minimizes or entirely eliminates runoff. Within the category of continuous-movement systems, there is growing adoption of units consisting of a stationary cart holding a rotating drum, around which a hose is wound in successive layers. One end of the hose connects to a pressurized supply line, while the other attaches to a skid or carriage carrying a sprinkler designed to distribute water over the land surface. Since the cart's travel speed directly affects the rate of water application to the irrigated area, the impact of the machine's drive mechanism design and components on irrigation efficiency warrants detailed examination.

Keywords: sprinkler machine, irrigation, movement, drive, carriage, hose, efficiency.

For citation: Buzunova M.Yu. Drive mechanism design for a self-propelled drum-type irrigation machine. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2026; 3(60):19-28. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-19-28.

Введение. Эффективность орошения – набор комплексных показателей, позволяющих оценить качество рассматриваемой системы орошения по целому спектру параметров, включая технические, эксплуатационные и экономические [6]. Основными составляющими эффективности орошения являются: равномерность внесения и потери воды [1]. Различия в распределении влаги в зоне искусственного дождевания, создаваемого соответствующей машиной при любых способах ее перемещения по орошаемой поверхности, обусловлены в первую очередь движением ветра и границами увлажнения отдельных дождевателей. Во всех случаях, относящихся к стационарным, передвижным и самоходным дождевальным машинам, проблему влияния на равномерность полива неблагоприятных ветровых условий можно частично решить путем установки смежных дождевателей на близком расстоянии друг от друга на основном трубопроводе машины, а в случае конструкции с фронтальным расположением локальных трубопроводов – путем увеличения числа соответствующих им боковых ответвлений [5]. Кроме колебаний, вызванных ветром, всегда существует

вариативность в распределении на поверхности орошения зон увлажнения, создаваемых всеми дождевателями, в силу зависимости геометрической границы каждой из указанных зон от расположения рассматриваемого дождевателя с привязкой к выбранной координатной системе, для которой устанавливается требуемая норма полива [4]. Степень этой вариативности также зависит от конструкций, применяемых в системе дождевателей, включая величины рабочих давлений на локальных участках отводов, связанных с дождевателями. Таким образом, неравномерное распределение происходит из-за недостаточного перекрытия зон увлажнения дождевателей, их внешних границ орошения и влияния ветра на форму дождевального облака, создаваемого единичным дождевателем [2]. В целом неравномерное распределение воды при дождевании стационарными, передвижными и самоходными машинами имеет тенденцию, как к выравниванию, так и к концентрации при многократных поливах. Учитывая достаточно большой промежуток времени (период), соответствующий моменту очередного попадания воды в любую область на орошаемой поверхности, то при каждом последующем поливе можно с достаточной степенью точности полагать, что поле скоростей ветра в пределах границ орошаемого участка изменится. Как следствие, чем больше число дневных и ночных поливов, тем выше однородность распределения воды по полю. Непрерывное перемещение дождевателя аналогично бесконечно близкому их расположению по направлению движения дождевальной машины как линейному, так и круговому [9, 10]. Таким образом, системы с непрерывным перемещением обеспечивают достаточно высокую равномерность полива независимо от направления ветра, если расстояние между дождевателями, расположенными под прямым углом к направлению движения, достаточно мало. Периодически перемещаемые и стационарные системы искусственного дождевания принято называть стационарными, потому что во время работы дождеватели не перемещаются, а перемещаются из одного положения в другое после отключения подачи воды в подводящие в систему трубопроводы. К стационарным можно отнести самоходные дождевальные машины барабанного типа с учетом сказанного выше. В большинстве конструкций самоходных дождевальных машин барабанного типа используются: дождевальные консоли или ударный разбрызгиватель, комплект гибких полиэтиленовых труб на быстроразъемных соединениях [8].

Кроме того, в состав машины входит основная тележка с барабаном, на который наматываются участки трубы в несколько наложенных друг на друга спиральных слоев, а также вспомогательная подвижная тележка. Элементы конструкции подвижной тележки позволяют закрепить на заданном расстоянии от поверхности земли консоль или ударный разбрызгиватель [7]. В процессе работы машины количество спиральных слоев на барабане меняется. Как следствие, меняется масса основной тележки. При этом логика работы машины с точки зрения поддержания постоянной величины поливальной нормы на

орошаемой поверхности при прочих равных условиях позволяет сформулировать необходимое условие поддержания постоянной величины указанной нормы, а именно: обеспечение неизменной угловой скорости вращения барабана. В этом случае линейная скорость перемещения вспомогательной тележки также останется неизменной.

Цель работы – оценить работоспособность предложенной конструкции приводного механизма дождевальной машины самоходного типа с вращающимся от гидравлической турбины барабаном, в камеру которой оросительная вода поступает через отверстия в стенке смежной с основным проходным каналом поливальной воды. Показать, что в функциональном плане работа приводного механизма обеспечивает автоматическое регулирование скорости движения подвижной тележки в соответствии с заданием оператора. В полевых условиях по результатам измерений оценить величину слоя воды в соответствующей кювете для заданного диаметра конической форсунки дальноструйного дождевателя.

Материалы и методики исследования. В настоящее время самоходные дождевальные машины выполняются по конструктивным схемам, в которых полная механическая энергия системы, обеспечивающая работу механизмов для перемещения машины, обеспечивается минимальным по виду количеством применяемых в ней источников энергии. В этом плане предлагаемая конструкция привода машины является наиболее оптимальной, поскольку в ней используется только один источник, обладающий потенциальной энергией давления воды. В свою очередь, потенциальная энергия давления воды за счет конструкции машины должна преобразовываться таким образом, чтобы обеспечивать не только процесс прямолинейного движения тележки с барабаном и ударного разбрызгивателя, но и равномерность их перемещения. Потенциальная энергия давления воды обеспечивается за счет работы внешнего источника, например, центробежного насоса, который создает необходимый напор воды в питающем трубопроводе (рис. 1, поз. 1). Питающий трубопровод соединен с помощью гибких и жестких вставок с трубопроводом подачи воды (рис. 1, поз. 2) и ступицей несущей катушки (рис. 1, поз. 3).

В процессе прямолинейного движения ударного разбрызгивателя, закрепленного на подвижной тележке, увеличивается расстояние от нее до неподвижной тележки с барабаном [3]. Как следствие, увеличивается длина шланга, имеющего непосредственный контакт с землей, за счет его линейного перемещения по орошаемой поверхности путем волочения. Соответственно, на барабане уменьшается количество слоев неразмотанного шланга. В результате в динамике, соответствующей процессу вращения барабана, меняется момент инерции системы, состоящей из несущей катушки постоянного диаметра и переменного остаточного диаметра, равного толщине эквивалентных слоев шланга на подвижном барабане.



Рисунок 1 – Фотография общего вида дождевальной машины ZDM барабанного типа 500/110 с дальноструйным дождевателем

Figure 1 – A photograph of the general appearance of the ZDM drum-type sprinkler 500/110 with a long-jet sprinkler

В целом процесс размотки шланга и его последующего волочения сопровождается увеличением силы сопротивления, воздействующей на основную тележку по мере увеличения длины перетаскиваемого шланга. С учетом длины шланга, которая может составлять несколько сотен метров, привод, обеспечивающий движение тележки с ударным разбрызгивателем, должен обладать достаточной мощностью, чтобы выдерживать нагрузку в несколько тонн. Кроме того, большая длина шланга приводит к перепадам давления поливальной воды по ее длине ниже допустимого предела, что, в свою очередь, может привести к сбоям в работе ударного разбрызгивателя. Приводной узел для дождевальной машины ZDM барабанного типа (рис. 1) содержит турбину (рис. 2, поз. 1), непосредственно связанную с редуктором (рис. 2, поз. 2) с четырьмя различными передаточными числами, которые можно выбирать с помощью внешнего рычага.

В рассматриваемой конструкции приводного узла применена радиально-осевая турбина, имеющая спиральную камеру, которая окружает

рабочее колесо турбины и образует входную камеру, поперечное сечение которой уменьшается по мере продвижения от входного патрубка турбины к рабочему колесу. Спиральная форма камеры обеспечивает практически равномерную подачу воды на периферию рабочего колеса, позволяя тем самым создавать более высокий крутящий момент, повышая эффективность работы турбины, чем при использовании других конфигураций корпуса турбины. Выходная шестерня четырехскоростного редуктора (рис. 2, поз. 2) входит в зацепление с понижающим отношением от 1:10 до 1:30 с кольцевой шестерней (рис. 2, поз. 3), жестко связанной с несущей катушкой барабана (рис. 2, поз. 4), на который намотан гибкий полимерный шланг (рис. 1, поз. 4). В зависимости от выбранного передаточного числа редуктора скорость движения тележки составляет от 5 до 200 метров/час.

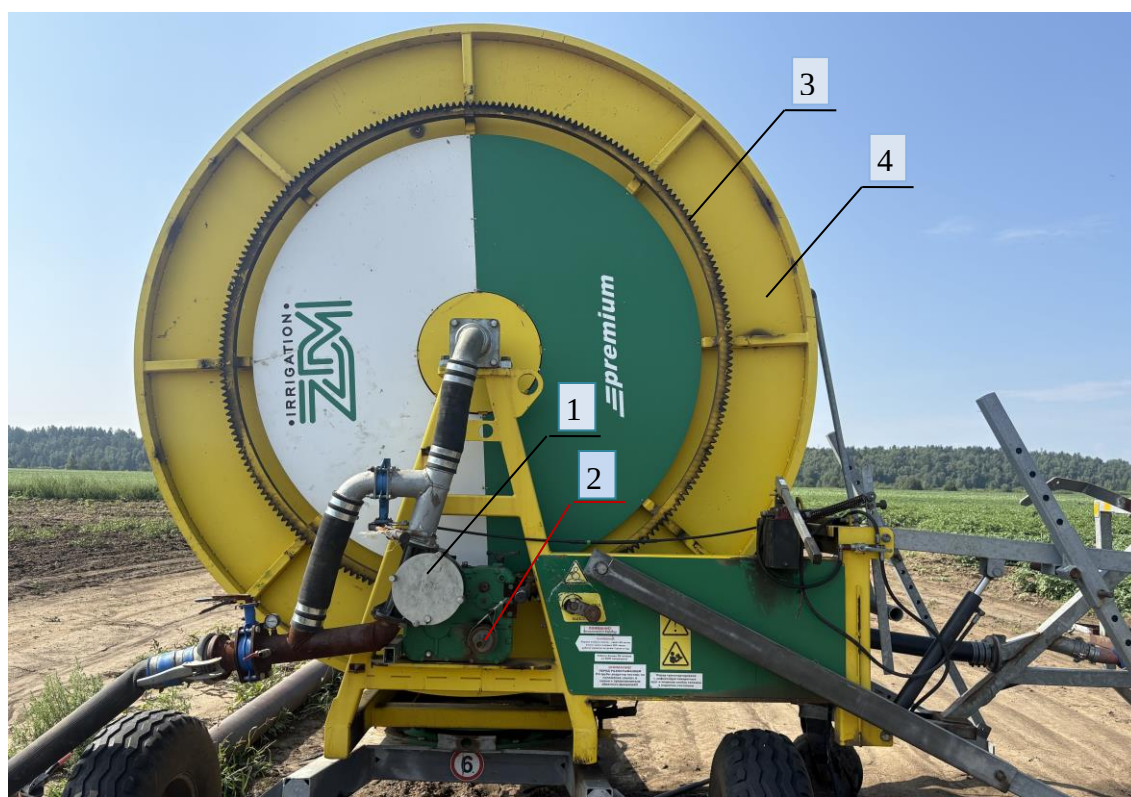


Рисунок 2 – Фотография дождевальной машины ZDM барабанного типа 500/110 в положении для перемещения

Figure 2 – Photograph of the ZDM drum-type sprinkler 500/110 in the position for movement

Результаты исследований. Полевой эксперимент проводился на пахотных землях КФХ “ИП Кичигина Л.П.”, Иркутская область, Усолье-Сибирское, село Мальта. Объектом исследования являлись параметры искусственного дождя создаваемого дождевальной машины ZDM барабанного типа 500/110 с дальноструйным дождевателем типа Komet Twin 101 Ultra (рис. 3).

Эксперимент проводился для трех типов конических форсунок на

конце дождевателя диаметрами 12 мм, 16 мм и 20 мм. При этом скорость подвижной тележки с ударным разбрызгивателем с помощью перепускного клапана и шестеренчатого редуктора задавалась рядом дискретных значений 6, 15 и 30 метров/час. Угол траектории дождевателя оставался неизменным в ходе экспериментов, равным 24°. Давление, создаваемое внешней насосной установкой с учетом движения поливальной воды через элементы конструкции привода на выходе сопла конических форсунок выбранного диаметра при длине шланга на поверхности земли 30 метров, соответствовало значению 6 bar. В качестве параметров искусственного дождя в ходе эксперимента оценивались средний слой воды на единицу условной площади и максимальная дальность полета струи. Оба указанных параметра измерялись путем использования набора кювет и сопутствующих приборов. Теоретические и паспортные данные дальноструйного дождевателя типа Komet Twin 101 Ultra, а также результаты эксперимента приведены в таблице.



Рисунок 3 – Фотография дождевателя типа Komet Twin 101 Ultra

Figure 3 – Photo of a Komet Twin 101 Ultra type sprinkler

Уменьшение для принятого диаметра конической форсунки дальности полета струи (см. табл.) по мере увеличения скорости подвижной тележки обусловлено тем фактом, что при неизменной величине расхода воды в трубопроводе подачи (рис. 1, поз. 1), расход воды в спиральную камеру радиально-осевой турбины будет увеличиваться. Как следствие, будет уменьшаться расход воды в шланге, подающем воду к дальноструйному дождевателю.

Таблица – Сводная таблица параметров искусственного дождя, создаваемого дальноструйным дождевателем типа Komet Twin 101 Ultra при давлении в сопле 6 bar

Table – Summary table of the parameters of artificial rain generated by the Komet Twin 101 Ultra long-jet sprinkler at a nozzle pressure of 6 bar

Диаметр форсунки, мм	12	16	20
Скорость, м/час	6	6	6
Дальность, м	37	42	45
Слой воды, мм	36	52	67
Скорость, м/час	15	15	15
Дальность, м	34	40	44
Слой воды, мм	35	46	61
Скорость, м/час	30	30	30
Дальность, м	30	37	42
Слой воды, мм	34	39	50

Выводы. Использование радиально-осевой турбины со спиральной камерой в конструкции приводного узла, обеспечивающей движение дождевальной машины, позволяет получить высокий крутящий момент турбины при относительно низкой скорости ее вращения. Типичная кривая эффективности для радиально-осевой турбины имеет колоколообразную форму. При определённой скорости вращения потока достигается наилучшее, наиболее эффективное преобразование энергии воды в механическую энергию на рабочем колесе. По мере приближения рабочей скорости к вершине колоколообразной кривой КПД турбины возрастает. Как следствие, выходной крутящий момент увеличивается по мере роста длины шланга, находящегося в движении, способом волочения, с одной стороны, и связанной с этим процессом увеличение силы трения скольжения – с другой. Таким образом, турбина стремится поддерживать практически постоянной линейную скорость движения шланга за пределами несущей катушки вне зависимости от величины силы трения по мере ее увеличения. Для контроля скорости движения шланга в предлагаемом приводе используются два контура управления наружный и внутренний. Перепускной клапан является основным элементом задания для двух потоков поливальной воды в первом контуре. С его помощью регулируется объем воды под давлением, которая поступает либо напрямую в шланг (прямой поток), либо поступает в него через радиально-осевую турбину (вторичный поток). Регулируя соотношение прямого и косвенного потоков, перепускной клапан обеспечивает первый способ контроля скорости движения шланга. Внутренний контур контроля скорости выполнен путем механического соединения турбины с редуктором с четырьмя различными передаточными числами, которые можно выбирать с помощью внешнего рычага. Выходной вал указанного редуктора состоит из шестерни, которая входит в сцепление с зубчатым венцом, расположенным на одном из двух боковых краев несущей катушки барабана. Настройки двух контуров системы регулирования

скорости с учетом заданной нормы полива задаются таким образом, чтобы обеспечить практически постоянную желаемую скорость движения шланга.

Список литературы

1. Бородычев, В.В. Мониторинг и управление орошением в режиме реального времени / В.В. Бородычев, М.Н. Лытов, Е.Э. Головинов. – Москва: Редакция журнала "Механизация и электрификация сельского хозяйства", 2017. – 154 с. – ISBN 978-5-9909008-9-9. – EDN ZSAASN.
2. Бочарников, В.С. Исследования гидравлических характеристик дождевальной машины кругового действия / В.С. Бочарников, О.В. Козинская, М.А. Денисова, О.В. Бочарникова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее проф. образование. – 2020. – № 2(58). – С. 319-327. – DOI 10.32786/2071-9485-2020-02-31.
3. Бузунова, М.Ю. Особенности конструктивной схемы дождевальных машин при орошении участков произвольной формы / М.Ю. Бузунова // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: матер. XV междунар. научно-практ. конф., п. Молодежный, 23–24 апреля 2026 г. – п. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2026. – С. 211-216. – EDN UFDYZG.
4. Кузнецов, А.В. Исследование влияния расположения насадок дождевальных машин на качество полива / А.В. Кузнецов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2019. – № 4(44). – С. 136-141. – DOI 10.36508/RSATU.2019.34.78.024. – EDN EFYETO.
5. Кузнецова, Н.В. Влияние гидравлических параметров на качество полива / Н.В. Кузнецова, Ю.В. Кузнецов, О.В. Козинская, М.А. Денисова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – № 2(58). – С. 73-83. – DOI 10.32786/2071-9485-2020-02-07. – EDN TGIPJI.
6. Ольгаренко, В.И. Система интегральных показателей оценки эффективности водопользования / В.И. Ольгаренко, И.В. Ольгаренко, С.Д. Дезюра [и др.] // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2019. – № 1(33). – С. 139-152. – DOI 10.31774/2222-1816-2019-1-139-152. – EDN YYTEHR.
7. Петровичев, И.В. Консоли для дождевальных машин барабанного типа / И.В. Петровичев, Д.А. Соловьев // Аграрные конференции. – 2017. – № 5(5). – С. 30-33. – EDN YRHAGT.
8. Сухарев, Д.В. Дождевальная и поливная техника / Д.В. Сухарев. – Новочеркасск: Донской государственный аграрный университет, 2020. – 84 с. – EDN QDHCLKI.
9. Черных, А.Г. Исследование зон увлажнения дождевателей Nelson при круговом движении водоподводящего трубопровода дождевальной машины / А.Г. Черных // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2025. – № 3(81). – С. 123-132. – DOI 10.24411/2078-1318-2025-3-123-132. – EDN XWZAXG.
10. Черных, А.Г. Определение зоны смачивания дождевателя в круговых самоходных дождевальных установках / А.Г. Черных // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1(75). – С. 105-114. – DOI 10.24412/2078-1318-2024-1-105-114. – EDN LAKNYZ.

References

1. Borodychev, V.V. et all. Monitoring i upravlenie orosheniem v rezhime real'nogo vremeni [Real-time irrigation monitoring and control]. Moscow: Redakciya zhurnala "Mehanizaciya i ehlektrifikaciya sel'skogo hozyajstva", 2017, 154 p. – ISBN 978-5-9909008-9-9. – EDN ZSAASN.
2. Bocharnikov, V.S. et all. Issledovaniya gidravlicheskih harakteristik dozhdeval'noj mashiny krugovogo dejstviya [Studies of the hydraulic characteristics of a center-pivot sprinkler machine]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie, 2020, no. 2(58), pp. 319-327. – DOI 10.32786/2071-9485-2020-02-31.
3. Buzunova, M.Yu. Osobennosti konstruktivnoj shemy dozhdeval'nyh mashin pri oroshenii uchastkov proizvol'noj formy [Design features of sprinkler machine configurations for irrigating irregularly shaped plots]. Molodezhnyj, 2026, pp. 211-216. – EDN UFDYZG.

4. Kuznecov, A.V. Issledovanie vliyaniya raspolozheniya nasadok dozhdeval'nyh mashin na kachestvo poliva [Study of the effect of sprinkler nozzle placement on irrigation quality]. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva, 2019, no. № 4(44), pp. 136-141. – DOI 10.36508/RSATU.2019.34.78.024. – EDN EFYETO.

5. Kuznecova, N.V. et all. Vliyanie gidravlicheskih parametrov na kachestvo poliva [Influence of hydraulic parameters on irrigation quality]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie, 2020, no. 2(58), pp. 73-83. – DOI 10.32786/2071-9485-2020-02-07. – EDN TGIPJI.

6. Ol'garenko, V.I. et all. Sistema integral'nyh pokazatelej ocenki ehffektivnosti vodopol'zovaniya [System of integral indicators for assessing water use efficiency]. Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii, 2019, no. 1(33), pp. 139-152. – DOI 10.31774/2222-1816-2019-1-139-152. – EDN YYTEHR.

7. Petroviche, I.V., Solov'ev, D.A. Konsoli dlya dozhdeval'nyh mashin barabannogo tipa [Booms for hose-reel irrigation machines]. Agrarnye konferencii, 2017, no. 5(5), pp. 30-33. – EDN YRHAGT.

8. Suharev D.V. Dozhdeval'naya i polivnaya tehnika [Sprinkler and irrigation equipment]. Novocherkassk: Donskoj gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2020, 84 p. – EDN QDHLKI.

9. Chernyh, A.G. Issledovanie zon uvlazhneniya dozhdevatelej Nelson pri krugovom dvizhenii vodopodvodyashchego truboprovoda dozhdeval'noj mashiny [Study of the wetting patterns of Nelson sprinklers during the circular movement of the sprinkler machine's supply pipeline.]. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2025, no. 3(81), pp. 123-132. – DOI 10.24411/2078-1318-2025-3-123-132. – EDN XWZAXG.

10. Chernyh, A.G. Opredelenie zony smachivaniya dozhdevatelya v krugovyh samohodnyh dozhdeval'nyh ustanovkah [Determination of the sprinkler wetting zone in self-propelled circular irrigation systems]. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2024, no. 1(75), pp. 105-114. – DOI 10.24412/2078-1318-2024-1-105-114. – EDN LAKNYZ.

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 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: 20.09.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 29.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026

Сведения об авторе

Бузунова Марина Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, декан энергетического факультета. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, муниципальный район Иркутский, с.п. Молодежное, п. Молодежный, 1/1, тел.: 89500557333, e-mail: bmirk@mail.ru), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8911-5784>.

Information about the author

Marina Yu. Buzunova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Energy. Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky.

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk municipal district, Molodezhnoye village, Molodezhny, tel. 89500557333, e-mail bmirk@mail.ru), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8911-5784>.



DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-29-38

УДК 629.235.134

Научная статья

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСЛА В СИСТЕМЕ СМАЗКИ ДВС С ТУРБОНАДДУВОМ

А.В. Степанов, М.М. Разяпов, А.В. Неговора, А.А. Козеев, Р.Ж. Магафуров

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, Уфа, Россия

Аннотация: В статье представлены результаты исследований по моделированию процесса распределения масла в системе смазки двигателя при различных температурных условиях. Предложенный способ позволяет с минимальными затратами времени определить узлы или трущиеся поверхности, наиболее подверженные сухому или граничному трению при нарушении процесса распределения масла в системе смазки ДВС с двухрядным расположением цилиндров. В системе смазки двигателя с турбонаддувом моторное масло выполняет не только базовую задачу снижения трения, но и критически важные функции непосредственно для турбокомпрессора. В зимнее время масло густеет и плохо прокачивается по каналам, образуется конденсат, забиваются масляные каналы. Распределение масла в системе смазки двигателя направлено на недопущение масляного голодания высокооборотистого и высокотемпературного турбокомпрессора, который без смазки быстро выходит из строя. В теории и практике исследования конструкции ДВС наибольшую трудность представляет определение скорости потока моторного масла в каналах системы смазки. Доступным методом решения данной задачи является экспериментальное определение скорости путем измерения расхода жидкости. Для этого в работе было выбрано имитационное компьютерное моделирование с использованием специализированных программных комплексов. Моделирование в программном комплексе позволило получить недостающие данные для расчета по представленной методике. Путем моделирования исследованы возможности изменения конструктивных параметров узлов в системе смазки ДВС. Имитационные исследования показали, что изменение размеров трубок или каналов дают положительный эффект при низкотемпературных условиях, однако при рабочих температурах такие изменения приводят к нарушению баланса распределения масла, это показывает, что изменение конструктивных параметров нецелесообразно.

Ключевые слова: система смазки, масляный насос, сухое трение, граничное трение, турбокомпрессор, вязкость масла, низкие температуры.

Для цитирования: Степанов А.В., Разяпов М.М., Неговора А.В., Козеев А.А., Магафуров Р.Ж. Моделирование процесса распределения масла в системе смазки ДВС с турбонаддувом. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):29-38. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-29-38.

MODELING THE OIL DISTRIBUTION PROCESS IN THE LUBRICATION SYSTEM OF A TURBOCHARGED INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Alexander V. Stepanov, Makhmut M. Razyapov, Andrey V. Negovora,
Arseniy A. Kozeev, Ruslan Z. Magafurov

Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

Abstract: This article presents research results on modeling the oil distribution process within an engine lubrication system under various temperature conditions. The proposed method enables the identification with minimal time expenditure of components or friction surfaces most susceptible to dry or boundary friction in the event of a disruption in oil distribution within the lubrication system of an internal combustion engine (ICE) featuring a dual-bank cylinder arrangement. In the lubrication system of a turbocharged engine, engine oil performs not only the fundamental task of reducing friction but also critical functions specifically for the turbocharger. During winter, the oil thickens and flows poorly through the channels; condensation forms, and oil passages can become clogged. Oil distribution within the engine lubrication system aims to prevent oil starvation of the high-speed, high-temperature turbocharger, which fails rapidly without lubrication. In the theory and practice of ICE design research, determining the flow velocity of engine oil within lubrication system channels presents a significant challenge. An accessible method for addressing this task is the experimental determination of velocity by measuring fluid flow rate. To this end, the study employed computer-based simulation using specialized software suites. Simulation within the software environment made it possible to obtain the data required for calculations based on the presented methodology. The simulation also allowed for the investigation of potential modifications to the design parameters of the ICE lubrication system components. Simulation studies have shown that altering the dimensions of tubes or channels yields beneficial effects under low-temperature conditions; however, at operating temperatures, such changes disrupt the balance of oil distribution, indicating that modifying design parameters is not advisable.

Keywords: lubrication system, oil pump, dry friction, boundary friction, turbocharger, oil viscosity, low temperatures.

For citation: Stepanov A.V., Razyapov M.M., Negovora A.V., Kozeev A.A., Magafurov R.Zh. Modeling the oil distribution process in the lubrication system of a turbocharged internal combustion engine. *Electronic scientific-Practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2026; 3(60):29-38. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-29-38.

Введение. В сельском хозяйстве автомобильная и тракторная техника эксплуатируется в течение всего года с различной интенсивностью. Наиболее нагруженное время эксплуатации соответствует уборочной кампании, однако и в зимний период, автотракторная техника эксплуатируется ежедневно на таких видах работ, как: распределение и развоз кормов, транспортировка пассажиров-работников, вывоз продуктов животноводства, вывоз отходов, обслуживание территорий. Двигатели современных автомобилей, удовлетворяющих требованиям Евро I и выше, при эксплуатации в холодных климатических зонах штатно оснащаются предпусковыми подогревателями [4]. Однако предпусковой подогреватель двигателя не обеспечивает разогрев масла в

масляном картере ДВС, соответственно этих мероприятий недостаточно для обеспечения необходимого теплового режима узлов двигателя [7].

Согласно ГОСТ 54120-2010 “Двигатели автомобильные. Пусковые качества. Технические требования”, запуск двигателя любого автотранспортного средства (АТС) должен быть обеспечен при температуре окружающей среды (-45°C) в течение 36 мин; для многоцелевых автомобилей при (-50°C) за 30 мин; для всех АТС исполнения ХЛ (холодный климат) – при (-60°C) за 45 мин. Одним из важных мероприятий, способствующих успешному запуску двигателя при низких температурах, является разогрев картерного масла двигателя и отдельных деталей кривошипно-шатунного механизма до температуры, при которой обеспечивается минимальная пусковая частота вращения коленчатого вала, а количество масла с удовлетворительной прокачиваемостью в картере достаточно для заполнения всех каналов смазочной системы и узлов трения двигателя [3, 9]. Важно также совершенствовать системы предпусковой подготовки автотракторных дизелей в условиях низких температур [6] и интенсифицировать прогрев тракторных дизелей в условиях отрицательных температур [8].

Для теоретического исследования конструкции ДВС и выполнения соответствующих расчетов наибольшую трудность представляет определение скорости потока моторного масла в каналах системы смазки. Наиболее доступным методом решения данной задачи является экспериментальное определение скорости косвенным путем – через измерение расхода жидкости. Однако организация подобных экспериментов, требующая имитации различных вариантов конструктивного исполнения каналов и создания контролируемых температурных условий в широком диапазоне, сопряжена со значительными трудностями. Поскольку проведение натурных испытаний характеризуется высокой трудоемкостью и существенными материальными затратами, в качестве наиболее рационального способа определения поля скоростей было выбрано имитационное компьютерное моделирование с использованием специализированных программных комплексов. Таким образом, **целью исследования** является определение поля скоростей потока моторного масла в каналах системы смазки с помощью имитационного моделирования на основе специализированного программного обеспечения.

Материалы и методы. Моделирование выполнялось, как для отдельных узлов (рис. 1), так и для системы в сборе с последующим переносом геометрии в расчетный модуль гидродинамики SolidWorks Flow Simulation [2].

Для решения поставленной задачи применен пакет SolidWorks Flow Simulation, основанный на методе конечных элементов, который обеспечивает приемлемую точность расчета гидравлических характеристик. С его помощью проведен анализ распределения масла по каналам системы смазки при различных температурных условиях, охватывающих весь

рабочий диапазон двигателя. В рамках моделирования также исследовалось влияние модификации геометрических параметров отдельных каналов: увеличения диаметра входных отверстий в коленчатый вал на 1,5 и 2,0 мм, сужения выходных каналов турбокомпрессора на 2 и 3 мм, а также расширения линии нагнетания для второго турбокомпрессора на 2 и 3 мм.

Основные результаты. На первом этапе моделирования построена твердотельная модель системы смазки двигателя КАМАЗ 740,30 в программном комплексе Компас-3D, с дальнейшим импортом геометрий в среду SolidWorks Flow Simulation [1].

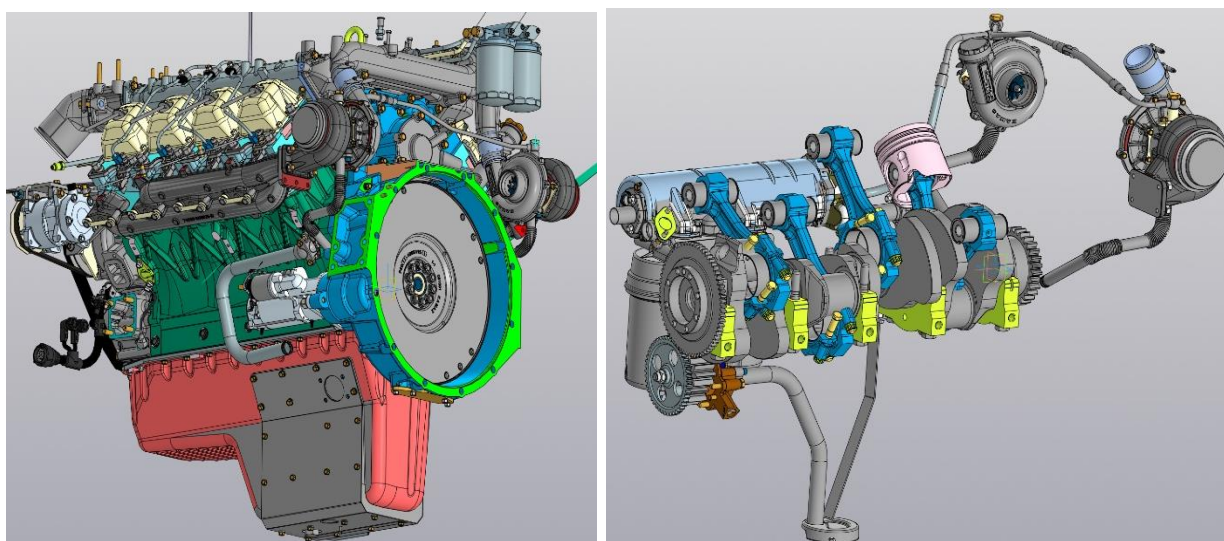


Рисунок 1 – Общий вид твердотельной модели ДВС КАМАЗ-740.30-260 и элементов системы смазки

Figure 1 – General view of the solid model of the KAMAZ-740.30-260 internal combustion engine and lubrication system components

На втором этапе заданы начальные условия моделирования: система единиц измерения, материал стенок каналов и свойства рабочей жидкости. В качестве жидкости задано моторное масло, при этом изменение температуры эксплуатации ДВС имитировалось корректировкой его вязкости и плотности [5].

Плотность масла для всего исследуемого температурного диапазона определялась по формуле (1):

$$\rho_t = \rho_{20} / (1 + \beta(t - 20)), \quad (1)$$

где ρ_t – плотность масла при температуре t °C (кг/м³ или г/см³); ρ_{20} – плотность того же масла при стандартной температуре 20 °C (кг/м³ или г/см³), β – температурный коэффициент объёмного расширения (1/град или °C⁻¹), t – температура, при которой нужно рассчитать плотность (°C).

Параметры масла для расчетов и задачи начальных условий при расчетах сведены в таблицу, в которой помимо температуры T (°K) и плотности масла при заданной температуре ρ_t , приведены удельная теплота

сгорания топлива C_p , коэффициент теплопроводности λ и динамическая вязкость μ .

Таблица – Температурная зависимость свойств масла

Table – Temperature dependence of oil properties

$T, ^\circ K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/(\text{кг} \times ^\circ C)}$	$\lambda, \text{Вт/(\text{м} \times ^\circ C)}$	$\mu, \text{Па} \times \text{с}$
233	928	1300	0.161	4
283	908	1645	0.154	3.54
293	901	1712	0.1476	1.856
303	893	1758	0.1454	0.618
313	884	1804	0.1463	0.303
323	877	1851	0.1438	0.164
343	839	2081	0.1285	0.0202

На следующем этапе заданы граничные условия и выбиралась текущая среда в модуле Flow Simulation. Материал всех твердотельных элементов для упрощения модели был принят единый – сталь. В завершение подготовки проекта задавались начальные условия внешней среды: температура, давление, параметры скорости и турбулентности.

Далее определялась расчетная область и задавались граничные условия. В качестве граничных условий для всех моделей выбраны вход гидравлического элемента и выход. При этом, при исследовании модели в сборе для упрощения, были заданы рабочие характеристики насоса, а в качестве входного указана полость нагнетания насоса. В качестве выхода указаны основные сопряжения и сливные трубки у турбокомпрессора, гидравлическими параметрами являлось давление окружающей среды [10]. При задаче граничных условий также указывается цель определения, для данного исследования во всех исследуемых проектах заданы в качестве цели – скорость и расход.

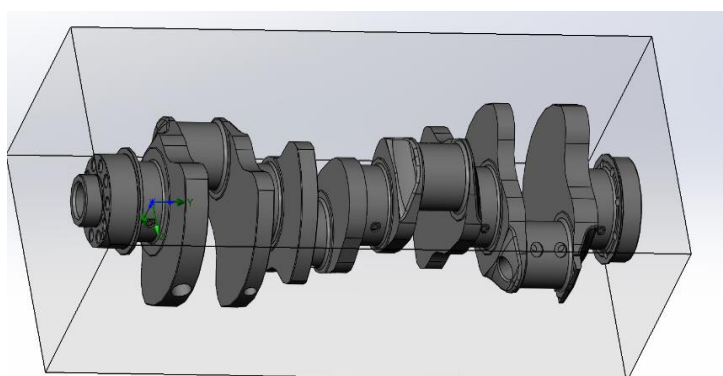


Рисунок 2 – Указание и выбор граничных условий при исследовании коленчатого вала

Figure 2 – Specification and selection of boundary conditions for the crankshaft analysis

После задачи граничных условий выполнялся процесс расчета. Расчет выполнялся в отдельном модуле. Анализ результатов расчета (рис. 3-5) показал, что распределение потока является достаточно равномерным со средней скоростью масла около 3.7 м/с. При этом скорость потока масла в канале смазывания втулки ротора турбокомпрессора составляет значение 0-3.7 м/с. Карты распределения давления в турбокомпрессорах представлены на рисунках 3-5.

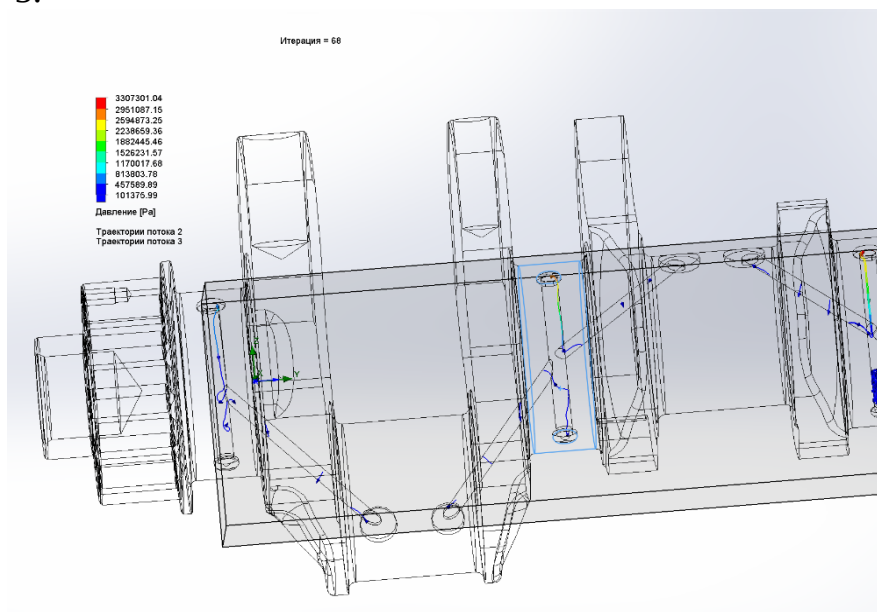


Рисунок 3 – Карта поля распределения давления масла в коленчатом валу при температуре масла минус 40 градусов

Figure 3 – Map of the oil pressure distribution field in the crankshaft at an oil temperature of minus 40 degrees

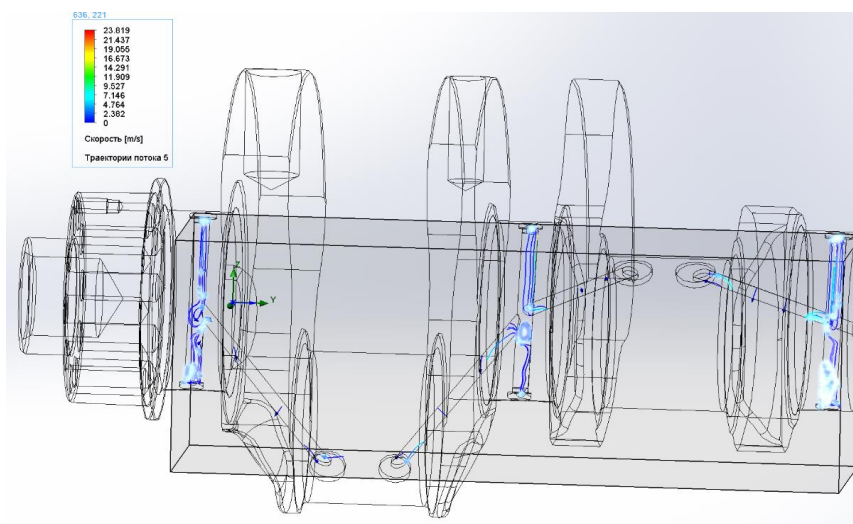


Рисунок 4 – Карта поля распределения скорости потока масла в коленчатом валу при температуре масла 10 градусов

Figure 4 – Map of the oil flow velocity distribution in the crankshaft at an oil temperature of 10 degrees

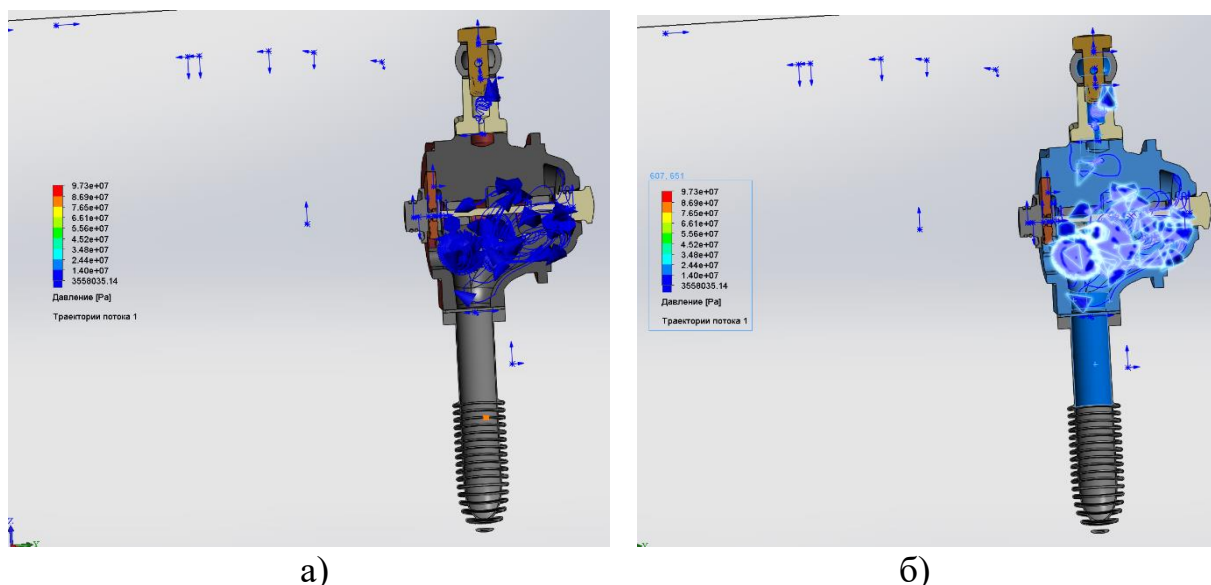


Рисунок 5 – Карта поля распределения давления масла в турбокомпрессорах
 а) дальнего, б) ближнего

Figure 5 – Oil pressure distribution map in turbochargers:
 a) far, b) near

Выводы. Моделирование с помощью программного комплекса позволило получить данные для расчета распределения масла в системе смазки двигателя при различных температурных условиях.

Путем моделирования при наименьших ресурсных затратах исследованы возможности изменения конструктивных параметров для узлов системы смазки ДВС.

Имитационное моделирование показало, что изменение размеров трубок или каналов дают положительный эффект при низкотемпературных условиях, однако при рабочих температурах такие изменения приводят к нарушению баланса распределения масла. По этой причине изменение конструктивных параметров нецелесообразно.

Список литературы

1. Агрегаты трансмиссии автомобилей КамАЗ, устройство, эксплуатация, обслуживание и ремонт // ОАО “КамАЗ”. – Набережные Челны, 2008. – С. 232-238.
2. Габитов, И.И. Интеллектуализация технического обслуживания и ремонта автотракторной и комбайновой техники / И.И. Габитов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3 (47). – С. 13-17.
3. Габитов, И.И. Оптимизация процесса тепловой подготовки сельскохозяйственной техники в условиях низких температур / И.И. Габитов, А.В. Неговора, М.М. Рязанов, Д.А. Гусев // Технический сервис машин. – 2019. – № 1 (134). – С. 122-130.
4. Гореев, А.А. Разработка газотопливного подогревателя дизельного двигателя / А.А. Гореев, Н.Н. Бережнов // Агропромышленному комплексу – новые идеи и решения: матер. XXII внутривузовской научно-практ. конф., Кемерово, 03 февраля 2023 года. – Кемерово: ФГБОУ ВО Кузбасская ГСХА, 2023. – С. 287-294. – EDN ADVDRD

5. Неговора, А.В. Предпусковая подготовка двигателя и агрегатов трансмиссии автомобиля к принятию нагрузки / А.В. Неговора, М.М. Разяпов, Ю.К. Филиппов // Известия МAAO, т. 1. – 2012. – №14. – С. 265-270.

6. Неговора, А.В. Совершенствование системы предпусковой подготовки автотракторных дизелей в условиях низких температур / А.В. Неговора, Р.А. Байрамов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 5. – С. 49-50. – EDN JJZWYP.

7. Неговора, А.В. Современная концепция тепловой подготовки автотракторной техники в условиях низких температур / А.В. Неговора, М.М. Разяпов, С.З. Инсафуддинов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4 (48). – С. 135-141.

8. Сырбаков, А.П. Интенсификация прогрева тракторных дизелей в условиях отрицательных температур / А.П. Сырбаков, С.П. Матяш // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера: сб. матер. IV Всерос. форума, Якутск, 28-29 марта 2024 года. – Якутск: Издат. дом СВФУ, 2024. – С. 150-155. – EDN QYMLVI.

9. Черноиванов, В.И. Цифровые технологии и электронные средства в системе технического обслуживания и ремонта автотракторной и комбайновой техники / В.И. Черноиванов, И.И. Габитов, А.В. Неговора // Труды ГОСНИТИ. – 2018. – Т. 130. – С. 74-81.

10. Korchuganova, M. et al. Research of the pre-launch powered lubrication device of major parts of the engine D-240. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, P. 012092.

References

1. Agregaty transmissii avtomobilej KamAZ, ustrojstvo, ehkspluatatsiya, obsluzhivanie i remont [KamAZ vehicle transmission units: design, operation, maintenance, and repair]. Naberezhnye Chelny, 2008, pp. 232-238.

2. Gabitov I.I. Intellectualizatsiya tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta avtotraktornoj i kombajnoj tehniki [Intellectualization of maintenance and repair for automotive, tractor, and combine machinery]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2018, no. 3 (47), pp. 13-17.

3. Gabitov, I.I. et al. Optimizatsiya processa teplovoj podgotovki sel'skohozyajstvennoj tehniki v usloviyah nizkih temperatur. [Optimization of the thermal preparation process for agricultural machinery in low-temperature conditions]. Tehnicheskij servis mashin, 2019, no. 1 (134), pp. 122-130.

4. Goreev, A.A., Berezhnov, N.N. Razrabotka gazotoplivnogo podogrevatelya dizel'nogo dvigatelya [Development of a gas-fueled preheater for diesel engines]. Kemerovo, 2023, pp. 287-294. – EDN ADVRDR

5. Negovora, A.V. et al. Predpuskovaya podgotovka dvigatelya i agregatov transmissii avtomobilya k prinyatiyu nagruzki [Pre-start preparation of the vehicle engine and transmission units for load application]. Izvestiya MAAO, 2012, vol. 1, no. 14, pp. 265-270.

6. Negovora, A.V., Bayramov, R.A. Sovershenstvovanie sistemy predpuskovoj podgotovki avtotraktornyh dizelej v usloviyah nizkih temperatur [Improvement of the pre-start preparation system for automotive and tractor diesel engines in low-temperature conditions]. Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny, 2008, no. 5, pp. 49-50. – EDN JJZWYP.

7. Negovora, A.V. et al. Sovremennaya koncepciya teplovoj podgotovki avtotraktornoj tehniki v usloviyah nizkih temperatur [Modern concept of thermal preparation for automotive and tractor machinery in low-temperature conditions]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2018, no. 4 (48), pp. 135-141.

8. Syrbakov, A.P., Matyash, S.P. Intensifikatsiya progreva traktornyh dizelej v usloviyah otricatel'nyh temperatur [Intensification of tractor diesel engine warm-up in sub-zero temperatures]. Yakutsk, 2024, pp. 150-155. – EDN QYMLVI.

9. Chernoi Ivanov, V.I. et al. Cifrovye tehnologii i ehlektronnye sredstva v sisteme tehnikeskogo obsluzhivaniya i remonta avtotraktornoj i kombajnovoj tehniki. [Digital technologies and electronic systems in the maintenance and repair of automotive, tractor, and combine machinery]. Trudy GOSNITI, 2018, vol. 130, pp. 74-81.

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: 23.09.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 29.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026

Сведения об авторах

Степанов Александр Валерьевич – инженер. ФГБОУ ВО “Башкирский государственный аграрный университет”.

Контактная информация: ФГБОУ ВО “Башкирский государственный аграрный университет”, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: stepanov14@rambler.ru. .

Разяпов Махмут Магдатович – доктор технических наук, профессор кафедры “Мобильные энергетические и транспортные средства”. Башкирский государственный аграрный университет.

Контактная информация: Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, 50-летия Октября, 34, e-mail: Mahmut.87@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6448-736X>.

Неговора Андрей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Мобильные энергетические и транспортные средства”. Башкирский государственный аграрный университет.

Контактная информация: Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, 50-летия Октября, 34, e-mail: AVNegovora@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>.

Козеев Арсений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры “Мобильные энергетические и транспортные средства”. Башкирский государственный аграрный университет.

Контактная информация: Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, 50-летия Октября, 34, e-mail: k.arsen.a@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-0247>.

Магафуров Руслан Жамилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры “Мобильные энергетические и транспортные средства”. Башкирский государственный аграрный университет.

Контактная информация: Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, 50-летия Октября, 34, e-mail: bizon-m79@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8821-2769>.

Information about the authors

Alexander V. Stepanov – Engineer. Bashkir State Agrarian University.

Contact information: Bashkir State Agrarian University, 34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa, 450001, Russia. e-mail: stepanov14@rambler.ru.

Makhmut M. Razyapov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mobile Power and Transport Vehicles. Bashkir State Agrarian University.

Contact information: Bashkir State Agrarian University, 34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa, 450001, Russia. e-mail: Mahmut.87@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6448-736X>.

Andrey V. Negovora – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mobile Power and Transport Vehicles. Bashkir State Agrarian University.

Contact information: Bashkir State Agrarian University, 34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa, 450001, Russia. e-mail: AVNegovora@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>.

Arseniy A. Kozeev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mobile Power and Transport Vehicles. Bashkir State Agrarian University.

Contact information: Bashkir State Agrarian University, 34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa, 450001, Russia. e-mail: k.arsen.a@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-0247>.

Ruslan Zh. Magafurov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mobile Power and Transport Vehicles. Bashkir State Agrarian University.

Contact information: Bashkir State Agrarian University, 34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa, 450001, Russia. e-mail: bizon-m79@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8821-2769>.



DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-39-48

УДК 621.892:004.8

Научная статья

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПО “КАПЕЛЬНОЙ ПРОБЕ” ПРИ ПОМОЩИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В.Н. Хабардин, И.А. Лончаков

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
*п. Молодежный, с.п. Молодежное, муниципальный район Иркутский,
Иркутская область, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к автоматизации метода экспресс-оценки состояния моторных масел по “капельной пробе” с применением технологий искусственного интеллекта. Традиционная методика, регламентированная ГОСТ 20793-2023 (приложение А), основана на визуальной интерпретации масляного пятна оператором, что вносит субъективность в результаты диагностики. Проанализированы существующие аппаратные и программные решения для оцифровки “капельной пробы”, включая портативные фотокамеры, планшетные сканеры и специализированные датчики. Особое внимание уделено методам компьютерного зрения и глубокого обучения для автоматического распознавания структурных компонентов пятна – ядра, краевой зоны, зоны диффузии и внешнего кольца чистого масла. Приведены результаты сравнительного анализа точности экспертной и автоматизированной оценки по показателям: загрязненности, диспергирующе-стабилизирующим свойствам, обводненности. Показано, что использование сверточных нейронных сетей позволяет повысить точность классификации масляного пятна по шестибальной шкале ГОСТ 20793-2023 до 92%, что превосходит экспертную оценку (78-85%) и полностью исключает субъективный фактор. Время собственно оценки сокращается с 2-10 минут (у человека) до 1-2 минут (у ИИ). Определены основные преимущества автоматизированной оценки: объективность, возможность количественного измерения параметров, автоматическое протоколирование, интеграция в мобильные приложения. К ограничениям отнесены потребность в калибровке оборудования, чувствительность к типу фильтровальной бумаги и необходимость больших размеченных выборок для обучения нейросетей. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются создание открытых массивов данных масляных пятен, разработка легковесных нейросетевых архитектур для мобильных устройств, интеграция с облачными сервисами и комбинирование “капельной пробы” с другими экспресс-методами диагностики.

Ключевые слова: моторное масло, капельная проба, экспресс-контроль, искусственный интеллект, компьютерное зрение, машинное обучение.

Для цитирования: Хабардин В.Н., Лончаков И.А. Анализ методов и средств экспресс-оценки моторных масел по “капельной пробе” при помощи искусственного интеллекта. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):39-48. DOI: 10.51215/2411-6483-2026-60-39-48.

Research Article

ANALYSIS OF METHODS AND TOOLS FOR THE RAPID ASSESSMENT OF ENGINE OILS USING THE “DROP TEST” AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Vasily N. Khabardin, Ivan A. Lonchakov

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
Molodezhny, Molodezhnoye rural settlement, Irkutsk municipal district, Irkutsk region, Russia

Abstract. This article examines modern approaches to automating the rapid assessment of engine oil condition using the “drop test” method and artificial intelligence technologies. The traditional methodology, regulated by GOST 20793-2023 (appendix A), relies on an operator’s visual interpretation of the oil spot, introducing subjectivity into the diagnostic results. Existing hardware and software solutions for digitizing the “drop test” including portable cameras, flatbed scanners, and specialized sensors are analyzed. Particular attention is paid to computer vision and deep learning methods for the automatic recognition of the spot’s structural components: the core, the marginal zone, the diffusion zone, and the outer ring of clean oil. The results of a comparative analysis regarding the accuracy of expert versus automated assessments are presented, focusing on contamination levels, dispersing-stabilizing properties, and water content. It is demonstrated that the use of convolutional neural networks enables the classification accuracy of oil spots based on the six-point scale of GOST 20793-2023 to reach 92%, surpassing expert assessment (78-85%) and completely eliminating the subjective factor. The actual assessment time is reduced from 2-10 minutes (for a human) to 1-2 minutes (for AI). The key advantages of automated assessment have been identified: objectivity, the ability to quantitatively measure parameters, automatic logging, and integration into mobile applications. Limitations include the need for equipment calibration, sensitivity to the type of filter paper, and the requirement for large, annotated datasets to train neural networks. Promising avenues for future research include creating open datasets of oil spots, developing lightweight neural network architectures for mobile devices, integrating with cloud services, and combining the “drop test” with other rapid diagnostic methods.

Keywords: engine oil, drop test, rapid monitoring, artificial intelligence, computer vision, machine learning.

For citation: Khabardin V.N., Lonchakov I.A. Analysis of methods and tools for the rapid assessment of engine oils using the “drop test” and artificial intelligence. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2026; 3(60):39-48. DOI: 10.51215/2411-6483-2026-60-39-48.

Введение. Контроль качества моторного масла является важнейшим элементом технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания и, понятно, связан с экологическими проблемами эксплуатации сельскохозяйственной техники [9]. Своевременная замена масла по фактическому состоянию, а не по регламенту, позволяет продлить ресурс двигателя, снизить эксплуатационные расходы и предотвратить аварийные отказы [10, 11]. Метод “капельной пробы”, регламентированный ГОСТ 20793-2023 (приложение А), остается одним из самых доступных и распространенных способов экспресс контроля работающих масел благодаря простоте исполнения и минимальным требованиям к оборудованию [3, 5].

Сущность метода заключается в нанесении капли горячего масла на

лабораторную фильтровальную бумагу по ГОСТ 12026 и последующей визуальной оценке масляного пятна после его растекания в течение 10-15 минут [4, 5]. На пятне выделяют четыре структурных компонента: ядро, краевую зону, зону диффузии загрязненного масла и внешнее кольцо чистого масла. По соотношению диаметров этих зон, их цвету и характеру границ оценивают диспергирующе-стабилизирующие свойства (ДСС), загрязненность, обводненность и степень окисления масла. Пятна классифицируются по шестибалльной шкале: от светло-серого (свежее масло) до черного мажеобразного (масло-брак, требующее немедленной замены) [5] (рис. 2). Однако, несмотря на широкое распространение, традиционная методика имеет существенный недостаток – высокую субъективность оценки, зависящую от опыта и квалификации оператора, а также от условий освещения.

Как будет показано далее, время анализа для разных методов существенно различается, поэтому здесь необходимо сделать важную оговорку. Следует отметить, что рассматриваемое в настоящей работе время анализа относится исключительно к этапу цифровой обработки уже полученного масляного пятна и не включает предшествующие операции, регламентированные ГОСТ 20793-2023: отбор пробы масла из картера прогретого двигателя, нанесение третьей капли горячего масла с медной проволоки на фильтровальную бумагу и выдержку пятна в течение 10-15 минут до полного растекания.

Современные тенденции в области технической диагностики связаны с внедрением цифровых технологий и методов искусственного интеллекта, позволяющих автоматизировать процессы распознавания образов и принятия решений [2].

Цель работы – анализ существующих методов и средств автоматизации оценки “капельной пробы” моторного масла с применением искусственного интеллекта (ИИ), а также определение перспективных направлений их развития.

Материалы и методы. Проведённый анализ научно-технической литературы и патентных источников позволил выделить три основных подхода к автоматизации метода “капельной пробы”. Для оцифровки масляного пятна исследователями предложены различные технические решения: серийные планшетные сканеры, цифровые фотокамеры с фиксированной подсветкой, микроскопы с USB-интерфейсом. Основными требованиями к устройствам регистрации являются стабильность условий освещения и высокая разрешающая способность для детальной передачи структуры пятна. В работе [5, 7, 8] обосновано применение стандартного планшетного сканера как наиболее доступного и стабильного средства оцифровки, обеспечивающего равномерное освещение и фиксированное расстояние до образца. Для полевых условий перспективным является использование камер смартфонов с калибровочной рамкой [1].

Основные результаты. Цифровая обработка масляных пятен включает

несколько этапов: предварительная фильтрация (подавление шумов, коррекция неравномерности освещения), сегментация (выделение структурных зон пятна), вычисление геометрических и яркостных признаков. Традиционные алгоритмы сегментации основаны на пороговой обработке гистограмм яркости по каждому цветовому каналу (RGB, HSL) [5]. Более сложные методы используют кластеризацию пикселей в многомерном цветовом пространстве. Извлеченные признаки – эквивалентные диаметры ядра, краевой зоны, зоны диффузии, средняя яркость в каждой зоне, отношение диаметров d_2/d_1 и d_3/d_2 – служат входными данными для автоматической балльной оценки. Недостатком традиционных алгоритмов является их чувствительность к вариациям условий регистрации и типа бумаги [6, 7].

На рисунке 1 приведено обозначение структурных компонентов масляного пятна.

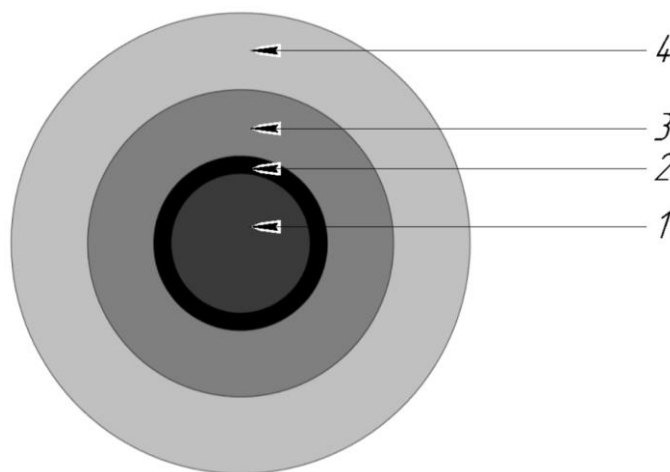


Рисунок 1 – Обозначение структурных компонентов масляного пятна по ГОСТ-20793-2023: 1 – ядро (Я), 2 – краевая зона (К), 3 – зона диффузии загрязнённого масла, 4 – внешнее кольцо чистого масла

Figure 1 – Designation of the structural components of an oil slick according to GOST 20793-2023: 1 – core (C), 2 – edge zone (E), 3 – contaminated oil diffusion zone, 4 – outer ring of clean oil.

Наиболее перспективным направлением является использование методов глубокого обучения, в частности сверточных нейронных сетей (CNN). В работе [3, 5] показано, что CNN, обученные на базе из нескольких тысяч размеченных изображений масляных пятен, способны классифицировать пятна по шестибалльной шкале с точностью классификации до 92%, что сопоставимо с точностью экспертной оценки, но исключает субъективный фактор. Архитектуры типа ResNet и EfficientNet позволяют автоматически выделять иерархические признаки – от простых градиентов яркости до семантических зон диффузии – без ручной настройки алгоритмов сегментации [7, 10]. Для задач определения обводненности по неровности краев пятна успешно

применяются методы семантической сегментации (U-Net), которые показывают точность выделения границ на уровне 0.85 по метрике IoU.

Прежде чем перейти к сравнительной таблице, рассмотрим подробнее, какие именно эксплуатационные показатели масла позволяет оценить метод “капельной пробы” – как при визуальном, так и при автоматизированном анализе.

Метод “капельной пробы”, регламентированный приложением А ГОСТ 20793-2023, позволяет получить комплексную информацию о целом ряде эксплуатационных свойств работающего моторного масла, каждый из которых прямо или косвенно отражает техническое состояние как самого смазочного материала, так и сопряженных с ним узлов двигателя. К числу таких ключевых показателей относятся диспергирующе-стабилизирующие свойства (ДСС), загрязненность, обводненность, термическая деструкция (перегрев), запас щелочных присадок и склонность масла к необратимому шламообразованию.

Свойства, определяемые по соотношению диаметров кольцевых зон пятна (внутреннего кольца к ядру и внешнего кольца к внутреннему), характеризуют способность масла удерживать нерастворимые частицы загрязнений во взвешенном состоянии, предотвращая их коагуляцию и выпадение в осадок; падение ДСС проявляется в прогрессирующем уменьшении наружного диаметра пятна d_3 вплоть до полного исчезновения внешнего кольца чистого масла.

Загрязненность визуально выражается в последовательном потемнении всех структурных зон – от светло-серого до густо-черного цвета, а количественная оценка возможна через измерение оптической плотности зоны диффузии с помощью индикатора загрязненности жидкостей или цифровых колориметрических средств.

Присутствие воды в масле, будь то технологический конденсат или протечки охлаждающей жидкости, индицируется появлением рваных краев масляного пятна, растеканием водяных струек на начальном этапе распространения капли, а в более выраженных случаях – потрескиванием или вспениванием пробы при нагреве от 95 до 180 °С, что особенно критично для безотказной работы подшипников скольжения и гидрокомпенсаторов.

На термическую деструкцию масла и сопутствующий перегрев двигателя указывает появление нехарактерного желтого, светло-коричневого либо темно-коричневого оттенка масляного пятна, свидетельствующего о глубоких окислительных процессах в базовой основе масла.

Отдельного внимания заслуживают так называемые “водяные знаки” – концентрические светлые области, возникающие в результате взаимодействия щелочных присадок масла с компонентами фильтровальной бумаги; степень их выраженности служит косвенным, но достаточно надежным индикатором остаточного запаса нейтрализующих свойств масла, и постепенное ослабление или исчезновение этих знаков сигнализирует о необходимости досрочной замены масла даже при удовлетворительных значениях других параметров.

Наконец, крайней формой деградации масла является полная потеря диспергирующе-стабилизирующих свойств, когда капля масла не распространяется по бумаге (пятно № 6 по классификации ГОСТ), что свидетельствует об образовании стойкого шлама, забивающего масляные каналы и способного вызвать аварийный отказ двигателя.

Типовые масляные пятна по ГОСТ 20793-2023 приведены на рисунке 2.

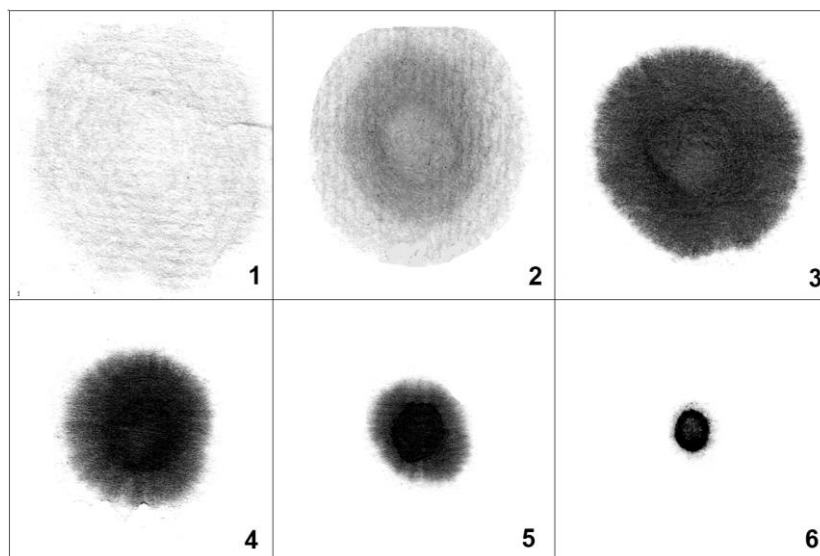


Рисунок 2 – Характеристика масляных пятен по ГОСТ-20793-2023:

1 – практически свежее масло; 2 – классическая “капельная проба” с наружным кольцом чистого масла, с внутренним кольцом незначительно загрязненного масла (зона диффузии), со светло-серым ядром и “водяными знаками”; 3, 4 – отсутствие внешнего кольца чистого масла, уменьшение диаметра пятна из-за укрупнения механических примесей вследствие уменьшения ДСС; 5 – неровная форма ядра и всего пятна из-за обводнения масла; пятна 4 и 5 – предельное состояние масла; 6 – “свертывание капельной пробы”, т.е. капля по фильтровальной бумаге не распространяется из-за образования шлама при длительном обводнении масла

Figure 2 – Characteristics of oil stains according to GOST-20793-2023:

1 is practically fresh oil; 2 – is a classic “drip sample” with an outer ring of pure oil, with an inner ring of slightly contaminated oil (diffusion zone), with a light gray core and “watermarks”; 3, 4 is the absence of an outer ring of pure oil, a decrease in the diameter of the stain due to the enlargement of mechanical impurities. due to a decrease in the DSS; 5 – uneven shape of the core and the entire spot due to oil flooding; spots 4 and 5 – the limiting state of the oil; 6 – “coagulation of the drip sample”, i.e. a drop on the filter paper does not spread due to the formation of sludge during prolonged watering of the oil.

Очевидно, что традиционная визуальная оценка требует от оператора-эксперта одновременной интерпретации всей совокупности перечисленных признаков, что неизбежно вносит субъективный фактор и ограничивает воспроизводимость результатов. Именно поэтому системы, основанные на компьютерном зрении и глубоких нейронных сетях, представляют интерес не только с точки зрения автоматической балльной классификации, но и в плане объективного количественного измерения отдельных показателей:

относительных диаметров зон, оптической плотности, цветового тона, равномерности краев пятна и контраста “водяных знаков”.

В таблице приведены обобщенные сведения о том, какие именно из перечисленных контролируемых показателей способен фиксировать каждый из рассмотренных методов анализа масляных пятен.

Таблица – Сравнительная характеристика методов оценки масляных пятен и контролируемых показателей по ГОСТ 20793-2023

Table – Comparative characteristics of oil stain assessment methods and controlled parameters according to GOST 20793-2023

Характеристика	Экспертная визуальная	Традиционная обработка изображений	Нейронные сети (CNN)	Мобильные приложения
Точность классификации, %	78-85	70-80	88-95	82-90
Время выдержки пятна (ГОСТ 20793-2023, п. А.1.3), мин	10-15	10-15	10-15	10-15
Время собственно оценки (интерпретации), мин	2-10 (зависит от квалификации)	1-2	1-2	0.5-1
Общее время от нанесения капли до результата, мин	12-25	11-17	11-17	10.5-16
Субъективность	Высокая	Низкая	Отсутствует	Низкая
Требования к оборудованию	Минимальные	Сканер/камера + ПО	Сканер/камера + GPU	Смартфон
Контролируемые показатели	ДСС, загрязнённость, обводнённость, перегрев, запас щелочных свойств, склонность к шламообразованию	Загрязнённость (по цвету), ДСС (по диаметрам зон), частично обводнённость (по форме пятна)	ДСС, загрязнённость, обводнённость, перегрев, классификация по баллам (1-6), выявление “водяных знаков”	Загрязнённость, ДСС, обводнённость, балльная оценка

Результаты анализа показывают, что автоматизированные методы на основе ИИ достигают высокой точности классификации результата, сопоставимой или превосходящей экспертную оценку, при этом время собственно оценки сокращается с 2-10 минут до 1-2 минут и полностью исключается субъективность.

В процессе анализа установлены следующие преимущества автоматизированной оценки “капельной пробы”:

1. Объективность результатов независимо от квалификации и утомляемости оператора.

2. Возможность количественного измерения параметров, трудно оцениваемых визуально (например, отношение диаметров зон с точностью

до десятых долей).

3. Автоматическое протоколирование результатов с созданием базы данных для отслеживания динамики износа масла.

4. Интеграция в мобильные приложения для полевого использования обслуживающим персоналом [1].

К основным ограничениям относятся: потребность в калибровке оборудования, чувствительность к типу используемой фильтровальной бумаги, необходимость в больших размеченных выборках для обучения нейросетей.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: создание открытых массивов данных масляных пятен для различных типов масел; разработка легковесных нейросетевых архитектур для исполнения на мобильных устройствах; интеграция автоматической оценки с облачными сервисами для централизованного мониторинга состояния парка машин; комбинирование “капельной пробы” с другими экспресс-методами (вискозиметрия, измерение диэлектрической проницаемости) для комплексной диагностики масла.

Выводы. Традиционный метод “капельной пробы” по ГОСТ 20793-2023 характеризуется высокой субъективностью результатов, что ограничивает его применение в системах обслуживания техники по фактическому состоянию.

Современные методы компьютерного зрения и глубокого обучения позволяют автоматизировать интерпретацию масляных пятен с точностью классификации до 92%.

Наиболее перспективной архитектурой для реализации системы автоматической оценки являются сверточные нейронные сети, обученные на больших выборках масляных пятен, в сочетании с калиброванными устройствами оцифровки.

Внедрение технологий ИИ в экспресс-контроль моторных масел позволит перейти к объективному мониторингу состояния смазочных материалов и прогнозированию сроков их замены, что приведет к снижению эксплуатационных затрат на 15-20%.

Список литературы

1. Белогорский, В.В. Повышение эффективности экспресс-методов и средств контроля качества моторных масел: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Белогорский Владимир Васильевич. – Мичуринск-Наукоград, 2009. – 187 с.
2. Власов, Ю.А. Методология диагностики агрегатов автомобилей электрофизическими методами контроля параметров работающего масла : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.10 / Ю.А. Власов. – Томск, 2015. – 386 с.
3. ГОСТ 20793-2023. Тракторы и машины сельскохозяйственные. Техническое обслуживание. – Введ. 2023-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2023. – 18 с.
4. ГОСТ 28365-89. Масла моторные. Метод оценки моюще-диспергирующих свойств по “капельной пробе”. – Введ. 1990-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 8 с.
5. Дунаев, А.В. Экспресс-контроль масла, определение срока его смены и диагностирования состояния агрегатов машин / А.В. Дунаев, М.Н. Костомахин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2019. – № 3. – С. 36-43.
6. Остриков, В.В. Повышение эффективности экспресс-методов и средств контроля

качества моторных масел: монография / В.В. Остриков, Т.К. Уразгалиев, Д.Р. Гайнеддинова [и др.]. – Уралск: ЗКАТУ, 2012. – 156 с. – ISBN 978-601-7354-18-4.

7. Томилов, А.А. Способ и устройство для экспресс-сравнения состояния и качества моторных масел / А.А. Томилов, А.С. Канищев, А.Е. Ломовских, И.С. Армянинов // Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2021. – Т. 83, № 1. – С. 240-246.

8. Уразгалиев, Т.К. Экспресс-контроль качества работающих моторных масел / Т.К. Уразгалиев, В.В. Остриков, Д.Р. Гайнеддинова, А.М. Ермаханова // Наука и образование. – 2012. – № 1 (26). – С. 118-121.

9. Хабардин В.Н. Эффективность утилизации нефтесодержащих отходов производства при эксплуатации машин биологическим методом /В.Н.Хабардин, Ю.А.Фальчевская, Н.О. Шелкунова //Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”. 2025; 2(55):46-56. DOI 10.51215/2411-6483-2025-55-46-56.

10. Хазиев, А.А. Обоснование применения методов экспресс-контроля моторного масла в предприятиях автомобильного сервиса / А.А. Хазиев, Н.В. Колдаев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2014. – № 2. – С. 12-19.

11. Шиганов, И.Н. Экспресс-метод лазерного контроля вязкости смазочных материалов в процессе эксплуатации машин и механизмов / И.Н. Шиганов, Д.М. Мельников, М.А. Якимов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 88-97.

References

1. Belogorskij, V.V. Povyshenie effektivnosti ekspress-metodov i sredstv kontrolya kachestva motornyh masel [Improving the efficiency of rapid methods and tools for monitoring motor oil quality]. Dis.kand. tehn. nauk, Michurinsk-Naukograd, 2009, 187 p.

2. Vlasov, Yu.A. Metodologiya diagnostiki agregatov avtomobilej elektrofizicheskimi metodami kontrolya parametrov rabotayushego masla [Methodology for diagnosing automotive assemblies using electrophysical methods to monitor operating oil parameters]. Dis.d-ra tehn. nauk, Tomsk, 2015, 386 p.

3. GOST 20793-2023. Traktory i mashiny sel'skohozyajstvennyye. Tehnicheskoe obsluzhivanie [Agricultural tractors and machinery. Maintenance]. Moscow: Standartinform, 2023, 18 p.

4. GOST 28365-89. Masla motornye. Metod ocenki mojushe-dispergiruyushih svoystv po “kapelnoj probe” [Engine oils. Method for evaluating detergency and dispersancy using the "drop test"]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989, 8 p.

5. Dunaev, A.V., Kostomahin, M.N. Ekspress-kontrol masla, opredelenie sroka ego smeny i diagnostirovaniya sostoyaniya agregatov mashin [Rapid oil analysis, determination of oil change intervals, and diagnostics of machinery unit condition.]. Selskohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont, 2019, no. 3, pp. 36-43.

6. Ostrikov, V.V. et all. Povyshenie effektivnosti ekspress-metodov i sredstv kontrolya kachestva motornyh masel [Improving the efficiency of rapid methods and tools for monitoring motor oil quality]. Uralsk: ZKATU, 2012, 156 p. – ISBN 978-601-7354-18-4.

7. Tomilov, A.A. et all. Spособ i ustrojstvo dlya ekspress-sravneniya sostoyaniya i kachestva motornyh masel [Method and device for the rapid comparison of the condition and quality of engine oils]. Vestnik Voronezhskogo gos. universiteta inzhenernyh tekhnologij, 2021, vol. 83, no. 1, pp. 240-246.

8. Urazgaleev, T.K. et all. Ekspress-kontrol kachestva rabotayushih motornyh masel [Rapid quality monitoring of in-service engine oils]. Nauka i obrazovanie, 2012, no. 1 (26), pp. 118-121.

9. Khabardin, V.N., Fal'chevskaya Yu.A., Shelkunova N.O. Effektivnost' utilizatsii neftesoderzhashchikh otkhodov proizvodstva pri ekspluatatsii mashin biologicheskim metodom [Efficiency of the biological method for disposing of oil-containing industrial waste generated during machinery operation]. Elektronnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal “Aktual'nyye voprosy

agrarnoy nauki”, 2025, vol. 2(55), pp.46-56.

10. Haziev, A.A., Koldaev, N.V. Obosnovanie primeneniya metodov ekspress-kontrolya motornogo masla v predpriyatiyah avtomobilnogo servisa [Justification for the Use of Rapid Engine Oil Monitoring Methods in Automotive Service Facilities]. Avtomobil. Doroga. Infrastruktura, 2014, no. 2, pp. 12-19.

11. Shiganov, I.N. et all. Ekspress-metod lazernogo kontrolya vyazkosti smazochnykh materialov v processe ekspluatatsii mashin i mekhanizmov [Rapid laser-based method for monitoring the viscosity of lubricants during the operation of machines and mechanisms]. Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie, 2017, no. 1, pp. 88-97.

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: 25.09.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 28.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026

Сведения об авторах

Хабардин Василий Николаевич – заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации МТП, БЖД и ПО инженерного факультета. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел.: 89500809286, e-mail: HabardinV@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9201-2492>.

Лончаков Иван Анатольевич – магистрант 2 курса, напр. подгот. 35.04.06 – Агроинженерия инженерного факультета. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодёжный, тел.: 89027600642, e-mail: ilonchakov@yandex.ru.

Information about the authors

Vasily N. Khabardin – Honored Inventor of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation of the Machine and Tractor Fleet, Life Safety and Vocational Training, 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.: 89500809286, e-mail: HabardinV@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9201-2492>.

Ivan A. Lonchakov – Is a 2nd-year master's student, for example. 04/35/06 – Agroengineering of the 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.: 89027600642, e-mail: ilonchakov@yandex.ru



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

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

DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-49-65

УДК 519.863:633/.635:637

Научная статья

**КЛАССИФИКАЦИЯ МНОГОЭТАПНЫХ МОДЕЛЕЙ В
УПРАВЛЕНИИ АГРАРНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

М.Н. Полковская

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
*п. Молодежный, с.п. Молодежное, муниципальный район Иркутский,
Иркутская область, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена многоэтапностью технологических процессов в сельском хозяйстве, циклическим характером производства, а также значительной неопределенностью производственно-экономических показателей, имеющих интервальную или стохастическую природу. Представлена классификация задач математического программирования по ряду признаков: степени агрегирования объектов моделирования, типу параметров (детерминированные, стохастические, интервальные), числу критериев оптимизации, учету фактора времени, типу аналитических выражений, множеству значений переменных, влиянию экстремальных природных явлений и виду рисков. Особое внимание уделено особенностям многоэтапных моделей оптимизации производства продовольственной продукции, связанным с отраслями сельского хозяйства, этапами технологических операций, неопределенностью показателей, рисками и динамикой. Показано, что многоэтапность моделирования позволяет не только уточнять модели на каждом этапе планирования, но и определять оптимальные планы для каждой стадии цикла: производство, переработка, транспортировка, хранение и реализация продукции. Обоснована необходимость учета неопределенности и рисков при построении оптимизационных моделей. Для снижения неопределенности предложено использовать многоуровневое моделирование, предполагающее разработку набора оптимальных планов для различных сценариев: усредненных, благоприятных и неблагоприятных условий. Приведены примеры оптимизации производства, переработки и реализации продукции с использованием задач математического программирования, в том числе многоэтапная многоуровневая модель производства и переработки продукции, основанная на задаче многоуровневого параметрического программирования. Отмечено, что применение рассмотренных моделей позволяет товаропроизводителям, специализирующимся на полном цикле производства и переработки, повысить эффективность деятельности с учетом разных условий получения продукции, а также обеспечить готовность предприятия к экстремальным условиям, неизбежным в аграрной отрасли.

Ключевые слова: модель, многоэтапность, неопределенность, факторы, математическое программирование, аграрное производство, систематизация.

Для цитирования: Полковская М.Н. Классификация многоэтапных моделей в управлении аграрным производством в условиях неопределенности. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):49-65. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-49-65.

CLASSIFICATION OF MULTI-STAGE MODELS FOR AGRICULTURAL PRODUCTION MANAGEMENT UNDER UNCERTAINTY

Marina N. Polkovskaya

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
Molodezhny, Molodezhnoye rural settlement, Irkutsk municipal district, Irkutsk region, Russia

Abstract. The relevance of this study stems from the multi-stage nature of agricultural technological processes, the cyclical character of production, and the significant uncertainty surrounding production and economic indicators, which are often interval-based or stochastic in nature. A classification of mathematical programming problems is presented based on several criteria: the level of aggregation of modeled objects; parameter types (deterministic, stochastic, interval); the number of optimization criteria; the consideration of the time factor; the type of analytical expressions; the variable value sets; the impact of extreme natural phenomena; and the types of risks involved. Particular attention is paid to the specific features of multi-stage models for optimizing food production, specifically regarding agricultural sectors, technological operation stages, indicator uncertainty, risks, and dynamics. It is demonstrated that a multi-stage modeling approach allows not only for the refinement of models at each planning stage but also for the determination of optimal plans for every phase of the cycle: production, processing, transportation, storage, and product sales. The necessity of accounting for uncertainty and risks when constructing optimization models is substantiated. To mitigate uncertainty, the use of multi-level modeling is proposed; this involves developing a set of optimal plans for various scenarios, such as average, favorable, and unfavorable conditions. Examples are presented of optimizing the production, processing, and sale of products using mathematical programming techniques, including a multi-stage, multi-level model of production and processing based on a multi-level parametric programming problem. It is noted that the application of these models enables producers specializing in the full production and processing cycle to enhance operational efficiency-accounting for varying production conditions and ensures enterprise resilience in the face of extreme conditions inherent to the agricultural sector. **Keywords:** model, multi-stage nature, uncertainty, factors, mathematical programming, agricultural production, systematization.

For citation: Polkovskaya M.N. Classification of multi-stage models for agricultural production management under uncertainty. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2026; 3(60):49-65. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-49-65.

Введение. Технологические процессы в сельском хозяйстве отличаются многоступенчатостью, а производство носит циклический характер, что предполагает использование многоэтапного математического аппарата для планирования производства аграрной продукции [6, 17, 25]. Как следствие, поиск оптимальных параметров выпуска продуктов дает не одно, а целое множество допустимых решений, из которых руководителю предстоит выбрать ограниченное число вариантов, что является еще одним этапом. Как правило, прикладные задачи часто решаются с помощью многоэтапных моделей математического программирования [11, 21, 22, 23].

Одной из основополагающих работ по стохастическому программированию является монография Д.Б. Юдина [29]. Разные стороны стохастического моделирования в экономике и сельском хозяйстве приведены

в работах [5, 8, 15, 20]. Для снижения неопределенности в линейных задачах математического программирования в статье [13] предложен подход, при котором земельные ресурсы трактуются как неоднородные участки, дифференцированные по урожайности в зависимости от почвенных свойств, уровня вносимых удобрений (минеральных и органических), а также влажности и плодородия. Такие модели приобретают особую ценность при интеграции данных мониторинга состояния угодий на различных фазах технологического цикла.

В условиях интенсивного антропогенного воздействия на агроэкосистемы и сопутствующего загрязнения среды пестицидами, гербицидами и химикатами обоснованным представляется применение эколого-математических моделей, в которых целевая функция ориентирована на учет ущерба почвенным и водным ресурсам [3, 19].

Наряду с узкоотраслевыми моделями, оптимизирующими производство растениеводческой и животноводческой продукции на территориях с обширными дикорастущими пищевыми ресурсами, теоретическую и практическую значимость имеют многоотраслевые постановки, охватывающие как сельхозпроизводство, так и заготовку дикоросов [10].

Важно подчеркнуть, что математические модели, используемые для планирования агропроизводства, оперируют значительным массивом неопределенных данных, имеющих интервальную или стохастическую природу. В многоотраслевых задачах к числу таких показателей относятся трудозатраты на получение продукции растениеводства и животноводства, урожайность культур и метеоусловия. При этом такие задачи нередко являются многокритериальными [24] и требуют обязательного учета динамики развития системы.

В условиях неопределенности многих характеристик экстремальных моделей дополнительно могут быть использованы экспертные оценки [2, 12], что расширяет возможности использования математического моделирования применительно к сельскому хозяйству.

Исходя из вышесказанного, **целью работы** является анализ многоэтапных моделей математического программирования применительно к аграрному производству для их классификации с учетом свойств характеристик.

Материалы и методы. В ходе исследования проанализированы работы российских и зарубежных авторов, отражающие применение многоэтапных моделей в различных отраслях. Следует отметить, что представленные модели являются разнообразными не только по отраслям применения, но и по используемой информации, внешним факторам и другим критериям, что требует их разделения по различным признакам для оценки применимости к реальным ситуациям.

Использованы методы систематизации информации о многоэтапных моделях по выделенным критериям и математического моделирования для определения особенностей рассмотренных моделей, по результатам

исследований, проведенных с 1990 по 2026 год. В качестве источников информации выбраны научная электронная библиотека eLIBRARY.RU и международная научная онлайн-платформа ResearchGate.

Основные результаты и обсуждение. Многоэтапные оптимизационные модели обладают специфическими особенностями, определяемыми предметной областью исследования. В работах [7, 26-28] математические модели классифицируются по различным критериям и признакам. На рисунке приведена дополненная классификация, представленная автором ранее в исследовании [18].

Из разных групп моделей выделим многоэтапные модели, позволяющие получать более точные планы с учетом влияния факторов, возникающих на разных этапах. В частности, в работе [1] приведена двухэтапная минимаксная задача, описывающая развитие топливно-энергетического комплекса в следующем виде. Найти

$$l^* = \min_{u_1} \max_{f_1 \leq v_1 \leq \bar{f}_1} \min_z l, \quad (1)$$

где u_1 – компонента вектора управления, $f_1, v_1, \bar{f}_1$ – неопределенные факторы, l – вспомогательная переменная. При условиях

$$Qu_1 + Qz + l\alpha \geq \hat{D}_1 v_1 + \hat{r}, \quad (2)$$

где $Q, G, \hat{D}_1$ – матрицы, α – вектор-столбец, $\hat{r}$ – вектор-столбец свободных членов.

В статье [21] приведена многоэтапная экстремальная задача, связанная с распределением ресурсов, позволяющих описывать управленческие ситуации, требующие принятия решений при неопределенности и нечеткости данных.

Инструментарий построения моделей многоэтапных задач производственно-транспортной логистики рассмотрен в работе [6], в которой описывается последовательность процессов выпуска продукции, доставка их в пункты переработки в другие виды, производство этих видов продукции и их доставки потребителям. Подобные процессы описываются задачами производственно-транспортной логистики.

Авторы работы [23] учитывают риски в двухэтапной задаче распределения ресурсов с критерием в форме математического ожидания, где задача записывается следующим образом:

$$\phi(k_1, x) \rightarrow \min_{V_1^j, V_2^j} \sum_{j \in J} [V_1^j c_1 + V_2^j c_2]. \quad (3)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} V_2^j + V_1^j &\geq x^j \quad (j \in J), \\ V_1^j / V_2^j &\leq k_1 \quad (j \in J), \\ V_1^j, V_2^j &\geq x^j \quad (j \in J), \end{aligned} \quad (4)$$

где J – число плановых периодов работы предприятия; k_1 – планируемое количество единиц собственного ресурса; c_1 – стоимость содержания (эксплуатации, обслуживания) собственного ресурса в период, приходящаяся

на единицу удовлетворяемого им спроса; c_2 – стоимость аренды единицы ресурса в период, приходящаяся на единицу удовлетворяемого им спроса; V_1^j – часть спроса, удовлетворяемая собственным ресурсом в j -й период; V_2^j – часть спроса, удовлетворяемая арендованным ресурсом в j -й период; $x=(x^1, x^2, \dots, x^n)^T$ – реализация случайной величины X^j .



Рисунок – Классификация задач математического программирования

Figure – Classification of mathematical programming problems

В работе [8] приведена модель m -этапной транспортной задачи, которая отражает различное экономическое содержание. Она используется при определении структуры перевозок в условиях различных ограничений (m -этапная задача планирования перевозок), а также при определении структур производства, поставок продукции потребителям и потребления ее (m -этапная задача производственно-транспортной логистики в структурной иерархии “производство–поставки–потребление”). Рассматриваемые модели являются детерминированными.

Суворова М.А. [25] в основу многоэтапных моделей положила принцип недостаточной достоверности информации для планирования в экономике и технике. Поскольку приходится принимать и корректировать решения, сочетающие противоречивые требования оперативности и обоснованности корректировки, необходимо использование двухэтапных и многоэтапных задач. Автор использует многоэкстремальные задачи стохастического программирования и методы их решения. При этом определены области применения моделей – распределения ресурсов; принятие инновационных, инвестиционных, социальных, политических решений; экономический анализ хозяйственной деятельности отдельных предприятий, отраслей народного хозяйства.

В работе [18] под многоэтапностью понимается наличие нескольких периодов принятия решений, разделенных во времени, на которых однородные по своему содержанию операции совершаются на основании уточненных данных, полученных в результате реализации предыдущих операций. Для планирования аграрного производства предложена многоэтапная модель оптимизации размещения посевов с учетом различных севооборотов.

Статья [32] посвящена двухэтапной модели производства и реализации сельскохозяйственной продукции с учетом сезонности цен.

В исследовании число этапов связано с количеством сезонов производства аграрной продукции, для каждого из которых рассчитываются оптимальные планы. При этом некоторые характеристики модели рассматриваются как случайные или интервальные. Наиболее сложной с точки зрения оценки полученных решений является задача оптимизации размещения посевов сельскохозяйственных культур с учетом предшественников, в которой один или несколько показателей являются случайными величинами и описываются с помощью закона распределения вероятностей. В частности, такими показателями являются производственные ресурсы и урожайность сельскохозяйственных культур.

Задача оптимизации структуры посевов с учетом предшественников может быть решена с учетом или без учета мнения экспертов согласно определенным правилам севооборота. Следует отметить, что этапов решения подобной задачи может быть несколько в зависимости от поставленной цели. В результате ее решения получают оптимальную структуру посевов.

В дополнение к этой задаче в статье [11] предложена двухэтапная модель оптимизации производства аграрной продукции в условиях рисков, вызванных климатическими событиями. Авторами предложена двухэтапная модель оптимизации структуры посевов с учетом природных рисков. В модели использованы показатели, характеризующие влияние одного события и сочетания нескольких экстремальных климатических событий на получение аграрной продукции. Предложенная двухэтапная модель с вероятностными характеристиками реализована для реального объекта с учетом влияния на производственные показатели сильной засухи.

Большинство трудов, посвященных многоэтапному планированию аграрного производства на краткосрочную и среднесрочную перспективу, в качестве инструментария выбирают модели динамического программирования. В частности, исследование [30] посвящено оптимизации схемы посадки сельскохозяйственных культур на период с 2024 по 2030 год с целью максимизации совокупной экономической отдачи. В качестве основной методологии используется динамическая структура программирования, в то время как логика принятия решений жадного алгоритма (greedy algorithm) используется для обновления стратегии посадки из года в год. В частности, решение о посадке на каждый год определяется на основе прогнозируемых результатов и операционных показателей предыдущего года. Для двух возможных стратегий утилизации непроданной сельскохозяйственной продукции разрабатываются и решаются отдельные многоэтапные модели оптимизации, что позволяет сформировать соответствующие оптимальные планы посева на весь период планирования. Кроме того, модель учитывает ряд неопределенностей, связанных с сельскохозяйственным производством и рыночными условиями, включая многолетние показатели продаж, ожидаемый спрос на различные культуры, урожайность с единицы площади, затраты на выращивание и колебания цен.

Комбинация динамического программирования и моделирования методом Монте-Карло с целью оптимизации стратегий выращивания сельскохозяйственных культур в сельской местности в горном районе описана в работе [33]. Во-первых, с помощью линейного программирования определены оптимальные сценарии выращивания сельскохозяйственных культур на 2024-2030 годы, учитывающие стабильные экономические показатели, и рассчитана доходность при различных сценариях (стабильные продажи и продажи со скидкой). Во-вторых, учтен рост ожидаемых продаж сельскохозяйственных культур, а также волатильность, и с помощью динамического программирования и моделирования методом Монте-Карло получен прогноз общей доходности на следующие семь лет. Кроме того, в исследовании введены понятия взаимозаменяемости и взаимодополняемости культур, а также корреляция между различными экономическими показателями, модифицирована целевая функция и дополнительно оптимизирована стратегия посадки.

В исследовании [31] представлена многоэтапная динамическая оптимизационная модель, разработанная для планирования посевов в сложных условиях горного Северного Китая. Она интегрирует передовые системы мониторинга с гибридным алгоритмом имитированного отжига и генетическим алгоритмом (H-SAGA), дополнительно усовершенствована за счет прогнозов в реальном времени, управляемых нейронной сетью. Компонент H-SAGA оптимизирует стратегии посадки, синергетически сочетая возможности глобального исследования (SA) и локального уточнения (GA), в то время как нейронная сеть динамически корректирует прогнозы доходов на основе климатических и рыночных данных, значительно повышая скорость реакции и адаптивность модели.

Следует отметить, что многоэтапность моделирования аграрного производства включает не только уточнение модели на каждом этапе (на следующий год), но и нахождение оптимального плана для той или иной стадии, которая также состоит из двух и более этапов.

На этапе производства сельскохозяйственной продукции могут применяться задачи оптимизации структуры посевных площадей, кормопроизводства, сочетания отраслей, а также производства продовольственной продукции и другие. При этом процесс получения аграрной продукции может включать несколько этапов, описываемых математическими моделями: подготовку почвы и посев; уход за растениями в период вегетации; уборку урожая. На всех указанных этапах возможно комплексное использование моделей математического программирования во взаимосвязи.

На стадии переработки продукции целесообразно применение задач динамического программирования, позволяющих формировать оптимальный план замены или ремонта оборудования. Для управления логистическими операциями применяется транспортная задача, обеспечивающая расчет оптимального плана перевозок продукции из пунктов хранения в пункты реализации. В целях оптимизации затрат на хранение используется аппарат складской логистики, позволяющий минимизировать издержки с учетом различных характеристик складских помещений. Кроме того, существенным аспектом производства продукции является ее реализация по наиболее выгодным ценам, которые, как правило, зависят от сезонности, что необходимо учитывать при построении оптимизационных задач [9].

В случаях, когда сельскохозяйственные предприятия оснащены датчиками, отбор информации для многоэтапной модели осуществляется в три этапа: 1) сбор, хранение и накопление данных с датчиков; 2) формирование базы данных (базы знаний); 3) прогнозирование и планирование параметров аграрного производства. Следует отметить, что наиболее значимым является первый этап, поскольку именно от полученных данных зависят последующие результаты прогнозирования и планирования производства. При этом датчики могут фиксировать параметры, как производства продукции, так и ее хранения, если склад оснащен соответствующим оборудованием. Ключевым моментом

является организация хранения информации. Данные, полученные с датчиков, могут накапливаться на сервере (серверах) либо на локальных накопителях (USB, жесткий диск и т.д.). В зависимости от вида получаемой информации формируется база данных, реализуемая в системе управления базами данных. Использование значительных объемов полевой, нормативной и экспертной информации предполагает применение технологий больших данных. На основе полученных данных осуществляется выбор производственных параметров, необходимых для прогнозирования и расчета оптимальных планов управления процессами производства, переработки и реализации продукции.

Сезонность производства сельскохозяйственной продукции обуславливает многоэтапность планирования с использованием прогностических параметров. Иными словами, после определения оптимального плана по результатам года на следующем шаге осуществляется планирование на последующий год. При этом необходимо учитывать неопределенность многих показателей, входящих в модель планирования, а также природные и техногенные риски.

Оптимизационная модель для агропредприятий, включающих в себя процессы производства, переработки и реализации конечной продукции, должна учитывать все звенья производственной цепи и сопутствующие им риски, которые, как правило, описываются с помощью вероятностных или интервальных оценок [18].

Следовательно, эффективная модель оптимизации не может игнорировать факторы неопределенности. Одним из способов планирования при неопределенности является многоуровневое моделирование [16]. Оно заключается в разработке не одного, а набора оптимальных планов для различных сценариев: усредненных, благоприятных и неблагоприятных. Такой подход позволяет агропредприятиям быть готовыми к экстремальным сложностям, неизбежным в этой отрасли.

В работе [14] приведена многоэтапная многоуровневая модель производства и переработки продукции, использующая алгоритм многоуровневого моделирования [16]. Спецификой этой модели является связь между производством и переработкой продукции на разных уровнях – при усредненных, неблагоприятных и благоприятных условиях.

Целевая функция многоуровневой модели производства характеризуется максимумом прибыли:

$$F = \sum_{s \in S} c_s^l x_s \rightarrow \max, \quad (5)$$

при условиях:

1) ограниченности производственных ресурсов

$$\sum_{s \in S} a_{os}^l x_s \leq A_o^l, o \in O, \quad (6)$$

2) ограниченности по площадям сельскохозяйственных угодий

$$\sum_{s \in S} x_s \leq B, \quad (7)$$

3) производства конечной продукции заданного объема

$$\sum_{s \in S} u_{ws}^{lp}(t) x_s \geq V_w^l, w \in W, \quad (8)$$

4) определенного количества вносимых удобрений и средств защиты растений

$$\sum_{s \in S} b_{sm}^l x_s \leq B_m^l, m \in M, \quad (9)$$

5) неотрицательности переменных

$$x_s \geq 0, \quad (10)$$

где x_s – искомая переменная, площадь культуры; l – номер уровня тренда (усредненные условия – 1, благоприятные условия – 2, неблагоприятные условия – 3); c_s^l – доход от производства единицы культуры s ; a_{os}^l – расход ресурса o на единицу площади культуры s ; A_o^l – наличие ресурса o -вида; V_w^l – гарантированный объем производства продукции вида w ; B – площади земельных угодий; $u_{ws}^{lp}(t)$ – выход товарной продукции w -вида с единицы площади культуры s ; p – вероятность события, связанная с уровнем тренда; t – время, характеризующее многолетний период с начальным и конечным значениями $[\tau_1, \tau_2]$; b_{ms}^l – расход удобрений и средств защиты растений вида m на единицу площади культуры s ; B_m^l – необходимый объем удобрений вида m ; S – количество выращиваемых культур; L – количество уровней трендов, соответствующее трем; Q – число производимой продукции; M – количество видов удобрений средств защиты растений.

Многоуровневая модель оптимизации учитывает разные условия производства и переработки продукции, что способствует определению сценариев развития предприятия.

На втором этапе оптимизацию перерабатывающих процессов предприятий данного типа предлагается осуществлять на основе модели распределения ресурсов, представленной в исследовании [4]. В качестве критерия оптимальности в данной модели выступает максимизация прибыли от сбыта продуктов переработки. Целевая функция данной модели отражает прибыль от реализации всех товаров:

$$Z = \sum_{j \in J} q_j y_j^l(t) \rightarrow \max, \quad (11)$$

при условиях

1) ограничения количества производимого товара

$$y_1^l(t) \leq k_1, y_2^l(t) \leq k_2, \dots, y_j^l(t) \leq k_j \quad (12)$$

2) достатка ресурсов для планируемого производства товаров

$$\sum_{j \in J} r_{sj} y_j^l(t) \leq \sum_{w \in W} u_{ws}^{lp}(t) x_s, \quad (13)$$

3) ограничения трудозатрат на производство продукции

$$\sum_{j \in J} d_{hj} y_j \leq D_h, h \in H, \quad (14)$$

4) неотрицательности переменных

$$y_j \geq 0, \quad (15)$$

где q_j – удельная прибыль единицы переработанной продукции вида j ; $y_j^l(t)$ – планируемые объемы производства продукции переработки вида j при условии l , связанные с параметром t ; r_{sj} – количество единиц ресурса культуры s , необходимых для производства одной единицы товара j ; $u_{ws}^{lp}(t)x_s$ – объем произведенной продукции отправленной на переработку; k_j – потенциал производства единицы переработанной продукции; D_h – трудозатраты вида h на производство продукции; d_{hj} – трудозатраты вида h на производство единицы продукции j .

Рассматриваемая модель распределения ресурсов взаимосвязана с моделью производства (5)-(10) посредством переменных $\sum_{s \in S} u_{ws}^l(t)x_s$, обозначающих объемы производимой продукции для разных условий, которые входят в ограничение (13). Из этого следует, что значение $\sum_{s \in S} u_{ws}^l(t)x_s$ при благоприятных условиях создает предпосылки для роста объемов переработки при условии соблюдения ограничений по производственным мощностям. В свою очередь уменьшение значений $\sum_{s \in S} u_{ws}^l(t)x_s$ ведет к сокращению объемов переработки. Благодаря этому применение рассмотренных моделей оптимизации позволяет товаропроизводителям, специализирующимся на полном цикле производства и переработки, повысить эффективность своей деятельности с учетом разных условий получения продукции.

Вместе с тем, при учете в модели (5)-(10) севооборотов добавится еще один дополнительный этап, что свидетельствует о сложности планирования аграрного производства. Кроме того, многоуровневое моделирование подразумевает, что предприятие осуществляет цикл производства, переработки и реализации продукции без использования средств из внешних источников. При недостаточном количестве произведенной продукции хозяйство может закупить продукцию у других сельскохозяйственных товаропроизводителей, при этом увеличиваются затраты и уменьшается прибыль. Это особенно актуально в условиях влияния экстремальных явлений на деятельность сельскохозяйственных предприятий.

Для моделирования реализации товара производства и переработки использована транспортная задача, модифицированная в соответствии с многоуровневыми моделями производства и переработки продукции.

Целевая функция модели реализации товара, полученная на этапе производства, примет вид:

$$\Omega = \sum_{\mu \in M} \sum_{\eta \in H} \kappa_{\mu\eta}^l \beta_{\mu\eta}^l \rightarrow \min, \quad (16)$$

при условиях:

1) ограничений по объему товара, доступного для реализации:

$$\sum_{\eta \in H} \sum_{w \in W} \beta_{\mu\eta w}^l = \sum_{\eta \in H} \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} u_{\mu\eta sw}^l(t) \delta_{\mu\eta w} x_s, \quad (17)$$

2) ограничений по спросу на каждый канал сбыта

$$\sum_{\mu \in M} \beta_{\mu\eta}^l = \gamma_{\eta}^l, \quad (18)$$

3) равенства объемов спроса и реализации товара

$$\sum_{\mu \in M} T_{\mu}^l = \gamma_{\eta}^l, \quad (19)$$

4) неотрицательности переменных

$$\beta_{\mu\eta}^l \geq 0, \quad (20)$$

где $\kappa_{\mu\eta}^l$ – цена реализации единицы товара при перевозке из пункта производства μ в пункт потребления η при условии l ; $\beta_{\mu\eta w}^l$ – искомый объём товара вида w , направляемый из пункта производства μ , в пункт потребления η , при условии l ; $\sum_{\mu \in M} T_{\mu}^l = \sum_{\eta \in H} \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} u_{\mu\eta sw}^l(t) \delta_{\mu\eta w} x_s$, – объём товара вида w для перевозки из пункта производства μ в пункт потребления η при условии l и доле реализации $\delta_{\mu\eta w}$; γ_{η}^l – объём товаров, размещаемых в пункте η при условии l . Модель (16)-(20) связана с моделью (5)-(10) через полученные объёмы продукции производства $\sum_{s \in S} u_{ws}^l(t) x_s$.

Данная связь означает, что при увеличении объемов производства продукции возрастет и объем товаров, направляемых на реализацию, что повлияет на затраты транспортировки. В обратном случае, при получении меньших объемов производства продукции, объем товаров к реализации уменьшится, как и затраты на его транспортировку.

Помимо предложенной модели (16)-(20) авторами [14] создана модель для случая, когда товаропроизводитель направляет на реализацию товары переработки.

Выводы. В работе проведен анализ многоэтапных моделей математического программирования, применяемых в аграрном производстве. Показано, что такие модели разнообразны не только по отраслям применения, но и по используемой информации, внешним факторам и критериям, что требует их классификации по различным признакам для оценки применимости к реальным ситуациям.

Представлена классификация задач математического программирования, включающая деление по степени агрегирования объектов, типу параметров (детерминированные, стохастические, интервальные), числу критериев, учету фактора времени, типу аналитических выражений, множеству значений переменных, влиянию экстремальных природных

явлений и виду рисков.

Многоэтапность моделирования аграрного производства включает не только уточнение модели на каждом этапе, но и нахождение оптимального плана для каждой стадии производственного цикла: производство продукции, переработка, транспортировка, хранение и реализация.

Для повышения эффективности рассматриваемых экстремальных моделей необходимо учитывать факторы неопределенности для расширения набора решений для разных условий, что предлагает применение многоуровневого моделирования.

Актуальным является использование многоэтапной многоуровневой модели производства и переработки продукции, включающей целевую функцию максимизации прибыли и систему ограничений (по ресурсам, площадям, объемам производства, удобрениям), учитывающей взаимосвязь производства и распределения ресурсов для переработки через переменные, входящие в ограничение.

Применение рассмотренных моделей оптимизации позволяет товаропроизводителям, специализирующимся на полном цикле производства и переработки, повысить эффективность деятельности с учетом разных условий получения продукции.

Для решения задач с вероятностными характеристиками используется метод Монте-Карло, позволяющий моделировать значения случайных величин и определять разные варианты вероятностных оптимальных решений с использованием гибридных алгоритмов (например, SA-GA) в сочетании с нейросетевыми прогнозами.

Систематизированы теоретические и практические подходы к многоэтапной оптимизации аграрного производства, акцентируя внимание на необходимости учета неопределенности, сезонности и многоуровневой структуры агропредприятий для повышения эффективности планирования и управления производственными процессами. Выделены перспективные направления и модели многоэтапного многоуровневого планирования производства и переработки продукции, требующие дальнейшего развития и практического применения.

Список литературы

1. Антонова, Н.Н. Алгоритм решения двухэтапной минимаксной задачи с линейными ограничениями / Н.Н. Антонова, Л.М. Шевчук // Приближенные методы анализа и их приложения. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1990. – С. 5-10.
2. Асалханов, П.Г. Модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с экспертными оценками своевременности посева / П.Г. Асалханов, Я.М. Иваньо, М.Н. Полковская // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 5-10.
3. Бендик, Н.В. Эколого-математические модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции / Н.В. Бендик, Я. М. Иваньо, Е.А. Ковалева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (111). – С. 66-74.
4. Волошин, Г.Я. Методы оптимизации в экономике: учеб. пособие / Г.Я. Волошин; Моск. гос. ун-т сервиса. – Москва: Дело и Сервис (ДИС), 2004. – 319 с.
5. Воронцовский, А.В. Прогнозирование развития экономики на основе

стохастической модели экономического роста с учетом точки поворота / А.В. Воронцовский, Л.Ф. Вьюненко // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2016. – № 4. – С. 4-32.

6. Гамбаров, Л.А. Инструментарий построения моделей многоэтапных задач производственно-транспортной логистики / Л.А. Гамбаров, Н.В. Кузьминчук, Н.П. Чернышнёва // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2015. – № 49. – С. 221-229.

7. Гатаулин, А.М. Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве / А.М. Гатаулин, Г.В. Гаврилов, Т.М. Сорокина. – М.: Агропромиздат, 1990. – 432 с.

8. Ермольев, Ю.М. Стохастические модели и методы в экономическом планировании / Ю.М. Ермольев, А.И. Ястремский. – М.: Наука, 1979. – 256 с.

9. Зоркальцев, В.И. Моделирование сезонных колебаний цен на сельскохозяйственную продукцию / В.И. Зоркальцев, М.Н. Полковская, Н.И. Федурин // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2018. – № 28. – С. 48-56.

10. Иваньо, Я.М. Вероятностные модели оценки заготовки дикорастущей продукции в Иркутской области / Я.М. Иваньо, А.А. Лузан, С.А. Петрова, М.Н. Полковская // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2017. – № 25. – С. 62-68.

11. Иваньо, Я.М. Двухэтапная модель оптимизации структуры посевов с учётом рисков / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, М.Н. Полковская // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2018. – № 4 (12). – С. 88-95.

12. Иваньо, Я.М. Информационные технологии многоуровневого моделирования в решении управленческих задач аграрного производства / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, В.В. Цыренжапова // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2025. – Т. 21. – № 3. – С. 604-613.

13. Иваньо, Я.М. Математическое моделирование производства аграрной продукции с учетом неоднородности сельскохозяйственных угодий / Я.М. Иваньо, И.А. Ковадло / В сб.: Проблемы и перспективы устойчивого развития агропромышленного комплекса: матер. II Всерос. научно-практ. конф. с междунар. уч. – Молодежный: ИрГАУ, 2020. – С. 68-74.

14. Иваньо, Я.М. Многоэтапная оптимизация производства и переработки аграрной продукции в экстремальных условиях деятельности товаропроизводителя / Я.М. Иваньо, Л.С. Ананьев // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2026. – № 58. – С. 64-76.

15. Иваньо, Я.М. Модели оптимизации размещения сельскохозяйственных и плодово-ягодных культур с вероятностными параметрами в условиях неопределенности / Я.М. Иваньо, М.Н. Астафьева // Вестник ИрГСХА. – 2012. – № 48. – С. 12-20.

16. Иваньо, Я.М. Многоуровневое моделирование производства растениеводческой продукции на разных ступенях агрегирования / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, М.Н. Полковская, И.А. Собиров // Вестник ИрГСХА. – 2024. – № 125. – С. 25-36.

17. Иваньо, Я.М. О многоэтапных моделях оптимизации структуры посевов / Я.М. Иваньо, М.Н. Полковская // Известия Иркутской государственной экономической академии. – 2014. – № 1. – С. 121-125.

18. Иваньо, Я.М. Оптимизация структуры посевов с учетом изменчивости климатических параметров и биопродуктивности культур: монография / Я.М. Иваньо, М.Н. Полковская. – Иркутск: Изд-во Иркутский ГАУ, 2016. – 150 с.

19. Иваньо, Я.М. Оптимизация численности сельскохозяйственных животных с учетом деградации пастбищ в Монголии / Я.М. Иваньо, А. Энхбат // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2026. – № 3(43). – С. 83-92.

20. Кардаш, В.А. Введение в стохастическую оптимизацию / В.А. Кардаш. – Новочеркасск: НГТУ, 1995. – Кн. 1. – 155 с.

21. Колбин, В.В. Распределение ресурсов. Двухэтапная задача принятия решений / В.В. Колбин, И.Ю. Быкова // Математическое моделирование сложных систем. СПбГУ: НИИХ СПбГУ, 1999. – С. 133-136.

22. Кузьменко, В.Н. Решение двухэтапных задач стохастического программирования

большой размерности PNK-методом / В.Н. Кузьменко // Стохастическое программирование и его приложения. – Иркутск, 2012. – С. 150-159.

23. Наумов, А.В. Учет риска в двухэтапных задачах оптимального распределения ресурсов / А.В. Наумов, С.В. Уланов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 109-116.

24. Полковская, М.Н. Применение многоэтапных и многокритериальных моделей для планирования структуры посевов с учетом рисков аграрного производства / М.Н. Полковская, Т.С. Бузина // Вестник ИРГСХА. – 2022. – № 113. – С. 48-57.

25. Суворова, М.А. Исследование многоэтапных стохастических задач принятия решений: дисс. канд. физ.-мат. наук. – СПб, 2004. – 108 с.

26. Фидлер, М. Задачи линейной оптимизации с неточными данными / М. Фидлер [и др.]. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика; М.: Институт компьютерных исследований, 2008. – 288 с.

27. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование / Дж. Хедли. – М.: Наука, 1967. – 508 с.

28. Шагов, А.В. Исследование моделей принятия решений в условиях четкой и нечеткой информации: автореферат дисс. канд. физ.-мат. наук. СПб, 2002. – 18 с.

29. Юдин, Д.Б. Задачи и методы стохастического программирования / Д.Б. Юдин. – М.: Советское радио, 1979. – 392 с.

30. Fanlin Guo Multi-Period Crop Planting Strategy Optimization Based on Multi-Objective Programming and Monte Carlo Simulation. Journal of Computer Science and Artificial Intelligence, 2026, vol. 8, no. 1, pp. 8-13.

31. Li C et al. Scientific planning of dynamic crops in complex agricultural landscapes based on adaptive optimization hybrid SA-GA method. 2025, Sci Rep 15(1), pp. 1-22.

32. Polkovskaya M.N., Ivano Ya.M. Optimization of agricultural production using a price forecasting model with a seasonal component. Critical Infrastructures in the Digital World (IWCID-2021). Proceeding of International Workshop, ISEM SB RAS, 2021, p. 30.

33. Yuxin Zhang, Zitong Pan and Tian He. Optimization of Planting Strategies Based on Dynamic Programming and Monte Carlo. Highlights in Science, Engineering and Technology, vol. 131 (2025), pp. 79-85.

References

1. Antonova N.N., Shevchuk L.M. Algoritmy resheniya dvuhehtapnoj minimaksnoj zadachi s linejnymi ogranicheniyami [Algorithm for solving a two-stage minimax problem with linear constraints]. Priblizhennyye metody analiza i ih prilozheniya. Irkutsk: SEHI SO AN SSSR, 1990, pp. 5-10.

2. Asalkhanov, P.G. et al. Modeli optimizatsii proizvodstva sel'skokhozyaistvennoj produkcii s ekspertnymi otsenkami svoeveremennosti poseva [Models for optimizing agricultural production with expert assessments of sowing timeliness]. Modelirovanie sistem i processov, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 5-10.

3. Bendik, N.V. et al. Ehkologo-matematicheskie modeli optimizatsii proizvodstva sel'skokhozyaistvennoj produkcii [Ecological and mathematical models for optimizing agricultural production]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2016, no. 4 (111), pp. 66-74.

4. Voloshin, G.Ya. Metody optimizatsii v ehkonomike [Optimization Methods in Economics: A Textbook]. Moscow: Delo i Servis (DIS), 2004, 319 p.

5. Voroncovskij, A.V., Vyunenkov, L.F. Prognozirovanie razvitiya ehkonomiki na osnove stohasticheskoy modeli ehkonomicheskogo rosta s uchetom točki povorota [Forecasting economic development based on a stochastic economic growth model with a turning point]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ehkonomika, 2016, no. 4, pp. 4-32.

6. Gambarov, L.A. et al. Instrumentarij postroeniya modelej mnogiehtapnyh zadach proizvodstvenno-transportnoj logistiki [Tools for building models of multi-stage production and transport logistics problems]. Visnik ekonomiki transportu i promislovosti, 2015, no. 49, pp. 221-

229.

7. Gataulin, A.M. et all. Matematicheskoe modelirovanie ehkonomicheskikh processov v sel'skom hozyajstve [Mathematical Modeling of Economic Processes in Agriculture]. Moscow: Agropromizdat, 1990, 432 p.

8. Ermol'ev, Yu.M., Yastremskij A.I. Stokhasticheskie modeli i metody v ehkonomicheskom planirovanii [Stochastic Models and Methods in Economic Planning]. Moscow: Nauka, 1979, 256 p.

9. Zorkal'cev, V.I. et all. Modelirovanie sezonnykh kolebanij cen na sel'skohozyajstvennyuyu produkciyu [Modeling seasonal price fluctuations for agricultural products]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, 2018, no. 28, pp. 48-56. – EDN YCKBID.

10. Ivan'o, Ya.M. et all. Veroyatnostnye modeli ocenki zagotovki dikorastushchej produkcii v Irkutskoj oblasti [Probabilistic models for assessing the harvesting of wild products in the Irkutsk region]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, 2017, no. 25, pp. 62-68. – EDN ZXVHTJ.

11. Ivan'o, Ya.M. et all. Dvuhetapnaya model' optimizacii struktury posevov s uchëtom riskov [Two-stage model for optimizing crop structure taking into account risks]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii, 2018, no. 4 (12), pp. 88-95.

12. Ivanyo, Ya.M. et all. Informatsionnye tekhnologii mnogourovnevnogo modelirovaniya v reshenii upravlencheskikh zadach agrarnogo proizvodstva [Information technologies of multi-level modeling in solving management problems of agricultural production]. Modern Information Technologies and IT Education, 2025, vol. 21, no. 3, pp. 604-613.

13. Ivan'o, Ya.M., Kovadlo, I.A. Matematicheskoe modelirovanie proizvodstva agrarnoj produkcii s uchëtom neodnorodnosti sel'skohozyajstvennykh ugodij [Mathematical modeling of agricultural production taking into account the heterogeneity of agricultural land]. Molodezhnyj, 2020, pp. 68-74.

14. Ivan'o, Ya.M., Anan'ev, L.S. Mnogoehtapnaya optimizaciya proizvodstva i pererabotki agrarnoj produkcii v ehkstremaal'nykh usloviyakh deyatel'nosti tovaroproizvoditelya [Multi-stage optimization of production and processing of agricultural products under extreme conditions of the producer's activity]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, 2026, no. 58, pp. 64-76.

15. Ivan'o, Ya.M., Astafeva, M.N. Modeli optimizacii razmeshcheniya sel'skohozyajstvennykh i plodovo-yagodnykh kul'tur s veroyatnostnymi parametrami v usloviyakh neopredelennosti [Models for optimizing the placement of agricultural and fruit-and-berry crops with probabilistic parameters under uncertainty]. Vestnik IrGSHA, 2012, no. 48, pp. 12-20.

16. Ivan'o, Ya.M. et all. Mnogourovnevnoe modelirovanie proizvodstva rastenievodcheskoj produkcii na raznykh stupenyah agregirovaniya [Multi-level modeling of crop production at different levels of aggregation]. Vestnik IrGSHA, 2024, no. 125, pp. 25-36. – DOI 10.51215/1999-3765-2024-125-25-36. – EDN VSNDTR.

17. Ivan'o, Ya.M., Polkovskaya, M.N. O mnogoehtapnykh modelyakh optimizacii struktury posevov [On multi-stage models for optimizing crop structure]. Izvestiya Irkutskoj gosudarstvennoj ehkonomicheskoy akademii, 2014, no. 1, pp. 121-125. – EDN RWCZET.

18. Ivan'o, Ya.M., Polkovskaya, M.N. Optimizaciya struktury posevov s uchëtom izmenchivosti klimaticheskikh parametrov i bioproduktivnosti kul'tur [Optimization of Crop Structure Taking into Account Variability of Climatic Parameters and Bioproductivity of Crops]. Irkutsk, 2016, 150 p. – EDN IDFFRR.

19. Ivanyo, Ya.M., Enkhbat, A. Optimizatsiya chislennosti selskokhozyaistvennykh zhivotnykh s uchëtom degradatsii pastbishch v Mongolii [Optimization of livestock numbers taking into account pasture degradation in Mongolia]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii, 2026, no. 3 (43), pp. 83-92. DOI: 10.25729/ESI.2026.43.3.007. EDN MEODPC.

20. Kardash, V.A. Vvedenie v stokhasticheskuyu optimizaciyu [Introduction to Stochastic Optimization]. Novocherkassk: NGTU, 1995, vol. 1, 155 p.

21. Kolbin, V.V., Bykova, I.Yu. Raspredelenie resursov. Dvuhetapnaya zadacha prinyatiya reshenij [Resource allocation. Two-stage decision-making problem]. Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh sistem. SPbGU: NIIH SPbGU, 1999, pp. 133-136.

22. Kuz'menko, V.N. Reshenie dvuhetapnykh zadach stokhasticheskogo programmirovaniya

bol'shoj razmernosti PNK-metodom [Solving large-scale two-stage stochastic programming problems by the PNK method]. Stokhasticheskoe programmirovaniye i ego prilozheniya, Irkutsk, 2012, pp. 150-159.

23. Naumov, A.V., Ulanov S.V. Uchet riska v dvuhehtapnyh zadachah optimal'nogo raspredeleniya resursov [Risk accounting in two-stage problems of optimal resource allocation]. Avtomatika i telemekhanika, 2003, no. 7, pp. 109-116.

24. Polkovskaya, M.N., Buzina, T.S. Primeneniye mnogoetapnykh i mnogokriterialnykh modelei dlya planirovaniya struktury posevov s uchetoм riskov agrarnogo proizvodstva [Application of multi-stage and multi-criteria models for planning crop structure taking into account risks of agricultural production]. Vestnik IrGSHA, 2022, no. 113, pp. 48-57. EDN ZZVLLH.

25. Suvorova, M.A. Issledovanie mnogoetapnyh stokhasticheskikh zadach prinyatiya reshenij [Study of Multi-Stage Stochastic Decision-Making Problems]. Diss. kand. fiz.-mat. Nauk, SPb, 2004, 108 p.

26. Fidler, M. et all. Zadachi lineynoy optimizatsii s netochnymi dannymi [Linear Optimization Problems with Inexact Data]. Izhevsk: Regul'yarnaya i haoticheskaya dinamika; Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2008, 288 p.

27. Hedli Dzh. Nelinejnoe i dinamicheskoe programmirovaniye [Nonlinear and Dynamic Programming]. Moscow: Nauka, 1967, 508 p.

28. Shagov, A.B. Issledovanie modelej prinyatiya reshenij v usloviyah chetkoj i nechetkoj informatsii [Study of Decision-Making Models under Crisp and Fuzzy Information]. Avtoreferat diss. kand. fiz.-mat. nauk. SPb, 2002, 18 p.

29. Yudin, D.B. Zadachi i metody stokhasticheskogo programmirovaniya [Problems and Methods of Stochastic Programming]. Moscow: Sovetskoe radio, 1979, 392 p.

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

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие конфликта интересов.

Author 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: 20.09.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 28.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026

Сведения об авторе

Полковская Марина Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский район, п. Молодежный, e-mail: polk_mn@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9646-1818>.

Information about the author

Marina N. Polkovskaya – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Science 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: polk_mn@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9646-1818>.



DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-66-73

УДК 004.415.2: 631

Научная статья

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ БЛОЧНОЙ РАССТРОЙКЕ ПАРАМЕТРОВ ОТ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ТУРБОМАШИН

О.В. Репецкий

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
*п. Молодежный, с.п. Молодежное, муниципальный район Иркутский,
Иркутская область, Россия*

Аннотация. В данной работе представлены развитие подхода к моделированию эксплуатационных повреждений и результаты численного анализа влияния расстройки параметров блоков, вызванного эксплуатационными дефектами, на срок службы рабочих колес турбин. Несоответствие, вызванное локальными повреждениями (трещинами, забоинами и вмятинами), приводит к перераспределению напряжений, увеличению динамических нагрузок и значительному сокращению срока службы. С помощью метода конечных элементов (МКЭ) в среде ANSYS были смоделированы напряженно-деформированное состояние, собственные и вынужденные колебания, а также усталостная долговечность рабочего колеса модели паровой турбины при двух вариантах расположения дефектных лопаток (чередующихся и парных). Установлено, что наиболее опасным дефектом является трещина, сокращающая срок службы до 0.7021×10^6 циклов (более чем в 6 раз по сравнению с бездефектной конструкцией). Показано, что пространственное расположение дефектов оказывает меньшее влияние на срок службы, чем тип повреждения. Результаты были проверены путем сравнения с данными независимых исследований и могут быть использованы для совершенствования методов оценки остаточного срока службы и оптимизации стратегий технического обслуживания турбомашин. Актуальность численного анализа влияния несоосности блоков на срок службы рабочего колеса обусловлена необходимостью повысить точность прогнозирования срока службы турбомашин с учетом фактических эксплуатационных дефектов. Традиционные методы расчета долговечности, как правило, основаны на предположении об идеальной циклической симметрии конструкции или учитывают только случайную несоосность, что не отражает фактическую локализацию дефектов в отдельных секторах рабочего колеса.

Ключевые слова: математическая модель, численный анализ, усталостная прочность, эксплуатационные дефекты, турбомашин.

Для цитирования: Репецкий О.В. Численный анализ долговечности при блочной расстройке параметров от влияния эксплуатационных дефектов турбомашин. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):66-73. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-66-73.

NUMERICAL ANALYSIS OF DURABILITY UNDER BLOCK-TYPE PARAMETER DEVIATION CAUSED BY OPERATIONAL DEFECTS IN TURBOMACHINES

Oleg V. Repetskii

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky

Molodezhny, Molodezhnoye rural settlement, Irkutsk municipal district, Irkutsk region, Russia

Abstract. This article presents the development of an approach to modeling operational damage and the results of a numerical analysis regarding the impact of blade-to-blade parameter mistuning-caused by operational defects on the service life of turbine impellers. Discrepancies resulting from local damage (such as cracks, nicks, and dents) lead to stress redistribution, increased dynamic loads, and a significant reduction in service life. Using the finite element method (FEM) in the ANSYS environment, the study modeled the stress-strain state, natural and forced vibrations, and fatigue life of a model steam turbine impeller, considering two defect configurations: alternating and paired defective blades. It was determined that a crack is the most critical defect, reducing service life to 0.7021×10^6 cycles (a reduction of more than sixfold compared to the defect-free design). The results indicate that the spatial distribution of defects has less influence on service life than the type of damage itself. These findings were validated against independent research data and can be used to improve residual life assessment methods and optimize maintenance strategies for turbomachinery. The relevance of numerically analyzing the impact of blade mistuning on impeller service life stems from the need to enhance the accuracy of service life predictions by accounting for actual operational defects. Traditional durability calculation methods typically rely on the assumption of ideal cyclic symmetry or consider only random mistuning, failing to reflect the actual localization of defects within specific impeller sectors.

Keywords: mathematical model, numerical analysis, fatigue strength, operational defects, turbomachinery.

For citation: Repetskii O.V. Numerical analysis of durability under block-type parameter deviation caused by operational defects in turbomachines. *Electronic scientific-practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2026; 3(60):66-73. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-66-73.

Введение. Рабочие колеса паровых и газовых турбин являются важнейшими элементами электростанций, надежность и долговечность которых напрямую влияют на бесперебойную работу энергетических и транспортных установок и безопасность работы оборудования. В процессе длительной эксплуатации рабочие колеса подвергаются комбинированному воздействию высоких температур, значительных центробежных нагрузок, переменных аэродинамических сил и циклических напряжений, что приводит к развитию усталостных повреждений и расстройке (несоответствию) параметров [1, 2, 3].

Такое несоответствие может существенно изменить динамические характеристики конструкции, привести к перераспределению вибрационных напряжений и их локальному увеличению, что в конечном итоге ускоряет

накопление усталостных повреждений и сокращает общий срок службы изделия [5, 9, 10].

Методы исследования. Использование современных численных методов (в частности, метода конечных элементов в сочетании с моделями накопления усталостных повреждений) позволяет детально изучить влияние локализованных отклонений параметров на динамику и прочность рабочих колес, а также оценить вклад несоосности блоков в сокращение срока их службы.

Цель данного исследования – численный анализ влияния несоосности блоков, вызванной эксплуатационными дефектами, на срок службы рабочих колес паровых турбин.

Научная и практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для совершенствования методов оценки остаточного срока службы рабочих колес турбомашин, оптимизации стратегий технического обслуживания и ремонта, а также разработки конструктивных и технологических решений, направленных на снижение негативного влияния несоосности параметров на надежность и срок службы оборудования. Несоосность лопаток – это отклонение характеристик отдельных лопаток от их номинальных значений, которое может быть вызвано технологическими, эксплуатационными или конструктивными причинами и требует дальнейших исследований [4].

В рамках этой предложенной концепции можно использовать блочные модели несоосности для контроля динамических характеристик и обеспечения требуемого уровня прочности и долговечности. Однако в случае с эксплуатационными дефектами преднамеренная несоосность не устраняет проблему, а служит инструментом повышения надежности при проектировании новых конструкций. Усталостное разрушение остается одной из основных причин выхода из строя лопаток и дисков ротора в турбомашинах.

Чередующиеся циклические нагрузки, вызванные аэродинамическими силами, приводят к развитию усталостных трещин, особенно в зонах концентрации напряжений. Несоосность может усиливать эти эффекты, локально повышая динамические напряжения и смещая собственные частоты в сторону резонанса с силами возбуждения. Таким образом, учёт несоосности блоков, вызванной эксплуатационными дефектами, крайне важен для надёжного прогнозирования срока службы рабочих колёс паровых турбин. Несмотря на большое количество исследований, посвящённых влиянию несоосности на динамические характеристики рядов лопаток, количественная оценка сокращения срока службы из-за несоосности блоков, вызванной типичными эксплуатационными дефектами, изучена недостаточно.

Результаты исследования. В данной работе с помощью программного обеспечения ANSYS был проведён численный анализ

долговечности рабочего колеса паровой турбины с расстройкой параметров блоков. Основные механические характеристики конструкции: материал рабочего колеса – сталь, модуль упругости 1.93×10^5 МПа; плотность – 7900 kg/m^3 ; коэффициент Пуассона – 0.25; предел прочности при растяжении – 600 МПа, , предел текучести – 310 МПа, твёрдость – 170 НВ [7, 8].

Общий вид крыльчатки показан на рисунке 1, а. В качестве конечноэлементной модели используется конечный элемент TET10 из ANSYS WORKBENCH, состоящий из 115 680 конечных элементов и 173 560 узловых точек. Количество степеней свободы составляет 520 680 (рис. 1, б).

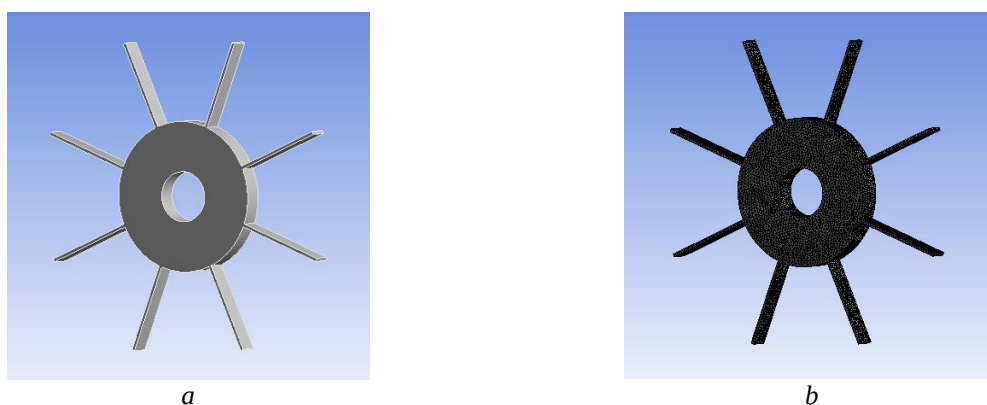


Рисунок 1 – 3D-модель и конечноэлементная модель крыльчатки:
а – 3D-модель; б – конечноэлементная модель

Figure 1 – 3D model and finite element model of the impeller:
a – 3D model; b – finite element model

В настоящем исследовании рассматриваются два варианта расположения пространственных дефектов (чередующиеся и парные) и три типа эксплуатационных повреждений: трещины, задиры и вмятины (рис. 2). Как видно на рисунке 2, в первом варианте неповреждённые и повреждённые лопасти ротора располагались чередующимися, а во втором – попарно. В исследовании также рассматривались трещины, забоины и вмятины.

При исследовании статических, собственных и вынужденных колебаний, а также характеристик срока службы предполагалось, что колесо имеет неподвижную опору в центре для устранения осевого смещения. Частота вращения составляла 314.159 рад/с, а угловая скорость передавалась в осевом направлении вдоль центральной ступицы [7].

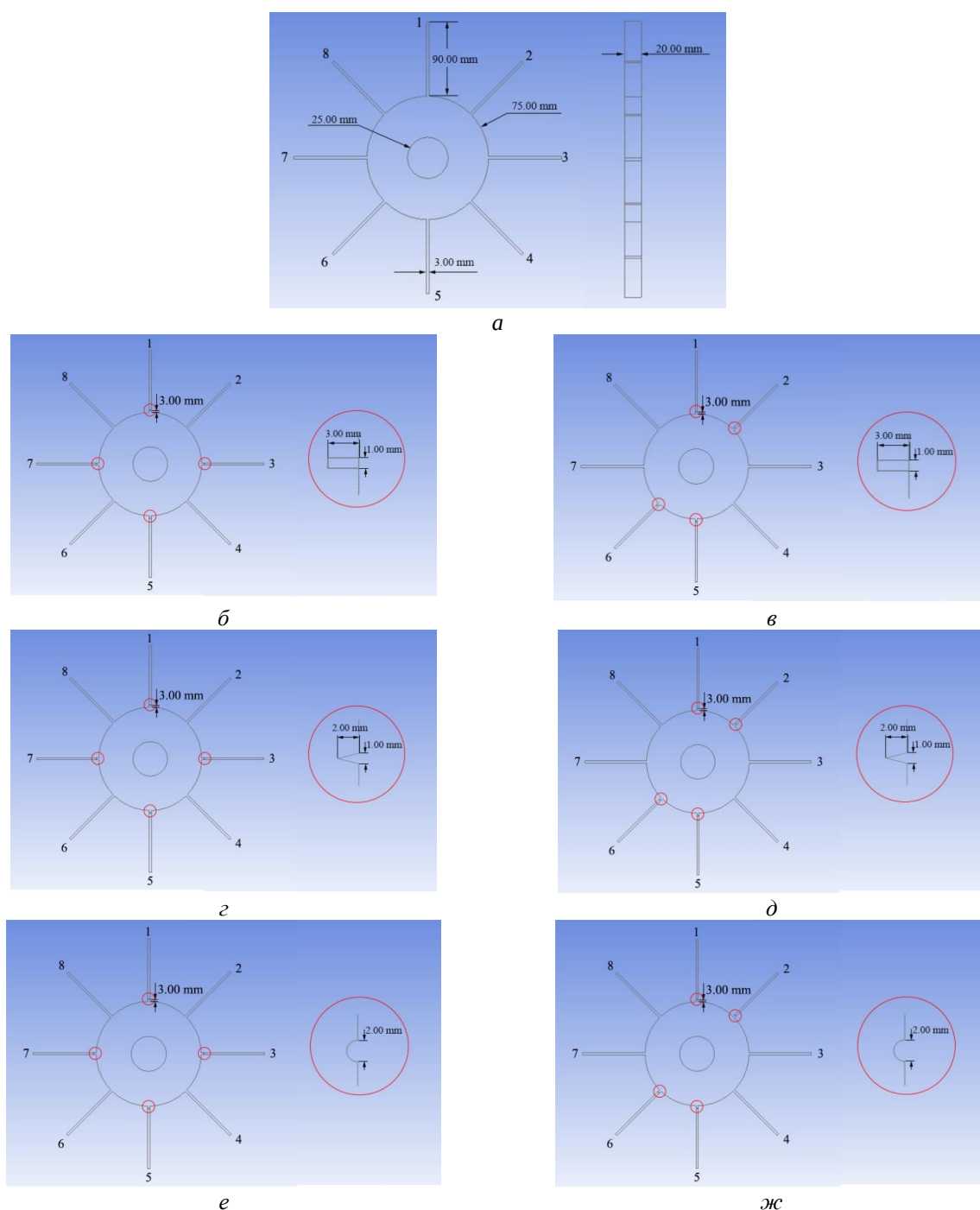


Рисунок 2 – Геометрические размеры рабочего колеса и варианты изменения соосности:
 а – геометрические размеры; б – чередующееся расположение лопаток с трещинами и без трещин; в – попарное расположение лопаток с трещинами и без трещин;
 г – чередующееся расположение лопаток с забоинами и без забоин; д – попарное расположение лопаток с забоинами и без забоин; е – чередующееся расположение лопаток с вмятинами и без вмятин; ж – попарное расположение лопаток с забоинами и без забоин

Figure 2 – Geometric dimensions of the impeller and variations in alignment:
 а – geometric dimensions; б – alternating arrangement of blades with and without cracks; в – pairwise arrangement of blades with and without cracks; д – alternating arrangement of blades with and without nicks; е – pairwise arrangement of blades with and without nicks; г – alternating arrangement of blades with and without dents; ж – pairwise arrangement of blades with and without nicks

Расчеты усталостного ресурса были выполнены с использованием модели линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера. Был использован эквивалентный критерий разрушения по фон Мизесу, а кривая усталости (S-N) была построена с использованием уравнения Баскина с учетом среднего напряжения в соответствии с моделью Гудмана. Оценка усталостного ресурса проводилась на основе минимального количества циклов нагружения до достижения предельного состояния (согласно критерию фон Мизеса) в зонах концентрации напряжений. Результаты представлены в виде распределения усталостного ресурса по элементам модели и сравнительного анализа различных вариантов несоответствия блоков.

Для каждого случая из рисунка 1 был рассчитан срок службы рабочего колеса (табл.).

Как показано в таблице, дефекты значительно сокращают срок службы. Наибольшее сокращение срока службы наблюдается при чередовании лопастей с трещинами и без них – до 0.7021×10^6 циклов. Тип дефекта влияет на степень сокращения срока службы [6]. Трещины – самые опасные дефекты: лопатки с трещинами имеют наименьший срок службы (0.7021 и 0.8000×10^6 циклов).

Таблица – Расчет срока службы рабочих колес

Table – Calculation of service life of impellers

Вариант исследования	Долговечность ($\times 10^6$ циклов)
Без повреждения	4.5513
Чередующееся расположение лопаток с трещиной и лопаток без трещины	0.7021
Парное расположение лопаток с трещиной и лопаток без трещины	0.8000
Чередующееся расположение лопаток с забоиной и лопаток без забоины	2.4615
Парное расположение лопаток с забоинами и лопаток без забоины	2.3513
Чередующееся расположение лопаток с вмятиной и лопаток без вмятины	1.0614
Парное расположение лопаток с вмятинами и лопаток без вмятин	1.0227

Вмятины и зазубрины сокращают срок службы в меньшей степени: в этих случаях долговечность составляет от 1.0227 до 2.4615×10^6 циклов. Расположение дефектных лопаток также имеет значение. Для всех типов дефектов чередующееся расположение лопаток с дефектами и без них даёт несколько иные значения, чем парное расположение. Разница невелика, но тенденция очевидна: при чередующемся расположении срок службы в этих расчётах немного выше.

Заключение. В данной работе проведен численный анализ влияния изменения лопаток, вызванного эксплуатационными дефектами на срок службы рабочих колес турбомашин. Перекос лопаток существенно влияет на напряженно-деформированное состояние рабочего колеса. Это

происходит из-за того, что напряжение концентрируется в месте дефекта, нарушая периодическую симметрию конструкции и повышая динамическую чувствительность системы. Среди различных типов эксплуатационных дефектов трещины являются наиболее серьезными, они создают наибольшие напряжения и сокращают срок службы. Забоины и вмятины оказывают относительно меньшее влияние на долговечность. Это объясняется уникальными характеристиками концентрации напряжений, присущими каждому типу повреждений. Что касается влияния пространственного расположения дефектных лопаток на срок службы конструкции, то чередующиеся и парные расположения демонстрируют схожие, но не полностью идентичные значения срока службы для всех типов дефектов. Для чередующихся дефектных и неповрежденных лопаток наблюдалась тенденция к незначительному увеличению долговечности. Это связано с тем, что динамические нагрузки перераспределяются определенным образом в пределах этой смещенной конструкции, тем самым снижая максимальную концентрацию напряжений. Это исследование может быть использовано в новых и рабочих конструкциях турбомашин для увеличения срока службы рабочего колеса и оптимизации затрат на ремонт и техническое обслуживание двигателя за счет учета расстройки параметров от эксплуатационных дефектов.

Список литературы

1. Нгуен, В.В. Разработка математических моделей, методик и программного обеспечения для создания турбомашин повышенного ресурса с помощью преднамеренной расстройки: дис. ... канд. техн. наук, 2023.
2. Нгуен, В.М. Математическое моделирование и численный анализ ресурсных характеристик рабочих лопаток осевых турбомашин от расстройки статора: дис. ... канд. техн. наук, 2025.
3. Репецкий, О.В. Разработка математических моделей для оценки накопления повреждений и предсказания ресурса лопаточных венцов турбомашин / О.В. Репецкий // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1995. – № 1-3. – С. 45-53.
4. Репецкий, О.В. Численный анализ прочностных характеристик машиностроительных конструкций с расстройкой параметров / О.В. Репецкий, В.В. Нгуен // Вестник НГИЭИ. 2019. – № 7 (98). – С. 27-38.
5. Рыжиков, И.Н. Один из подходов к оценке долговечности рабочих колес турбомашин / И.Н. Рыжиков, О.В. Репецкий, Т.К. Нгуен // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 5 (100). – С. 22-28.
6. Marko, K., Marko, L. Numerical and Experimental Vibration Analysis of a Steam Turbine Rotor Blade // Technical Journal, 2021, vol. 15, no 4, pp. 462-466.
7. Mashiachidi, M.H., Desai, D.A. Fatigue life prediction of mistuned steam turbine blades subjected to deviations in blade geometry// Science, Engineering and Technology. 2023, vol. 3, no. 2, pp. 24-35.
8. Mashiachidi, M.H., Desai, D.A. Prediction of fatigue life of geometrically deviated steam turbine blades under thermo-mechanical conditions // Frontiers in Manufacturing Technology. 2024, vol. 3, no. 2, 15 p.
9. Repetskiy, O. et all. Investigations of impact of various types of mistuning on bladed disks vibration and fatigue life // IFToMM Rotordynamics 2010: IFToMM Rotordynamics 2010, Seoul, 12 сентября – 15 2010 года. Vol. 1. – Seoul: Curran Associates, 2012.
10. Simmons, H.R., Allison, T.C. Impulse testing and blade load simulation tools to estimate

cyclic stress life in blades and impellers. ASME Turbo Expo. 2010; 5:11 p.
<https://doi.org/10.1115/GT2010-23745>.

References

1. Nguen, V.V. Razrabotka matematicheskikh modelej, metodik i programmnoho obespecheniya dlya sozdaniya turbomashin povyshennogo resursa s pomoshch'yu prednamerЕННОj rasstrojki [Разработка математических моделей, методик и программного обеспечения для создания турбомашин повышенного ресурса с помощью преднамеренной расстройки]. Dis. kand. tehn. nauk, 2023.
2. Nguen, V.M. Matematicheskoe modelirovanie i chislennyj analiz resursnyh harakteristik rabochih lopatok osevyh turbomashin ot rasstrojki statora [Математическое моделирование и численный анализ ресурсных характеристик рабочих лопаток осевых турбомашин от расстройки статора]. Dis. kand. tehn. nauk, 2025.
3. Repeckij, O.V. Razrabotka matematicheskikh modelej dlya ocenki nakopleniya povrezhdenij i predskazaniya resursa lopatochnyh vencov turbomashin [Разработка математических моделей для оценки накопления повреждений и предсказания ресурса лопаточных венцов турбомашин]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie, 1995, no. 1-3, pp. 45-53.
4. Repeckij, O.V., Nguen, V.V. Chislennyj analiz prochnostnyh harakteristik mashinostroitel'nyh konstrukcij s rasstrojkoj parametrov [Численный анализ прочностных характеристик машиностроительных конструкций с расстройкой параметров]. Vestnik NGIEHI, 2019, no. 7(98), pp. 27-38.
5. Ryzhikov, I.N. et all. Odin iz podhodov k ocenke dolgovечности rabochih koles turbomashin [Один из подходов к оценке долговечности рабочих колес турбомашин]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 2015, no. 5(100), pp. 22-28.

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 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: 03.09.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received: 26.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026

Сведения об авторе

Репецкий Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, проректор по международным связям. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, муниципальный район Иркутский, с.п. Молодежное, п. Молодежный, 1/1, тел. 89025108222, e-mail: repetskii@igsha.ru; ORCID ID: 0000-0003-2560-2721.

Information about author

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

Contact information: FSBEI HE Irkutsk SAU, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk municipal district, Molodezhnoye village, Molodezhny, tel. 89025108222, e-mail: repetskii@igsha.ru; ORCID ID: 0000-0003-2560-2721.



DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-74-83

УДК 004.89:519.8

Научная статья

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦИКЛОВ В РАМКАХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ

С.Ю. Тырышкин

ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет имени
И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Алтайский край, Россия

Аннотация. В условиях перехода к парадигме Индустрии 4.0 ключевым фактором эффективности промышленных систем становится скорость реакции контура управления в реальном времени, однако классические микропроцессорные архитектуры сталкиваются с “проклятием размерности” при решении NP-трудных задач комбинаторной оптимизации производственных циклов, что делает невозможным поиск глобального оптимума за время, сопоставимое с длительностью технологического процесса. Целью работы является разработка научно-методического аппарата построения гетерогенных автоматизированных систем управления (АСУ ТП), обеспечивающих квазиоптимальное управление высокоразмерными объектами путём офлоадинга вычислительно сложных подзадач на нейросетевые ускорители (GPU) и симуляторы квантовых процессов. Исследование базируется на аппарате динамического программирования, теории энергетической минимизации моделей Изинга и формализме квадратичной неограниченной бинарной оптимизации (QUBO). Для преодоления ограничений классических алгоритмов предложен механизм трансляции дискретных задач планирования в энергетический базис релаксационных нейронных сетей Хопфилда и гамильтонианы для квантового отжига. Проведена проверка моделей на цифровом двойнике складской логистики, где исследовалась маршрутизация пяти автономных погрузчиков между пятьюдесятью ячейками хранения. Эмуляция нейросети Хопфилда на графическом ускорителе NVIDIA RTX 4080 обеспечила сокращение времени расчёта с 4.8 секунды до 0.05 секунды. С помощью гибридного квантово-классического солвера определены маршруты в среднем на 7.2% короче решений стандартного генетического алгоритма. В результате подтверждена гипотеза о том, что интеграция гетерогенных вычислений позволяет снизить время поиска решения до миллисекундного диапазона, создавая технологическую базу для внедрения цифровых двойников-агентов, способных к автономному принятию решений в многокритериальных задачах производства и логистики.

Ключевые слова: квантовые вычисления, нейронные сети, оптимизация, производство.

Для цитирования: Тырышкин С.Ю. Применение квантовых алгоритмов и нейросетевых ускорителей для оптимизации производственных циклов в рамках цифровой трансформации предприятий. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):74-83. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-74-83.

APPLICATION OF QUANTUM ALGORITHMS AND NEURAL ACCELERATORS FOR OPTIMIZATION OF PRODUCTION CYCLES IN THE FRAMEWORK OF DIGITAL TRANSFORMATION OF ENTERPRISES

Sergey Yu. Tyryshkin

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Altai Territory, Russia

Abstract. In the context of transitioning to the Industry 4.0 paradigm, the key factor for industrial system efficiency is real-time control loop response speed. However, classical microprocessor architectures face the "curse of dimensionality" when solving NP-hard combinatorial optimization problems for production cycles, making it impossible to find a global optimum within a timeframe comparable to the duration of the technological process. The aim of this work is to develop a scientific and methodological framework for constructing heterogeneous automated control systems (ACS TP) that provide quasi-optimal control of high-dimensional objects by offloading computationally intensive subtasks onto neural accelerators (GPUs) and quantum simulators. The research is based on dynamic programming apparatus, the energy minimization theory of Ising models, and the formalism of Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO). To overcome the limitations of classical algorithms, a mechanism is proposed for translating discrete scheduling tasks into the energy basis of relaxation Hopfield neural networks and Hamiltonians for quantum annealing. Model verification was conducted on a digital twin of warehouse logistics, investigating the routing problem for five autonomous vehicles among fifty storage cells. Emulation of the Hopfield neural network on an NVIDIA RTX 4080 GPU reduced the calculation time from 4.8 seconds to 0.05 seconds. Using a hybrid quantum-classical solver, routes were determined that are on average 7.2% shorter than those found by a standard genetic algorithm. As a result, the hypothesis is confirmed that integrating heterogeneous computing reduces solution search time to the millisecond range, creating a technological foundation for deploying digital twin agents capable of autonomous decision-making in multi-criteria production and logistics tasks.

Keywords: quantum computing, neural networks, optimization, production.

For citation: Tyryshkin S.Yu. Application of quantum algorithms and neural accelerators for optimization of production cycles in the framework of digital transformation of enterprises. *Electronic scientific-Practical journal “Actual issues of agrarian science”*. 2026; 3(60):74-83. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-74-83.

Введение. Переход высокотехнологичных производств и АПК к стандартам Индустрии 4.0 – это уже не тренд, а необходимость [1]. При этом ключевым фактором выживания в этой парадигме становится скорость реакции системы управления. По сути, вся проблема диспетчирования сводится к решению нескольких жёстких задач: нужно синхронизировать автоматизированные линии, оптимизировать грузопотоки между удалёнными точками и распределить технику по маршрутам. Формально все они являются дискретными оптимизационными задачами высокой размерности.

Здесь мы упираемся в фундаментальный вычислительный барьер. Классические подходы, будь то динамическое программирование или метод

“ветвей и границ”, пасуют перед экспоненциальным ростом сложности $O(e^n)$. Проще говоря, время расчётов растёт катастрофически быстро с каждым новым управляемым фактором n . Главный парадокс заключается в том, что поиск идеального плана занимает больше времени, чем длится сам производственный цикл ($t_{cycle} \leq 10$ мс). В результате классическая постановка задачи оптимального управления становится физически нереализуемой в условиях жестких временных ограничений реального технологического процесса. Традиционный путь экстенсивного наращивания тактовой частоты центральных процессоров (CPU) исчерпал себя из-за физических ограничений полупроводниковой литографии и проблем отвода тепла.

Более того, динамическая природа производственных сред приводит к феномену “дрейфа концепций”, когда статистические зависимости между параметрами технологического процесса меняются во времени. Как отмечают П.В. Матренин и Р.Н. Хамитов, изменение внешних условий и взаимосвязей элементов системы неизбежно ведет к деградации точности предиктивных моделей искусственного интеллекта [7]. Следовательно, система управления должна не только быстро решать NP-трудные задачи статической оптимизации, но и обладать архитектурной гибкостью для автоматического обновления своих расчетных модулей без остановки производственного цикла.

Актуальность перехода к интеллектуальным методам управления подтверждается исследованиями ведущих специалистов в области автоматизации технологических процессов и робототехники. Выходом из данного тупика является архитектурный сдвиг – использование параллелизма на уровне принципиально иных физических принципов обработки информации. **Цель работы** – разработка научно-методического аппарата построения гетерогенных автоматизированных систем управления (АСУ ТП), обеспечивающих квазиоптимальное управление объектами за счет офлоадинга (offloading) комбинаторных подзадач на сопроцессоры графических ускорителей (GPU) и симуляторы квантовых процессов.

1. Информационно-теоретическое обоснование ускорения

В рамках теории управления любой вычислительный контур можно рассматривать как канал передачи информации с ограниченной пропускной способностью [6]. Для успешного подавления возмущения в системе с фазовым пространством размерности n , управляющий контроллер должен обработать объем данных $V \propto n^k$. Если расчет управляющего воздействия занимает время $T_{calc} > T_{process}$, возникает дефицит управления, приводящий к деградации качества регулирования.

Аппаратное ускорение на базе однородных вычислительных сред (ОВС) позволяет достичь коэффициента ускорения K_s , определяемого как отношение времени последовательного выполнения T_{seq} к параллельному T_{par} . Однако простого распараллеливания недостаточно для NP-трудных задач. Требуется смена парадигмы представления данных: переход от

битовых операций к энергетической минимизации состояний физической системы.

2. Модель комбинаторной оптимизации на основе релаксационных механизмов

Для задач микро-планирования, то есть для распределения заданий между станками в рамках одной смены, предлагается задействовать динамику релаксационных нейронных сетей Хопфилда-Изинга. Принцип здесь изыщен: мы проектируем функцию Ляпунова (или “энергию”) сети так, чтобы её самый глубокий провал, глобальный минимум, точно соответствовал идеальному решению нашей исходной задачи целочисленного программирования.

Давайте посмотрим, как это работает на практике. Допустим, нам нужно минимизировать потери времени при переналадке оборудования. Математически эти потери описывает функционал:

$$J = \sum_{i,j} d_{ij} x_{ij},$$

где d_{ij} – стоимость перехода, x_{ij} – бинарная переменная выбора пути. Эта задача напрямую транслируется в энергетическую функцию самой сети:

$$E_{Hopfield} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} s_i s_j + \sum_{i=1}^N \theta_i s_i.$$

Ключевой этап — синтез архитектуры. Матрица весов связей $W=\{w_{ij}\}$ и вектор порогов $\Theta=\{\theta_i\}$ собираются аналитически из коэффициентов целевой функции J . При этом в расчёт сразу закладываются штрафные функции за нарушение ограничений (например, жёсткое условие, что один станок не может выполнять две операции одновременно):

$$\sum_i v_{x,i} = 1, \quad \sum_x v_{x,i} = 1.$$

Благодаря свойству асимптотической устойчивости сеть неизбежно сворачивает своё состояние $s_i \in \{0,1\}$ в локальный энергетический минимум. Этот результат мы и считываем, как квазиоптимальный план загрузки ресурсов. Главное преимущество такого подхода раскрывается на GPU-ускорителях: операция умножения матрицы на вектор состояния полностью параллелится на каждом такте итерации. Стоит отметить, что эффективность подобных рекуррентных структур уже доказана в смежных областях, например, при идентификации нелинейных динамических объектов [8].

3. Методика подготовки задач для квантовых акселераторов

Глобальная перестройка производственного расписания — это задача уровня MES/ERP с пересчетом тысячи взаимосвязей. В этом случае можно применить квадратичную неограниченную бинарную оптимизацию (QUBO):

$$\text{Minimize } f(x) = x^T Q x + c^T x, \quad x \in \{0,1\}^n.$$

Чтобы свести исходную задачу к формату QUBO, необходимо пройти несколько этапов.

1. **Бинаризация переменных.** Время начала операции T_k задается на сетку бит $b_m \in \{0, 1\}$ для получения приближения $T_k \approx \sum 2^{-m} b_m$.

2. **Трансляция ограничений.** Условия $Ax=b$ встраивают в целевую функцию с помощью штрафного члена высокого порядка $P(Ax - b)^2$. Коэффициент штрафа P : подбирают эвристически так, чтобы он гарантированно доминировал над значениями целевой функции, делая нарушение ограничения экономически невыгодным для модели.

3. **Редукция к Изингову гамильтониану.** Осуществляется переход от логических битов x_i к спиновым переменным $s_i \in \{-1, +1\}$ по линейному преобразованию:

$$x_i = \frac{1+s_i}{2}.$$

Как результат преобразований, итоговый гамильтониан, который минимизирует квантовый отжигатель, принимает канонический вид:

$$H_P(s) = \sum_i h_i s_i + \sum_{i < j} J_{ij} s_i s_j.$$

Важно отметить, что принципы минимизации энергетического функционала можно применить к задачам пространственного проектирования и автоматизированному синтезу топологии промышленных объектов. В частности, методология И.М. Зуги и В.Г. Хомченко [2] предлагает решение задачи оптимального размещения элементов на сложном пересеченном рельефе с использованием алгоритма дифференциальной эволюции, который позволяет эффективно находить глобальный минимум целевой функции даже при наличии мультимодальности. Обозначенные выше факты и закономерности подтверждают универсальность математического аппарата релаксации для различных классов инженерных задач, в том числе применительно к цифровой трансформации предприятий и технологических процессов.

Обозначенные выше факты и закономерности подтверждают универсальность математического аппарата релаксации для различных классов инженерных задач, в том числе применительно к цифровой трансформации предприятий и технологических процессов [3, 4].

В основе предлагаемого подхода лежит фундаментальное различие механизмов релаксации. Традиционный имитационный отжиг требует термической флуктуации для преодоления энергетического барьера (“прыжок”), то квантовая динамика позволяет системе осуществить прохождение сквозь него (“туннелирование”). Классические стохастические методы часто буксуют в геометрии узких пиков ландшафта целевой

функции. **Именно поэтому** квантовый поиск получает своё кратное преимущество — он способен эти препятствия просто игнорировать.

4. Результаты экспериментальной верификации моделей

Для тестов задействовали цифровой двойник реального склада агропромышленной продукции. На его карте было размечено 50 ячеек хранения, где курсировали 5 автономных погрузчиков. Основной целью исследования стала комбинаторная маршрутизация – поиск кратчайшего пути, который бы связал все 50 контрольных точек в один непрерывный замкнутый цикл. Фактически исследовалась адаптированная версия TSP (Travelling Salesman Problem).

Этап 1. Эмуляция НС Хопфилда (GPU vs CPU)

В качестве программной платформы был выбран язык C++, где через библиотеку CUDA удалось напрямую обратиться к вычислительным ядрам графического ускорителя NVIDIA RTX 4080 для выполнения шагов алгоритма. Как видно из анализа вычислительной сложности, обновление N нейронов требует N^2 операций. На центральном процессоре (Intel Core i7) эти операции выполняются последовательно, тогда как ядро GPU задействует тысячи потоковых процессоров одновременно.

Результат. При размерности задачи $N=500$ достигнуто среднее ускорение в 96 раз относительно однопоточной реализации на CPU. Время расчета сократилось с 4.8 секунд до 0.05 секунды. Качество решения (отклонение длины пути от идеала, найденного полным перебором для малых N) составило всего 3.8%.

Этап 2. Эмуляция квантового отжига (QUBO)

Для задачи распределения ограниченного парка техники (M машин) между набором заявок (K точек) использовалась библиотека D-Wave Ocean SDK в режиме гибридного облачного решателя.

Результат. Использование квантово-классического солвера позволило найти маршруты, которые оказались в среднем на 7.2% короче, чем полученные стандартным генетическим алгоритмом (GA) за аналогичное процессорное время. Эффективность обусловлена способностью квантового алгоритма эффективно преодолевать зоны “локальных ловушек” энергетического ландшафта. По показателю отклонения от глобального оптимума решение QA составило 2.5%, что является лучшим результатом среди всех протестированных эвристик (см. таблицу).

Заключение. Исследование доказывает исходную гипотезу: обойти вычислительный барьер в системах управления сложными высокоразмерными процессами можно – перейдя к гетерогенным архитектурам:

– центральные процессоры (CPU) берут на себя то, что требует мгновенной реакции, например, классическое ПИД-регулирование;

Таблица – Сравнительные характеристики методов оптимизации (составлено автором по результатам эксперимента)

Table – Comparative characteristics of optimization methods (compiled by the author based on experimental results)

Алгоритм	Аппаратная база	Время счета (с)	Отклонение от глобального оптимума	Выигрыш по длине маршрута по сравнению с GA
B&B (Branch-and-Bound)	CPU	142.5	0% (оптимум)	—
Генетический алгоритм (GA)	CPU	12.4	8.1%	Базовый уровень
НС Хопфилда	GPU	0.13	3.8%	Сокращение ошибки на ~53%
Гибридный QA	Cloud / QPU	4.2	2.5%	Маршрут короче на 7.2% (относительно результата GA) Сокращение ошибки на 69.1%

– графические ускорители (GPU) решают задачи линейной алгебры и осуществляют вычисления для нейросетевых моделей;

– эмулируемые квантовые сопроцессоры решают NP-полные задачи глобальной оптимизации.

Вычислительные эксперименты подтверждают работоспособность алгоритма. При этом сокращается время поиска квазиоптимального решения до миллисекунд. Такие эвристики стало реально встраивать прямо в контуры обратной связи АСУ ТП, где критична каждая доля секунды.

Соединение этих технологий закладывает основу для создания полноценных цифровых двойников-технологов. По сути, это самодостаточные программные комплексы. Они смогут самостоятельно принимать решения в многокритериальных задачах производства и логистики, адаптируясь к меняющейся среде без постоянного контроля со стороны человека-оператора.

Разработанная платформа также открывает путь к повышению кибернетической устойчивости производств. Чтобы оценить среднее время до отказа системы безопасности (MTTC) в современных АСУП, нужно учитывать хаотичность и нестационарность потоков инцидентов. С этим эффективно справляются методы имитационного моделирования на базе марковских цепей [5]. Если объединить наши квантово-нейросетевые ускорители с такими моделями оценки живучести, можно создавать доверенные автономные системы. Они будут не просто оптимизировать

цикл, но и динамически перераспределять ресурсы при первых признаках угрозы целостности данных.

Наконец, самое главное – практическое применение. Следующим шагом мы видим интеграцию наших алгоритмов в существующие SCADA/MES-системы агропромышленных предприятий. Эту работу мы планируем вести, опираясь на наш опыт создания цифровых двойников реальных агрегатов и собственные методики моделирования динамики итерационных процессов [10].

Внедрение гетерогенных архитектур в критическую инфраструктуру неразрывно связано с ростом кибернетических угроз. Для перевода требований нормативной базы в плоскость измеряемых показателей и принятия обоснованных решений по управлению рисками информационной безопасности целесообразно опираться на апробированные подходы. Представленная в работе С.Ю. Тырышкина и Е.В. Шарлаева методология [9] является эффективным инструментом, который позволяет формализовать оценку защищённости систем промышленной автоматизации и служит надёжным фундаментом для создания доверенных автономных комплексов.

Список литературы

1. Егоров, А.Ф. Интегрированные автоматизированные системы управления химическими производствами и предприятиями: учеб. пособие для вузов / А.Ф. Егоров. – Москва: Юрайт, 2023. – 248 с. – ISBN 978-5-534-13871-9.
2. Зуга, И.М. Автоматизированный синтез оптимальных схем расположения производственных объектов на пересеченном рельефе / И.М. Зуга, В.Г. Хомченко // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2024. – Т. 21, № 8(242). – С. 11-20. – DOI 10.14489/vkit.2024.08.pp.011-020. – EDN OJBLJA.
3. Иваньо, Я.М. Многоэтапная оптимизация производства и переработки аграрной продукции в экстремальных условиях деятельности товаропроизводителя / Я.М. Иваньо, Л.С. Ананьев // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2026. – № 1(58). – С. 64–76. – DOI 10.51215/2411-6483-2026-58-64-76.
4. Иваньо, Я.М. Моделирование рисков для разных природно-климатических территорий Иркутской области / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, Н.В. Бендик // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: матер. XI междунар. научно-практ. конф., Иркутск, 28-29 апреля 2022 года. – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2022. – С. 167-175. – EDN ZHSSMW.
5. Касенов, А.А. Непрерывные марковские модели кибератак: имитационное моделирование / А.А. Касенов, А.А. Магазев, Я.А. Серегина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2025. – № 4(56). – С. 153-164. – DOI 10.21685/2227-8486-2025-4-10. – EDN NTOFJB.
6. Лукин, Н.А. Технологии программирования алгоритмов на архитектурах однородных вычислительных сред / Н.А. Лукин, А.Ю. Филимонов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 40. – С. 61-70. – DOI 10.17223/19988605/40/7.
7. Матренин, П.В. Алгоритм формирования стратегии автоматического обновления моделей искусственного интеллекта в задачах прогнозирования в электроэнергетике / П.В. Матренин, Р.Н. Хамитов // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 7(127). – С. 228-247. – EDN TDAGPZ.

8. Сельвесюк Н.И. Задача автоматического управления и контроля безопасности посадки самолёта при действии сильных микропорывов ветра / Н.И. Сельвесюк, Г.Н. Лебедев, А.П. Москалев [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 7(209). – С. 214-226. – DOI 10.23683/2311-3103-2019-7-214-226. – EDN RBSPUN.

9. Тырышкин, С.Ю. Методология оценки рисков информационной безопасности для систем промышленной автоматизации и управления / С.Ю. Тырышкин, Е.В. Шарлаев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2026. – № 2(155). – С. 107-127. – EDN AOYHJD.

10. Tyryshkin, S.Yu. Neural Network Models of Iterative Dynamics in Automated Control Systems for Oil Refinery Processes / Russian Engineering Research, 2026, vol. 46, no. 4, pp. 530-537. – DOI: 10.3103/S1068798X26700437.

References

1. Egorov, A.F. Integrirrovannye avtomatizirovannye sistemy upravleniya khimicheskimi proizvodstvami i predpriyatiyami [Integrated automated control systems for chemical production and enterprises: a textbook for universities]. Moscow: Yurayt, 2023, 248 p.

2. Zuga, I.M., & Khomchenko, V.G. Avtomatizirovanniy sintez optimal'nykh skhem raspolozheniya proizvodstvennykh ob'ektov na peresechenom rel'efe [Automated synthesis of optimal layouts of industrial objects on rugged terrain]. Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh technologies, 2024, vol. 21, no. 8(242), pp. 11-20.

3. Ivan'o, Ya.M., Ananiev, L.S. Mnogoetapnaya optimizatsiya proizvodstva i pererabotki agrarnoi produktsii v ekstremal'nykh usloviyakh deyatel'nosti tovaroproizvoditelya [Multi-stage optimization of agricultural production and processing in extreme conditions of activity of commodity producers]. Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki, 2026, no. 1(58), pp. 64-76.

4. Ivanyo, Ya.M. et all. Modelirovanie riskov dlya raznykh prirodno-klimaticheskikh territorii Irkutskoi oblasti [Risk modeling for different natural and climatic territories of the Irkutsk region]. Molodezhnyj, 2022, pp. 167-175.

5. Kasenov, A.A. et all. Nepreryvnye markovskie modeli kiberatak: imitatsionnoe modelirovanie [Continuous Markov models of cyberattacks: simulation modeling]. Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve, 2025, no. 4(56), pp. 153-164.

6. Lukin, N.A., Filimonov, A.Yu. Tekhnologii programmirovaniya algoritmov na arkhitekturakh odnorodnykh vychislitel'nykh sred [Technologies for programming algorithms on architectures of homogeneous computing environments]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika, 2017, no. 40, pp. 61-70.

7. Matrenin, P.V., Khamitov, R.N. Algoritm formirovaniya strategii avtomaticheskogo obnoveniya modeli iskusstvennogo intellekta v zadachakh prognozirovaniya v elektroenergetike [Algorithm for forming a strategy for automatic updating of artificial intelligence models in forecasting problems in electric power industry]. Inzhenernyi vestnik Dona, 2025, no. 7(127), pp. 228-247.

8. Selvesyuk, N.I. et all. Zadacha avtomaticheskogo upravleniya i kontrolya bezopasnosti posadki samolyota pri deistvii sil'nykh mikro-poryvov vetra [The problem of automatic control and safety monitoring of aircraft landing under strong microbursts]. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki, 2019, no. 7(209), p. 214-226.

9. Tyryshkin, S.Yu., Sharlaev, E.V. Methodology for assessing information security risks for industrial automation and control systems [Information security risk assessment methodology for industrial automation and control systems]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya Priborostroenie, 2026, no. 2(155), pp. 107-127.

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 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: 08.07.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 27.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026.2026

Сведения об авторе

Тырышкин Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ИВТиИБ. Алтайский государственный технический университет им.И.И.Ползунова.

Контактная информация: АлтГТУ им.И.И.Ползунова, 656038, Российская Федерация, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, e-mail: service.vip-spe@yandex.ru, ORCID ID: . <https://orcid.org/0009-0006-5901-9947>

Information about author

Sergey Yu. Tyryshkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Information Security, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov.

Contact information: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 656038, Russian Federation, Altai Territory, Barnaul, Lenin Ave., 46, e-mail: service.vip-spe@yandex.ru, ORCID ID: . <https://orcid.org/0009-0006-5901-9947>



DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-84-97

УДК 519.86:636

Научная статья

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ПОГОЛОВЬЯ ПАСТБИЩНЫХ ЖИВОТНЫХ МОНГОЛИИ

Энхбат Ариунжаргал

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
*п. Молодежный, с.п. Молодежное, муниципальный район Иркутский,
Иркутская область, Россия*

Аннотация. Пастбищное животноводство Монголии характеризуется значительной изменчивостью природно-климатических условий, различиями в обеспеченности кормовыми и водными ресурсами, специализации домохозяйств и состоянии пастбищных угодий. В связи с этим определение рациональной структуры и численности поголовья требует применения математического моделирования, учитывающего региональные, производственные, ресурсные и экологические особенности. Цель исследования заключается в разработке математических моделей оптимизации структуры и численности пастбищных животных для различных природно-экономических условий Монголии с учетом деградации пастбищ. Для моделирования структуры и численности пастбищных животных предложена многоуровневая параметрическая задача. В качестве целевой функции использована прибыль от получаемой продукции. Ограничения описывают продуктивность животных, кормовые, водные, земельные и трудовые ресурсы, специализацию домохозяйств. Состояние пастбищ характеризуется коэффициентом деградации и нормами выпаса на одну голову животного разного вида. Рассматриваются распространенные виды пастбищных животных: овцы, козы, лошади, крупный рогатый скот и верблюды. В экстремальной задаче учитываются особенности четырех основных природно-экономических регионов Монголии: Западного, Хангайского, Центрального и Восточного, которые, прежде всего, связаны с состоянием и динамикой кормовой базы, а также уровнем деградации пастбищ. При моделировании учитывается также специализация домохозяйств, основанная на традициях ведения пастбищного животноводства. Расчеты выполняются дифференцированно для каждого природно-экономического региона. Результаты моделирования показывают, что изменение условий деятельности домохозяйств и состояния пастбищ приводит к изменению оптимального соотношения видов животных и величины максимальной прибыли. Разработанные модели позволяют повышать эффективность планирования структуры и поголовья пастбищных животных для управления отраслью на уровне домохозяйств, регионов и страны.

Ключевые слова: многоуровневая параметрическая модель, пастбищное животноводство, природно-экономический регион, деградация, Монголия.

Для цитирования: Энхбат Ариунжаргал Особенности моделирования структуры и поголовья пастбищных животных Монголии. *Электронный научно-практический журнал “Актуальные вопросы аграрной науки”*. 2026; 3(60):84-97. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-84-97.

FEATURES OF MODELING THE STRUCTURE AND POPULATION OF GRAZED ANIMALS IN MONGOLIA

Enkhbat Ariunjargal

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
Molodezhny, Molodezhnoye rural settlement, Irkutsk municipal district, Irkutsk region, Russia

Abstract. Pasture livestock farming in Mongolia is characterized by significant variability in natural and climatic conditions, differences in forage and water resources, household specialization, and pasture condition. Therefore, determining the rational structure and size of livestock requires the use of mathematical modeling that takes into account regional, production, resource, and environmental factors. The objective of this study is to develop mathematical models for optimizing the structure and number of pasture animals for various natural and economic conditions in Mongolia, taking pasture degradation into account. A multilevel parametric problem is proposed to model the structure and number of pasture animals. The objective function is profit from the resulting output. Constraints describe animal productivity, forage, water, land, and labor resources, and household specialization. Pasture condition is characterized by a degradation coefficient and grazing rates per head of animal of different species. Common pasture animal species are considered: sheep, goats, horses, cattle, and camels. The extreme value problem takes into account the characteristics of Mongolia's four main natural and economic regions: Western, Khangai, Central, and Eastern. These are primarily related to the state and dynamics of the forage base, as well as the level of pasture degradation. The modeling also takes into account household specialization based on pasture livestock farming traditions. Calculations are performed differentially for each natural and economic region. The modeling results show that changes in household operating conditions and pasture conditions lead to changes in the optimal mix of animal species and the value of maximum profit. The developed models enable more efficient planning of pasture livestock structure and population for industry management at the household, regional, and national levels.

Key words: multilevel parametric model, pastoral livestock farming, natural-economic region, degradation, Mongolia.

For citation: Enkhbat Ariunjargal. Features of modeling the structure and population of grazed animals in Mongolia. *Electronic scientific-Practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2026; 3(60):84-97. DOI 10.51215/2411-6483-2026-60-84-97.

Введение. Пастбищное животноводство является одной из основных отраслей сельского хозяйства Монголии. Его функционирование непосредственно связано с использованием естественных кормовых угодий, вследствие чего структура и численность поголовья в значительной степени зависят от состояния пастбищ, климатических условий, доступности воды и пространственного распределения природных ресурсов. При превышении допустимой нагрузки снижается продуктивность пастбищной растительности, усиливаются процессы деградации, а также сокращается фактически доступная кормовая база [3, 14,16].

В структуре животноводства Монголии основное место занимают овцы, козы, лошади, крупный рогатый скот и верблюды. Их соотношение существенно различается по территории страны, что связано как с природными условиями, так и со сложившейся специализацией хозяйств. Поэтому оптимальная структура поголовья должна определяться дифференцированно с учетом природно-климатических и экологических факторов и особенностей пастбищ [12, 13].

В настоящем исследовании рассматриваются Западный, Хангайский, Центральный и Восточный природно-экономические регионы. Необходимость регионального подхода обусловлена различиями в продуктивности пастбищ, обеспеченности кормовыми и водными ресурсами, климатических характеристиках, степени деградации земель и территориальном размещении животноводства. Эти группы характеристик необходимо учитывать при моделировании структуры и поголовья пастбищных животных [15, 16, 20].

Одним из наиболее изменчивых компонентов пастбищной системы является кормовая база. Урожайность пастбищ и кормовых культур зависит от притока солнечной радиации, температуры воздуха, количества осадков, испарения влаги, продолжительности вегетационного периода, особенности рельефа, экспозиции склонов и других факторов. Изменчивость природно-климатических факторов сильно влияет на пастбищное животноводство – структуру и численность поголовья в разные годы. Поэтому при моделировании разных аспектов получения продукции от пастбищных животных следует учитывать разные условия деятельности домохозяйств [18].

Не менее важным ограничивающим фактором является обеспеченность водой. Наличие кормового ресурса само по себе не означает возможность полного использования пастбищной территории, если доступ к водным источникам ограничен. Вследствие этого водные ресурсы наряду с кормовыми, земельными и трудовыми ресурсами включаются в систему ограничений оптимизационной задачи [17].

Дополнительное воздействие на пастбищное животноводство оказывает деградация угодий. При ухудшении состояния пастбищ уменьшается доступный объем растительной массы и возрастает экологическая нагрузка на сохранившиеся продуктивные территории. Поэтому при оптимизации структуры поголовья экологическое состояние земель должно рассматриваться совместно с производственно-экономическими характеристиками [1, 11, 19].

Использование методов математического программирования позволяет формализовать взаимосвязь между экономическим результатом, структурой поголовья и ресурсными ограничениями. Линейное программирование применяется для определения оптимального сочетания видов животных при

фиксированных исходных характеристиках [7]. Однако такая постановка описывает только одно состояние системы – оптимальное решение [9].

Для учета изменчивости внешней среды линейная постановка может быть расширена благодаря методам параметрического программирования. В качестве параметров могут использоваться метеорологические факторы и время [4, 5]. Поскольку характеристики параметрической модели имеют иерархическую структуру, для оптимизации аграрной продукции применяются многоуровневые модели, позволяющие получать результаты для усредненных, благоприятных и неблагоприятных условий [6, 8].

Если изменения внешней среды имеют вероятностный характер, возникает необходимость дополнительно учитывать вероятность реализации соответствующих состояний. В исследовании это выполняется путем перехода от многоуровневой параметрической к динамико-стохастической постановке задачи.

При этом важно различать неблагоприятные и благоприятные условия и экстремальные события. Нижний и верхний уровни характеризуют изменение условий в пределах рассматриваемого диапазона, тогда как события соответствуют отражению экстремальных состояний внешней среды. Вероятность экстремальных событий определяется на основе статистического анализа данных [5, 8].

Таким образом, моделирование пастбищного животноводства Монголии требует последовательного перехода от базовой оптимизационной задачи к многоуровневому и вероятностному описанию производственных процессов с одновременным учетом региональной специализации и деградации пастбищных ресурсов.

Цель работы – разработка моделей структуры и численности поголовья пастбищных животных на основе методов линейного, многоуровневого параметрического и динамико-стохастического программирования с учетом природно-экономических особенностей регионов Монголии, изменчивости кормовой базы, обеспеченности водными ресурсами, специализации животноводства и деградации пастбищных угодий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- сформировать информационную базу, характеризующую пастбищное животноводство Западного, Хангайского, Центрального и Восточного природно-экономических регионов Монголии;
- описать детерминированную задачу для определения оптимальной структуры и численности поголовья пастбищных животных при наличии и отсутствии деградации земель;
- разработать многоуровневую параметрическую модель для оптимизации структуры и численности животных при неблагоприятных, усредненных и благоприятных условиях деятельности домохозяйств;

Материалы и методы. Информационную основу исследования

составили статистические данные о структуре и численности поголовья сельскохозяйственных животных Монголии [20], материалы о состоянии пастбищных угодий [16, 19], сведения о природно-экономических условиях территорий [18, 20], нормативные характеристики кормления сельскохозяйственных животных [10], многолетние данные об урожайности кормовой базы, а также сведения о водных ресурсах пастбищных территорий [17, 20].

В исследовании рассматриваются овцы, козы, лошади, крупный рогатый скот и верблюды. При формировании оптимизационной задачи учитываются продуктивность животных, кормовые и водные ресурсы, площадь пастбищ, трудоемкость содержания поголовья, степень деградации угодий и специализация домохозяйств.

В качестве расчетной единицы принято среднее домохозяйство с площадью используемых пастбищ 1400 га. Указанная площадь включается в модель при формировании ограничения по площади пастбищ и сохраняется неизменной для сопоставляемых вариантов расчетов. При заданной площади определяется оптимальное количество животных каждого вида с учетом совокупности ресурсных, производственных и экологических условий.

Такой принцип расчета позволяет оценивать изменение структуры и численности поголовья среднего домохозяйства при различных характеристиках кормовой базы и состоянии пастбищных угодий. При этом соотношение видов животных заранее не фиксируется, а определяется в процессе оптимизации, что дает возможность учитывать изменение условий функционирования системы и степень деградации пастбищ.

Основные результаты. В результате исследования разработана линейная модель оптимизации структуры и численности пастбищных сельскохозяйственных животных. Кроме того, предложена многоуровневая параметрическая модель, позволяющая получать оптимальные решения для различных условий деятельности домохозяйств: усредненных, благоприятных и неблагоприятных. В дополнение к параметрической модели разработана стохастическая модель, позволяющая оптимизировать структуру и численность пастбищных животных при реализации благоприятных и неблагоприятных событий. Данная модель связана с многоуровневой параметрической моделью. Линейная и многоуровневая параметрическая модели применялись для оптимизации структуры и поголовья пастбищных животных в различных природно-экономических регионах Монголии.

Разработанные модели основаны на многоуровневой задаче параметрического программирования, которая преобразована для оптимизации структуры и численности пастбищных животных [2, 5]. Приведем преобразованную задачу, особенностью которой является поиск целочисленного решения – оптимальной численности пастбищных животных.

Для конкретного случая целевая функция многоуровневой параметрической задачи записывается в следующем виде:

$$f^s = \sum_{k \in K} c_k y_k \rightarrow \max, \quad (1)$$

где c_k – прибыль от продажи единицы продукции животных вида k (руб./гол) с учетом уровня функционирования сельскохозяйственного товаропроизводителя s , характеризующего условия деятельности товаропроизводителя, y_k – количество животных вида k , K – множество видов животных. Искомыми переменными являются y_k – количество животных вида k .

Ограничение описывается следующими неравенствами:

$$\sum_{k \in K} d_{ik}^s(t)(1-\alpha)y_k \leq b_i \quad (i \in I, s \in S), \quad (2)$$

$$y_k \geq 0 \quad (3)$$

где $d_{ik}^s(t)$ – коэффициенты ограничений задачи, связанные с кормовыми, водными, земельными и трудовыми ресурсами для животного вида k при уровне s в момент времени t ; t – параметр времени (год); b_i – ограничения по ресурсам i ; I – множество ограничений; S – множество уровней, характеризующих усредненные, неблагоприятные и благоприятные условия. Экстремальная задача (1)-(3) справедлива для значений d_{ik}^s , соответствующих условиям [2]:

$$p \geq p_k^{HV}, p \geq p_k^{BV} \quad (4)$$

где p_k^{HV} , p_k^{BV} – вероятности перехода значений изменяющихся коэффициентов задачи в неблагоприятные (НУ) и благоприятные (ВУ) события соответственно.

Экологическое состояние пастбищ учитывается посредством коэффициента деградации α . Его значение изменяется согласно условию $1 > \alpha > 0$. Включение данного коэффициента позволяет оценивать изменение оптимальной структуры и численности поголовья при ухудшении состояния пастбищных угодий [7, 10, 12].

Многоуровневая параметрическая модель позволяет получать оптимальные решения для различных условий деятельности домохозяйств. Нижний, средний и верхний уровни экстремальной задачи характеризуют соответственно неблагоприятные, усредненные и благоприятные условия. При изменении уровня изменяются соответствующие коэффициенты задачи, вследствие чего для каждого уровня определяется оптимальная структура и численность поголовья.

Изменение условий не приводит к пропорциональному росту или уменьшению численности всех видов животных. Для каждого уровня оптимальное соотношение овец, коз, лошадей, крупного рогатого скота и верблюдов определяется с учетом совокупности действующих ограничений

модели. Поэтому изменение характеристик может сопровождаться как увеличением, так и уменьшением численности отдельных видов животных.

Для учета экстремальных изменений внешней среды используется стохастическая модель. Ее применение позволяет дополнительно учитывать вероятностный характер крайних изменений условий функционирования пастбищного животноводства.

Для вероятностной оценки результатов целевая функция стохастической модели может быть представлена в виде:

$$f^{sp} = \sum_{k \in K} c_k y_k \rightarrow \max, \quad (5)$$

где c_k – прибыль от продажи единицы продукции животных вида k (руб./гол) с учетом уровня s , характеризующего условия деятельности товаропроизводителя, y_k – количество животных вида k , K – множество видов животных. Искомые переменными являются y_k – количество животных вида k .

Ограничение описывается следующими неравенствами:

$$\sum_{k \in K} d_{ik}^{sp}(t)(1-\alpha)y_k \leq b_i \quad (i \in I, s \in S), \quad (6)$$

где $d_{ik}^{sp}(t)$ – коэффициенты ограничений задачи, связанные с кормовыми, водными, земельными и трудовыми ресурсами для животного вида k при уровне s и событии, соответствующем вероятности p . Модель (5)-(6) справедлива для значений $d_{ik}^{sp}(t)$, соответствующих условиям:

$$p < p_k^{HV}, p < p_k^{BV}. \quad (7)$$

Условие (3) добавляется и к задаче (5)-(7).

В стохастической модели благоприятные и неблагоприятные события рассматриваются с учетом вероятностей их реализации. Это позволяет определять оптимальную структуру и численность поголовья не только при изменении условий в пределах нижнего и верхнего уровней, но и при возникновении экстремальных изменений внешней среды.

Таким образом, многоуровневая параметрическая модель используется для получения оптимальных решений при неблагоприятных, усредненных и благоприятных условиях деятельности домохозяйств, а связанная с ней стохастическая модель позволяет дополнительно учитывать благоприятные и неблагоприятные события и вероятности их реализации.

Для проведения расчетов использованы фактические данные за период до 2024 г. включительно, полученные из официальных государственных источников [18, 20]. На основе многолетних данных сформированы прогнозные значения изменяющихся характеристик модели на 2026 г. Методика прогнозирования и ее применение описаны в работе “Многоуровневое параметрическое моделирование структуры и поголовья пастбищных животных для природно-экономических регионов Монголии”,

принятой к публикации в журнале “Системный анализ и математическое моделирование”. Полученные прогнозные значения использованы в качестве исходной информации для многоуровневого параметрического моделирования структуры и численности пастбищных животных в различных природно-экономических регионах Монголии. Расчеты выполнены с помощью разработанного программного комплекса для моделирования структуры и поголовья животных в неблагоприятных, усредненных и благоприятных условиях, как без учета деградации пастбищных угодий ($\alpha=0$), так и с учетом соответствующих коэффициентов деградации (см. таблицу).

Таблица – Результаты реализации многоуровневой параметрической модели оптимизации структуры и численности пастбищных животных для различных природно-экономических регионов Монголии с учетом и без учета деградации пастбищных угодий на 2026 г.

Table – Results of the implementation of a multi-level parametric model for optimizing the structure and number of pasture animals for various natural and economic regions of Mongolia, taking into account and without taking into account the degradation of pasture lands for 2026

Название	Год	Уровни моделирования	Коэффициент деградации	Овцы	Козы	Лошади	Крупный рогатый скот	Верблюды	Прибыль тыс. руб.
Восточный	2026	НУ	0	0	0	44	1	9	3311.4
		СУ		0	0	40	1	14	3452.0
		ВУ		0	0	36	2	17	3557.5
		НУ	0,53	0	0	19	7	0	1544.6
		СУ		0	0	16	11	0	1605.2
		ВУ		0	0	14	13	1	1651.6
Хангайский	2026	НУ	0	176	195	103	53	10	11183.2
		СУ		156	196	106	54	10	11314.8
		ВУ		140	197	107	54	10	11413.5
		НУ	0,32	235	0	12	127	0	8260.0
		СУ		193	0	0	140	10	8957.9
		ВУ		154	0	0	148	10	9316.3
Центральный	2026	НУ	0	135	13	20	165	48	14421.9
		СУ		71	146	0	156	70	14984.4
		ВУ		18	195	0	152	74	15270.0
		НУ	0,33	226	0	0	140	2	8422.4
		СУ		162	0	0	148	6	9038.7
		ВУ		114	0	0	150	12	9534.9
Западный	2026	НУ	0	62	0	0	260	6	15071.7
		СУ		37	0	0	265	6	15295.7
		ВУ		12	0	3	266	6	15461.9
		НУ	0,33	80	63	0	153	6	9475.7
		СУ		50	0	0	178	0	9982.9
		ВУ		24	0	0	182	0	10218.1

Анализ результатов многоуровневого параметрического моделирования показывает, что изменение уровня функционирования системы влияет на оптимальную структуру поголовья и величину получаемой прибыли. Для каждого природно-экономического региона формируется собственное сочетание видов и численности животных, соответствующее заданным характеристикам и ограничениям модели.

В качестве базового варианта для сопоставления результатов принят средний уровень, соответствующий усредненным условиям деятельности домохозяйств. Отклонение от данного уровня позволяет оценить изменение экономического результата при переходе к неблагоприятным и благоприятным условиям, а также выявить особенности формирования оптимальной структуры поголовья в каждом природно-экономическом регионе.

Для Восточного региона при отсутствии деградации пастбищ максимальная прибыль при усредненных условиях составляет 3452.0 тыс. руб. По отношению к этому значению при неблагоприятных условиях прибыль снижается на 4.1%, а при благоприятных – увеличивается на 3.1%. При коэффициенте деградации $\alpha = 0.53$ прибыль при усредненных условиях составляет 1605.2 тыс. руб.; при неблагоприятных условиях она снижается на 3.8%, а при благоприятных – увеличивается на 2.9%. Для региона характерно преобладание в оптимальной структуре лошадей и крупного рогатого скота. При отсутствии деградации в структуре также представлены верблюды, численность которых возрастает от 9 голов при неблагоприятных условиях до 17 голов при благоприятных. В условиях деградации структура поголовья изменяется: численность лошадей сокращается с 19 до 14 голов при переходе от неблагоприятных к благоприятным условиям, тогда как поголовье крупного рогатого скота возрастает с 7 до 13 голов. Верблюды при неблагоприятных и усредненных условиях отсутствуют в оптимальном плане и появляются в количестве одной головы при благоприятных условиях.

Для Хангайского региона при отсутствии деградации пастбищ прибыль при усредненных условиях составляет 11314.8 тыс. руб. Относительно среднего уровня при неблагоприятных условиях она снижается на 1.2%, а при благоприятных — увеличивается на 0.9%. При коэффициенте деградации $\alpha = 0.32$ прибыль при усредненных условиях составляет 8957.9 тыс. руб.; при неблагоприятных условиях она уменьшается на 7.8%, а при благоприятных — возрастает на 4.0%. Без учета деградации в оптимальном плане представлены все рассматриваемые виды животных, при этом наибольшую численность имеют овцы и козы. При деградации структура существенно изменяется: козы полностью исключаются из оптимального плана, а численность лошадей резко сокращается. Одновременно при переходе от неблагоприятных к благоприятным условиям численность овец уменьшается с 235 до 154 голов,

тогда как поголовье крупного рогатого скота увеличивается со 127 до 148 голов. При усредненных и благоприятных условиях в оптимальной структуре сохраняются также 10 верблюдов.

Для Центрального региона при отсутствии деградации пастбищ прибыль при усредненных условиях составляет 14984.4 тыс. руб. По отношению к среднему уровню при неблагоприятных условиях она снижается на 3.8%, а при благоприятных – увеличивается на 1.9%. При коэффициенте деградации $\alpha = 0.33$ прибыль при усредненных условиях составляет 9038.7 тыс. руб.; при неблагоприятных условиях она уменьшается на 6.8%, а при благоприятных – возрастает на 5.5%. Без учета деградации изменение условий сопровождается заметным перераспределением поголовья: численность овец сокращается со 135 голов при неблагоприятных условиях до 18 при благоприятных, тогда как численность коз возрастает с 13 до 195 голов. Поголовье крупного рогатого скота изменяется в меньшей степени и составляет 152-165 голов, а численность верблюдов увеличивается с 48 до 74 голов. При деградации козы и лошади полностью исключаются из оптимального плана. Основу структуры составляют овцы и крупный рогатый скот, причем при улучшении условий численность овец сокращается с 226 до 114 голов, а крупного рогатого скота увеличивается со 140 до 150 голов. Одновременно возрастает численность верблюдов – с 2 до 12 голов.

Для Западного региона при отсутствии деградации пастбищ прибыль при усредненных условиях составляет 15295.7 тыс. руб. При неблагоприятных условиях она снижается относительно среднего уровня на 1.5%, а при благоприятных – увеличивается на 1.1%. При коэффициенте деградации $\alpha = 0.33$ прибыль при усредненных условиях составляет 9982.9 тыс. руб.; при неблагоприятных условиях она уменьшается на 5.1%, а при благоприятных – возрастает на 2.4%. Для региона характерно преобладание крупного рогатого скота в оптимальной структуре. Без учета деградации его численность составляет 260-266 голов, тогда как численность овец при переходе от неблагоприятных к благоприятным условиям сокращается с 62 до 12 голов. Козы в оптимальный план не входят, а лошади появляются только при благоприятных условиях в количестве 3 голов. При деградации крупный рогатый скот также сохраняет основное место в структуре, а его численность возрастает со 153 голов при неблагоприятных условиях до 182 голов при благоприятных. Одновременно численность овец сокращается с 80 до 24 голов. Козы в количестве 63 голов включаются в оптимальный план только при неблагоприятных условиях и исключаются при усредненных.

Заключение. Предложенное многоуровневое моделирование структуры и поголовья пастбищных животных разных видов на основе параметрического программирования позволяет оценивать оптимальные решения в диапазоне, соответствующего возможным изменениям условий деятельности домохозяйств.

Полученные оптимальные решения существенно различаются по видовому составу животных и величине прибыли для выделенных четырех природно-экономических регионов Монголии, что обусловлено неодинаковой реакцией региональных систем на изменение условий деятельности домохозяйств и состояния пастбищ.

Существенное влияние на структуру и поголовье пастбищных животных оказывает деградация земель. Для Восточного региона рекомендуется развивать коневодство и крупное рогатое скотоводство, для Западного – крупное рогатое скотоводство. В Хангайском и Центральном регионах при ухудшении состояния пастбищ наиболее приемлемо сочетание мелкого и крупного рогатого скотоводства.

Многоуровневое моделирование структуры и поголовья пастбищных животных позволяет сопоставлять возможные варианты развития животноводства, оценивать последствия ухудшения состояния пастбищ и обосновывать решения по распределению поголовья между видами животных с учетом экономического результата, климатических и экологических ограничений. Таким образом, разработанные модели ориентированы на поддержку принятия решений при планировании пастбищного животноводства в условиях территориальной неоднородности и изменчивости природной среды Монголии.

Предложенная многоуровневая параметрическая задача для моделирования структуры и поголовья пастбищных животных может быть дополнена стохастической задачей для получения оптимальных решений для экстремальных благоприятных и неблагоприятных событий. В перспективе предлагается ее реализация.

Список литературы

1. Андреева, О.В. Моделирование устойчивого землепользования горных пастбищ Кыргызстана на основе эффективного управления практиками животноводства / О.В. Андреева, Г.С. Куст, В.А. Лобковский // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 7. – С. 1079-1096. – DOI 10.31857/S2587556623070038.
2. Барсукова, М.Н. Параметрическая оптимизация получения продовольственной продукции с учетом особенностей характеристик временных рядов / М.Н. Барсукова, Я.М. Иваньо, В.В. Цыренжапова, И.А. Ковadlo // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2025. – Т. 29, № 3. – С. 181-193. – DOI 10.18698/2542-1468-2025-3-181-193. – EDN GYTDAH.
3. Грайворонский, В.В. Монголия: пастбищно-кочевое животноводство – рекордный рост скота и экологическая угроза / В.В. Грайворонский // Азия и Африка сегодня. – 2018. – № 9(734). – С. 49-55. – DOI 10.31857/S032150750000691-2. – EDN YLBFEL.
4. Иваньо, ЯМ. 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. – DOI 10.37791/2687-0649-2021-16-6-131-143. – EDN XXWMXF.
5. Иваньо, Я.М. Информационные технологии многоуровневого моделирования в решении управленческих задач аграрного производства / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова,

В.В. Цыренжапова // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2025. – Т. 21, № 3. – С. 850-857.

6. Иваньо, Я.М. Моделирование многоуровневой динамики урожайности сельскохозяйственных культур / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 12(213). – С. 66-77. – DOI 10.36718/1819-4036-2024-12-66-77. – EDN LOXNUO.

7. Иваньо, Я.М. Оптимизация численности сельскохозяйственных животных с учетом деградации пастбищ в Монголии / Я.М. Иваньо, А. Энхбат // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2026. – № 3(43). – С. 83-92. – DOI 10.25729/ESI.2026.43.3.007.

8. Иваньо, Я.М. О системе поддержки принятия решений для прогнозирования и планирования аграрного производства / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2025. – № 54. – С. 64-74. – DOI 10.51215/2411-6483-2025-54-64-74. – EDN ZLORWN.

9. Иваньо, Я.М. Эколого-математическое моделирование производства аграрной продукции / Я.М. Иваньо, Е.А. Ковалева. – Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2024. – 118 с. – ISBN 978-5-91777-259-2. – EDN OZNEAE.

10. Калашников, А.П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справочное пособие / А.П. Калашников, Н.И. Клейменов, В.Н. Баканов [и др.]. – Москва: [б. и.], 2003. – 359 с.

11. Лувсандорж, О. Нестабильность и потенциал устойчивого развития пастбищного скотоводства Монголии / О. Лувсандорж, И.Г. Сангадиева, Н.В. Шобдоева, Т.В. Полозова // Экономика сельского хозяйства России. – 2026. – № 2. – С. 139-147. – DOI 10.32651/262-139. – EDN OCYYVO.

12. Салугин, А.Н. Имитационное моделирование деградации пастбищных экосистем аридной зоны / А.Н. Салугин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – № 2. – С. 7-10. – DOI 10.31857/S2500262723020023. – EDN AOMXGY.

13. Сератирова, В.В. Оптимизация пастбищной нагрузки в Республике Калмыкия / В.В. Сератирова, В.А. Бананова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11(53). – DOI 10.18454/IRJ.2016.53.231. – EDN XBDVQR.

14. Суров А.И. Степные экосистемы юга России как фактор эффективного развития животноводства / Суров, Н.Г. Лапенко, О.В. Хонина [и др.] // Юг России: экология, развитие. – 2024. – Т. 19, № 1. – С. 95-104. – DOI 10.18470/1992-1098-2024-1-10. – EDN XLNMCA.

15. Темботова Ф.А. Закономерности пастбищной деградации семиаридных горных экосистем Центрального Кавказа / Ф.А. Темботова, В.А. Чадаева, О.Н. Горобцова [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 7. – С. 1097-1112. – DOI 10.31857/S2587556623070142. – EDN IFWZKN.

16. Байгаль орчин, аялал жуулчлалын яам. Монгол орны бэлчээрийн тулгамдсан асуудал: гарц ба шийдэл / ерөнхий редактор А. Бакей. – Улаанбаатар: ПРООН, 2019. – URL (дата обращения: 09.08.2026).

17. Байгаль орчин-эдийн засгийн данс: Усны биет урсгалын данс 2023 он / ерөнхий редактор Б. Батдаваа. – Улаанбаатар: Монгол улс, 2024. – 22 с. – URL (дата обращения: 09.07.2026).

18. Газар зохион байгуулалт, геодези, зураг зүйн ерөнхий газар : официальный сайт. – URL (дата обращения: 10.07.2026).

19. Монгол орны бэлчээрийн төлөв байдлын үндэсний тайлан. – Улаанбаатар : Монгол улс, 2018. – URL (дата обращения: 10.07.2026).

20. Монгол улсын Үндэсний статистикийн хороо: официальный сайт. – URL (дата обращения: 10.07.2026).

References

1. Andreeva, O.V. et all. Modelirovanie ustojchivogo zemlepol'zovaniya gornyh pastbishch Kyrgyzstana na osnove effektivnogo upravleniya praktikami zhivotnovodstva [Modeling sustainable land use of mountain pastures in Kyrgyzstan based on effective livestock management practices]. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya, 2023, vol. 87, no. 7, pp. 1079-1096. DOI 10.31857/S2587556623070038.
2. Barsukova, M.N. et all. Parametricheskaya optimizaciya polucheniya prodovol'stvennoj produkcii s uchetom osobennostej harakteristik vremennyh ryadov [Parametric optimization of food production taking into account the characteristics of time series]. Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 181-193. DOI 10.18698/2542-1468-2025-3-181-193. EDN GYTDAH.
3. Grajvoronskij, V.V. Mongoliya: pastbishchno-kochevoe zhivotnovodstvo – rekordnyj rost skota i ekologicheskaya ugroza [Mongolia: pastoral nomadic livestock farming – record livestock growth and environmental threat]. Aziya i Afrika segodnya, 2018, no. 9(734), pp. 49-55. DOI 10.31857/S032150750000691-2. EDN YLBFEL.
4. Ivanyo, Ya.M. et all. Zadacha parametricheskogo programmirovaniya s modelyami prognozirovaniya urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Parametric programming problem with models for forecasting crop yields]. Prikladnaya informatika, 2021, vol. 16, no. 6(96), pp. 131–143. DOI 10.37791/2687-0649-2021-16-6-131-143. EDN XXWMXF.
5. Ivanyo, Ya.M. et all. Informacionnye tekhnologii mnogourovnevnogo modelirovaniya v reshenii upravlencheskih zadach agrarnogo proizvodstva [Information technologies of multilevel modeling in solving management problems of agricultural production]. Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie, 2025, vol. 21, no. 3, pp. 850-857.
6. Ivanyo, Ya.M., Petrova, S.A. Modelirovanie mnogourovnevnoj dinamiki urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Modeling multilevel dynamics of crop yields]. Vestnik KrasGAU, 2024, no. 12(213), pp. 66-77. DOI 10.36718/1819-4036-2024-12-66-77. EDN LOXNUO.
7. Ivanyo, Ya.M., Enkhbat, A. Optimizaciya chislennosti sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh s uchetom degradacii pastbishch v Mongolii [Optimization of the number of farm animals taking into account pasture degradation in Mongolia]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii, 2026, no. 3(43), pp. 83-92. DOI 10.25729/ESI.2026.43.3.007.
8. Ivanyo, Ya.M., Petrova, S.A. O sisteme podderzhki prinyatiya reshenij dlya prognozirovaniya i planirovaniya agrarnogo proizvodstva [On a decision support system for forecasting and planning agricultural production]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki, 2025, no. 54, pp. 64-74. DOI 10.51215/2411-6483-2025-54-64-74. EDN ZLORWN.
9. Ivanyo, Ya.M., Kovaleva, E.A. Ekologo-matematicheskoe modelirovanie proizvodstva agrarnoj produkcii [Ecological and mathematical modeling of agricultural production]. Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, 2024, 118 p. ISBN 978-5-91777-259-2. EDN OZNEAE.
10. Kalashnikov, A.P., Klejmenov, N.I., Bakanov, V.N. et al. Normy i raciony kormleniya sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh: spravochnoe posobie [Standards and rations for feeding farm animals: reference manual]. Moscow, 2003, 359 p.
11. Luvsandorzh, O., Sangadieva, I.G., Shobdoeva, N.V., Polozova, T.V. Nestabil'nost' i potencial ustojchivogo razvitiya pastbishchnogo skotovodstva Mongolii [Instability and potential for sustainable development of pasture livestock farming in Mongolia]. Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii, 2026, no. 2, pp. 139–147. DOI 10.32651/262-139. EDN OCYYVO.
12. Salugin, A.N. Imitacionnoe modelirovanie degradacii pastbishchnyh ekosistem aridnoj zony [Simulation modeling of degradation of pasture ecosystems in the arid zone].

Rossijskaya sel'skohozyajstvennaya nauka, 2023, no. 2, pp. 7–10. DOI 10.31857/S2500262723020023. EDN AOMXGY.

13. Seratirova, V.V., Bananova, V.A. Optimizaciya pastbishchnoj nagruzki v Respublike Kalmykiya [Optimization of pasture load in the Republic of Kalmykia]. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal, 2016, no. 11(53). DOI 10.18454/IRJ.2016.53.231. EDN XBDVQP.

14. Surov, A.I., Lapenko, N.G., Honina, O.V. et al. Stepnye ekosistemy yuga Rossii kak faktor effektivnogo razvitiya zhivotnovodstva [Steppe ecosystems of southern Russia as a factor in the effective development of livestock farming]. Yug Rossii: ekologiya, razvitie, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 95–104. DOI 10.18470/1992-1098-2024-1-10. EDN XLNMCA.

15. Tembotova, F.A., Chadaeva, V.A., Gorobcova, O.N. et al. Zakonomernosti pastbishchnoj degradacii semiaridnyh gornyh ekosistem Central'nogo Kavkaza [Patterns of pasture degradation in semiarid mountain ecosystems of the Central Caucasus]. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya, 2023, vol. 87, no. 7, pp. 1097–1112. DOI 10.31857/S2587556623070142. EDN IFWZKN.

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 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: 18.08.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Revised: 27.09.2026

Дата принятия к печати / Accepted: 30.09.2026

Сведения об авторах

Энхбат Ариунжаргал – аспирант кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского.

Контактная информация: ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 664038, Россия, Иркутская область, муниципальный район Иркутский, с.п. Молодежное, п. Молодежный, 1/1, тел. 89996860885, e-mail: Eariuka329@gmail.com.

Information about authors

Enkhbat Ariunjargal – Postgraduate student at the Department of Informatics and Mathematical Modeling at 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 municipal district, Molodezhnoye village, Molodezhny, tel. 89996860885, e-mail: Eariuka329@gmail.com.

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. **Вниманию авторов, имеющих соавторов:** регистрационную форму заполняет основной контактный автор, остальные авторы указываются специальным списком в отдельном окне.
2. В электронной форме подачи статьи необходимо заполнить обязательные поля: “УДК”, “Название статьи”, “И.О. Фамилия автора”, “Название организации”, “Аннотация статьи”, “Ключевые слова”. Далее все поля дублируются на английском языке.
3. Текст статьи должен быть тщательно вычитан автором, который несет ответственность за научно-теоретический уровень публикуемого материала.

Структура статьи

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

ученое звание, должность, место работы (место учебы или соискательство), контактные телефоны, e-mail, почтовый индекс и адрес учреждения. Сведения об авторе(ах) дублируются на английском языке.

16. Нумерация страниц статьи обязательна.

Регистрация статей

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

Порядок рецензирования статей

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

Порядок рассмотрения статей

1. Представляя статью для публикации, автор тем самым выражает согласие на размещение полного ее текста в сети Интернет на официальных сайтах научной

электронной библиотеки (www.elibrary.ru) и электронного научно-практического журнала “Актуальные вопросы аграрной науки” (<http://agronauka.igsha.ru>).

2. Статьи принимаются по установленному графику:

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

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

3. Поступившие статьи рассматриваются редакционным советом в течение месяца.

4. Редакционный совет правомочен отправить статью на дополнительное рецензирование.

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

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

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

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

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

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

Conditions for publishing an article

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

Article formatting rules

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

Article structure

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

Registration of articles

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

The procedure for reviewing articles

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

Order of consideration of articles

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Выпуск 3(60)

сентябрь

Технический редактор – Н.В. Спиридонова

Перевод – П.Г. Асалханов

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Дата выхода: 30.09.2026.

Усл. печ. л. 6,5.

Адрес редакции, издателя, типографии:

Издательство ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ

664038, Иркутская обл., муницип. р-н. Иркутский
сельск. пос. Молодежное, пос. Молодежный, зд. 1/1