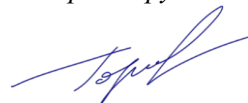


На правах рукописи



Горюнов Дмитрий Геннадьевич

**НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, РЕМОНТА И РЕКОНСТРУКЦИИ
ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

**4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство
и агрофизика**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Саратов 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова».

Научный консультант – Соловьев Дмитрий Александрович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Рязанцев Анатолий Иванович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технических систем, теории и методики образовательных процессов государственного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Государственный социально-гуманитарный университет»

Григоров Сергей Михайлович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры мелиорации земель и комплексного использования водных ресурсов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет»

Абдулмажидов Хамзат Арсланбекович,
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры сельскохозяйственного строительства федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»).

Защита состоится «__» _____ 20__ г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.035.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, д. 60, ауд. 325 им. А. В. Дружкина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Вавиловский университет и на сайте www.vavilovsar.ru

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 410012, г. Саратов, пр. им. П. Столыпина, зд. 4, стр. 3. E-mail: dissovet01@vavilovsar.ru

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Панкова Татьяна Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире, характеризующимся растущим демографическим давлением и климатическими изменениями, производство достаточного объема сельскохозяйственной продукции становится критически важной задачей, тесно связанной с надежным функционированием оросительных систем. В условиях России этот вопрос приобретает критическую важность, так как из-за недостаточного увлажнения под угрозой оказываются более 70 % сельхозугодий и около 80 % пашни, находящихся в зонах рискованного земледелия. Эти территории регулярно страдают от продолжительных засух и разрушительных суховеев, причем в степных и сухостепных районах засухи случаются каждые 2–3 года, что создает серьезные риски для устойчивого производства сельскохозяйственной продукции. Гарантировать стабильные урожаи и продовольственную безопасность страны в таких условиях способна только масштабная и научно обоснованная мелиорация, обеспечивающая продуктивность в 2–4 раза выше, чем на богарных землях.

Стабильная подача воды сельскохозяйственным культурам невозможна без согласованной работы всего технического комплекса, включающего в себя насосные станции, открытые и закрытые оросительные системы, а также дождевальную технику. Это, в свою очередь, достижимо лишь при наличии научно обоснованной системы эксплуатационных мероприятий, основанной на современных ресурсосберегающих технологиях.

Первым звеном такой системы является оптимизация работы насосных станций, позволяющая сократить энергозатраты ресурсоемкого начального этапа водоподачи на 15–25 %. Не менее важным направлением является поддержание в оптимальном состоянии ключевых гидротехнических сооружений – оросительных каналов и напорных трубопроводов, поскольку именно их техническое состояние напрямую определяет объем и качество воды, доставляемой на орошаемые поля. Проблема усугубляется высоким уровнем износа оросительных систем, достигшим в среднем 69,1 %. Данная ситуация требует не только масштабных работ по эксплуатации, ремонту и реконструкции, но и скорейшего внедрения ресурсосберегающих технологий и оптимизации технических комплексов функционирования оросительных систем. При этом принципиально важным представляется подход, в котором оптимизационные мероприятия охватывают не только насосное оборудование и эксплуатационно-ремонтную технику, но и завершающее звено технологической цепи – дождевальные машины, работающие непосредственно на орошаемом поле. Необходи-

дима всесторонняя оптимизация производственной цепочки «насосные станции – парк машин для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем – дождевальные машины».

Таким образом, внедрение современных ресурсосберегающих технологий и оптимизация технических комплексов позволят сократить ежегодные экономические потери АПК, оцениваемые более чем 90 млрд рублей, и будут способствовать достижению к 2030 году стратегической цели – увеличению площади орошаемых земель до 10 млн га.

Актуальность темы исследования подтверждена тем, что работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2010 годы и на период до 2013 года», Федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы», Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации (на период с 2022 по 2031 г.).

Степень разработанности темы. Исследования ведущих ученых и специалистов мелиоративной отрасли, таких, как Ф.К. Абдразаков (2002), И.П. Айдаров (1999), М.Н. Багров (1988), Л.И. Бадаев (1992), Т.С. Борщов (1985), А.В. Волков (2005), Ю.В. Гуляев (2000), В.С. Егоров (2004), Н.Т. Кавешников (1989), Б.М. Кизяев (2002), А.А. Коршиков (2000), И.П. Кружилин (1988), И.И. Мер (1980), М.Ф. Натальчук (1992), Г.В. Ольгаренко (1998), В.И. Ольгаренко (2006), А.Т. Раимбаев (1979), Д.А. Соловьев (2011), В.Н. Щедрин (2004), В.Г. Ясинецкий (1985) и др., последовательно доказывают актуальность разработки новых и совершенствования существующих технологий и технических комплексов для проведения эксплуатационно-ремонтных работ на оросительных системах. Их научные труды подчеркивают, что существующие методы и оборудование не в полной мере соответствуют современным требованиям ресурсоэффективности, особенно в условиях высокого уровня износа мелиоративной инфраструктуры.

В рамках другого направления исследования работы Ф.К. Абдразакова (2002), С.С. Атаева (1983), Р.М. Баширова (1990), Б.Д. Докина (1983), Ю.Б. Емелина (1995), С.Е. Канторера (1983), П.К. Кудайбергенова (1981), Э.А. Финна (1985) и других ученых убедительно демонстрируют необходимость оптимизации технических комплексов для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем. Их работы подтверждают, что фрагментарный подход к модернизации

ции отдельных элементов не приносит ожидаемого эффекта, а требует комплексного решения.

В развитие идей, выдвинутых перечисленными авторами, нами предлагается принципиально новый подход – единый комплекс эксплуатационных мероприятий, направленный на оптимизацию всей производственной цепочки «насосные станции – парк машин для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем – дождевальные машины». Такой системный подход позволяет достичь синергетического эффекта за счет согласованного внедрения научно обоснованных ресурсосберегающих технологий и оптимизации технических комплексов на всех этапах водоподачи и полива, что в конечном итоге обеспечит существенное повышение ресурсоэффективности мелиоративных мероприятий.

Цель исследования – повышение ресурсоэффективности эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем на основе совершенствования технологий и оптимизации технических комплексов.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих технологий и комплексов технических средств для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием, в том числе насосных станций, транспортирующей сети и дождевальной техники.

2. Теоретическое обоснование и разработка системы эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием, обеспечивающей снижение энергозатрат и включающей в себя технологию очистки каналов от кустарниковой растительности и наносов, блоки технологий подготовительных работ, ремонта и реконструкции каналов и напорных трубопроводов на заросших участках трассы, технологию эксплуатации дождевальных машин кругового действия.

3. Разработка и верификация оптимизационной математической модели интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией, работающей на сеть закрытых напорных трубопроводов с широкозахватными дождевальными машинами кругового действия, позволяющей сократить энергопотребление.

4. Разработка и верификация оптимизационных математических моделей формирования, обновления и оперативного распределения парка машин для эксплуатационно-ремонтных работ на транспортирующей сети оросительных систем с обеспечением снижения энергозатрат.

5. Разработка и верификация оптимизационной модели компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия, позволяющей с учетом интенсивности полива и длин про-

летов, применяемых в машине, оптимально адаптировать ее к геометрическим параметрам орошаемого поля, уменьшить массу машины, сократить число самоходных тележек и снизить энергозатраты.

Объект исследования – оросительные системы, технические средства для их эксплуатации, ремонта и реконструкции, дождевальные машины.

Предмет исследования – технологические процессы эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием.

Научную новизну работы представляют:

- научно обоснованные ресурсосберегающие технологии эксплуатации, ремонта и реконструкции каналов и напорных трубопроводов оросительных систем полива дождеванием, позволяющие рационально утилизировать срезанную кустарниковую растительность путем переработки в щепу вместо экологически опасного сжигания;

- разработанная технология эксплуатации дождевальных машин кругового действия с определением оптимального местоположения монтажной площадки, позволяющая сократить суммарные энергозатраты на транспортные работы;

- оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией, работающей на сеть закрытых напорных трубопроводов с широкозахватными дождевальными машинами кругового действия, минимизирующая энергопотребление за счет ликвидации потерь на дросселирование и работы насосов в неустойчивых режимах;

- оптимизационные математические модели формирования, обновления и оперативного распределения парка машин для эксплуатационно-ремонтных работ на транспортирующей сети оросительных систем полива дождеванием, позволяющие сократить энергозатраты на ключевых этапах жизненного цикла технических комплексов;

- оптимизационная математическая модель компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия, адаптированная к конфигурации орошаемого поля, направленная на снижение массы машины и сокращение энергозатрат при ее эксплуатации.

Научная новизна предложенных технологических и технических решений подтверждена патентами РФ на изобретение № 2258354, 2316206, 2716987, 2801951, 2810574, 2827428, 2864950.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории ресурсосбережения при эксплуатации, ремонте и реконструкции оросительных систем, разработке нового методологического подхода к созда-

нию математических моделей оптимизации технических средств и комплексов функционирования оросительных систем.

Практическая значимость работы определяется комплексным характером предложенных решений, доведенных до уровня готовности к промышленному внедрению и апробированных в реальных производственных условиях.

Предложен комплекс ресурсосберегающих технологий для эксплуатации, ремонта и реконструкции каналов и напорных трубопроводов оросительных систем полива дождеванием, обеспечивающий:

- повышение пропускной способности каналов после очистки на 23–31 %;
- интенсификацию ремонтно-восстановительных работ на 10–45,8 % по сравнению с базовыми методами;
- экологически безопасную утилизацию порубочных остатков.

Разработана оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией, позволяющая достичь экономии электроэнергии на 19,5 %.

Разработаны инструменты управления парком машин для эксплуатационно-ремонтных работ на транспортирующей сети оросительных систем полива дождеванием:

- оптимизационная математическая модель формирования парка машин, определяющая оптимальный состав техники (кусторезы КН-3М, экскаватор ЭО-3323М) и снижающая энергозатраты на 15,8–17,3 %;
- оптимизационная математическая модель обновления парка машин, устанавливающая экономически обоснованные сроки службы техники (10–13 лет) и сокращающая энергозатраты на 38,3–39 %;
- оптимизационная математическая модель оперативного распределения техники по производственным объектам, снижающая энергозатраты на 13,1–13,6 %.

Предложена оптимизационная математическая модель компоновки водопроводящего трубопровода дождевальных машин кругового действия, адаптирующая их конструкцию к конфигурации орошаемых полей и обеспечивающая уменьшение массы машин, сокращение числа самоходных тележек и снижение энергозатрат при эксплуатации на 9,3 %.

Результаты исследований апробированы и внедрены в деятельность сельскохозяйственных предприятий Саратовской, Волгоградской, Астраханской и Курской областей, что подтверждает их практическую ценность и обеспечивает качественно новый, ресурсоэффективный уровень организации мелиоративного производства. Разработанные решения имеют универсальный характер и могут быть тиражированы на мелиоративных системах в других регионах.

Методология и методы исследования. Методология исследований основана на соблюдении принципов объективности, системности и целостности. При проведении исследований учитывалось условие адекватности подходов и средств, позволяющих получать знания об объекте, близкие к их точным значениям. В качестве основных методов исследований в работе применялись: системное исследование, аналитическое описание технологических процессов на основе известных законов и методов математического анализа, а также современные компьютерные методы для обработки данных и оптимизации моделей. Для оценки достоверности и адекватности результатов использовались стандартные вычислительные инструменты и алгоритмы. Экспериментальные исследования и производственные испытания выполнены с использованием хронометража, стандартных методик и приборов. Обработку результатов исследований проводили методами математической статистики с применением современных информационных технологий, включая специализированные программные комплексы и вычислительные средства.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс научно обоснованных ресурсосберегающих технологий эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием, обеспечивающих снижение энергозатрат на 10–45,8 % и экологически безопасную утилизацию порубочных остатков за счет переработки срезаемой кустарниковой растительности в щепу.
2. Новая технология эксплуатации дождевальных машин кругового действия с определением оптимального местоположения монтажной площадки, обеспечивающая снижение суммарных энергозатрат на транспортные работы при разворачивании машин в полевых условиях на 10,7 %.
3. Оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией, работающей на сеть закрытых напорных трубопроводов с широкозахватными дождевальными машинами кругового действия, минимизирующая энергопотребление на 19,5 % за счет ликвидации потерь на дросселирование и исключения работы насосных агрегатов в неоптимальных зонах характеристик.
4. Оптимизационные математические модели формирования, обновления и оперативного распределения парка машин для эксплуатационно-ремонтных работ на транспортирующей сети оросительных систем полива дождеванием, научно обосновывающие оптимальный состав техники (кустореж КН-3М, экскаватор ЭО-3323М), экономически целесообразные сроки ее службы (10–13 лет) и позволяющие со-

кратить совокупные энергозатраты на ключевых этапах жизненного цикла парка машин на 13,1–39 %.

5. Оптимизационная математическая модель компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия, учитывающая геометрические параметры орошаемых полей и позволяющая снизить массу машины, сократить число самоходных тележек и уменьшить энергозатраты на 9,3 %.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечены путем публикации статей в научных журналах, новизна подтверждается патентами, научными изданиями, а также апробацией результатов исследований на оросительных системах Саратовской, Волгоградской, Астраханской и Курской областей. Опытные данные научных исследований получены в результате использования общеизвестных методик при проведении полевых экспериментов.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на ежегодных конференциях профессорско-преподавательского состава Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова, в настоящее время – «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» (2003–2025 гг.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы сельско-хозяйственной науки и образования» в Самарской ГСХА (Самара, 2005); Международной научно-практической конференции «Агроэкологическое состояние АПК: опыт, поиски, решения» в Саратовском РИППК (Саратов, 2005); Российской научно-практической конференции «Роль научных и проектных организаций в социальном развитии села России» в ФГУП «НИПИгипропромсельстрой» (Саратов, 2005); Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения проф. А.Г. Рыбалко в Саратовском ГАУ (Саратов, 2006); Научно-практической конференции «Современные проблемы развития АПК» в Волгоградской ГСХА (Волгоград, 2006); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современного водохозяйственного комплекса» в Омском ГАУ (Омск, 2010); Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения проф. В.Г. Кобы в Саратовском ГАУ (Саратов, 2011); Международной научно-практической конференции «Основные проблемы сельскохозяйственных наук» в Инновационном центре развития образования и науки (Волгоград, 2016); Международной научно-практической конференции «Сельскохозяйственные науки: от вопросов к решениям» (Томск, 2016); Международной научно-практической конференции «Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении» в Саратовском ГАУ (Саратов, 2016); Всероссий-

ской научно-практической конференции «Техногенная и природная без-опасность» в Саратовском ГАУ (Саратов, 2017); Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях» в Саратовском ГАУ (Саратов, 2018); Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы инновационной агро-экономики» в Саратовском ГАУ (Саратов, 2020); научно-практической конференции с международным участием «Глобальные вызовы и инновационные решения в мелиоративном комплексе», посвященной 60-летию образования ФГБНУ «ВолжНИИГиМ» (Энгельс, 2026).

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном исполнении всех этапов работы: анализ технологий и комплексов технических средств для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием; постановка научной проблемы, цели и задач исследований; теоретическое обоснование и разработка системы эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием; оптимизационных математических моделей: интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией; моделей формирования, обновления и оперативного распределения парка машин для эксплуатационно-ремонтных работ на транспортирующей сети оросительных систем; модели компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия; составление программы и методики исследований; проведение и анализ результатов экспериментальных исследований ресурсосберегающих технологий и оптимизационных моделей технических комплексов; подготовка публикаций по теме диссертации; подача заявок на изобретения.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 57 научных работ, в том числе 11 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 монографии, получено 7 патентов на изобретения. Общий объем публикаций составляет 61,5 печ. л., из них на долю автора приходится 31,4 печ. л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, рекомендаций производству, перспектив дальнейшей разработки темы, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 419 страниц компьютерного текста, который включает в себя основной текст и приложения. Основной текст изложен на 337 страницах, содержит 75 таблиц, 91 иллюстрацию. Список литературы включает в себя 327 наименований, в том числе 10 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во «Введении» обоснована актуальность и отражена степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены объект и предмет исследования, научная новизна, тео-

ретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования. Указаны научные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация и публикации по результатам исследований.

В первой главе *«Состояние вопроса. Постановка проблемы»* проведен всесторонний анализ современного состояния и перспектив развития мелиоративного комплекса Российской Федерации. Установлено, что в условиях, когда 70 % пашни и 80 % сельхозугодий расположены в зонах с дефицитом осадков, мелиорация является стратегическим фактором продовольственной безопасности. Однако мелиоративный фонд страны, составляющий 9,45 млн га, характеризуется глубоким кризисом: средний износ оросительных систем достигает 69,1 %, коэффициент полезного действия на 50 % площадей не превышает 0,60, а потери воды в сетях составляют 25–60 % от водозабора. Это приводит к невозможности эффективного полива на 2,96 млн га из 4,67 млн га орошаемых земель и ежегодным экономическим потерям АПК в размере более 90 млрд рублей.

Проведена классификация оросительных систем и существующих технологий эксплуатационно-ремонтных работ. Выявлено, что организации, эксплуатирующие мелиоративные системы, вынуждены применять ресурсоемкие и экологически небезопасные технологии, основанные на использовании неспециализированной техники и ручного труда. Особо острой является проблема очистки оросительных каналов от кустарниковой растительности и наносов, где доминируют малоэффективные методы с последующим сжиганием отходов. Анализ парка технических средств показал его критическое состояние: обеспеченность составляет лишь 47 % от потребности, а степень износа превышает 70 %; парк дождевальных машин на 40 % состоит из импортной техники, а 80 % отечественных машин имеют 100%-й износ.

На основании комплексного анализа определена коренная проблемная ситуация в отрасли: с одной стороны, для достижения стратегической цели – увеличения площади орошаемых земель до 10 млн га к 2030 году – необходима эффективная и бесперебойная работа всей производственной цепи «насосные станции – транспортирующая сеть – дождевальная техника». С другой стороны, имеющаяся система эксплуатационных мероприятий и катастрофически устаревшая техническая база не могут обеспечить этот процесс.

Таким образом, в диссертационной работе была поставлена и решена научная проблема, которая заключается в необходимости разработки системной методологии и комплекса научно обоснованных ре-

шений, обеспечивающих переход от фрагментарных, не отвечающих текущим требованиям, подходов к целостной ресурсосберегающей системе эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем. Это позволит преодолеть дисбаланс между растущими требованиями к эффективности эксплуатационно-ремонтных мероприятий и ограниченными возможностями существующей технологической и технической базы, что является обязательным условием для повышения продуктивности земель, адаптации к климатическим вызовам и обеспечения продовольственной безопасности страны.

Во второй главе *«Теоретическое обоснование ресурсосберегающих технологий и оптимизация технических комплексов эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем»* в ходе проведенного анализа выявлены существенные недостатки существующих методов, в частности, экологически опасная практика сжигания побочной кустарниковой растительности, образующейся при очистке каналов. В качестве решения предложена ресурсосберегающая технология эксплуатации оросительных каналов (рисунки 1, 2), которая включает в себя поэтапное выполнение операций срезки, сбора, подсушивания и последующей переработки кустарниковой биомассы в энергетическую или технологическую щепу с использованием передвижных рубильных машин непосредственно на месте работ, что обеспечивает утилизацию отходов и повышение ресурсоэффективности технологического процесса эксплуатации оросительных каналов. Параллельно выполняются работы по угнетению пней для подавления поросли и очистке русла от наносов. Аналогичный ресурсосберегающий принцип, основанный на максимальном использовании вторичных ресурсов и минимизации экологического ущерба, положен в основу разработанных технологий ремонта и реконструкции оросительных каналов и напорных трубопроводов, в которых усовершенствованы блоки подготовительных работ на участках трассы, заросших кустарниковой растительностью.

Для завершения производственной цепочки и обеспечения полива предложена технология эксплуатации современных дождевальных машин кругового действия, которая основана на блочно-модульном принципе с оптимизацией размещения монтажной площадки методом «центра тяжести» для минимизации логистических затрат.

I. Поливной сезон

1. Блок подготовительных работ

- время проведения: апрель-май

Визуальный осмотр поверхностей бERM и откосов канала, удаление из зоны выполнения работ посторонних предметов

2. Блок основных работ

- время проведения: май-июль
- метод проведения работ: поточный
- разрыв между операциями: 1-3 дня

Срезка кустарниковой растительности, произрастающей на бERMAХ канала

Навесные кусторезы с активными рабочими органами

Сбор срезанного на бERME кустарника и мелколесья в кучи

Подборщики-сборатели срезанной кустарниковой растительности

Срезка кустарниковой растительности, произрастающей на откосах канала

Кусторезы с телескопическими рабочими органами

Извлечение срезанной растительности из русла канала с последующим ее перемещением в сформированные кучи

Подборщики-сборатели срезанной кустарниковой растительности

- параллельное выполнение операций

Угнетение пней на бERMAХ канала

Угнетение пней на откосах канала

Навесное оборудование опрыскивателя с локальным внесением арборицида

Инъекторы с локальным внесением арборицида

Рисунок 1 – Ресурсосберегающая технология эксплуатации оросительных каналов

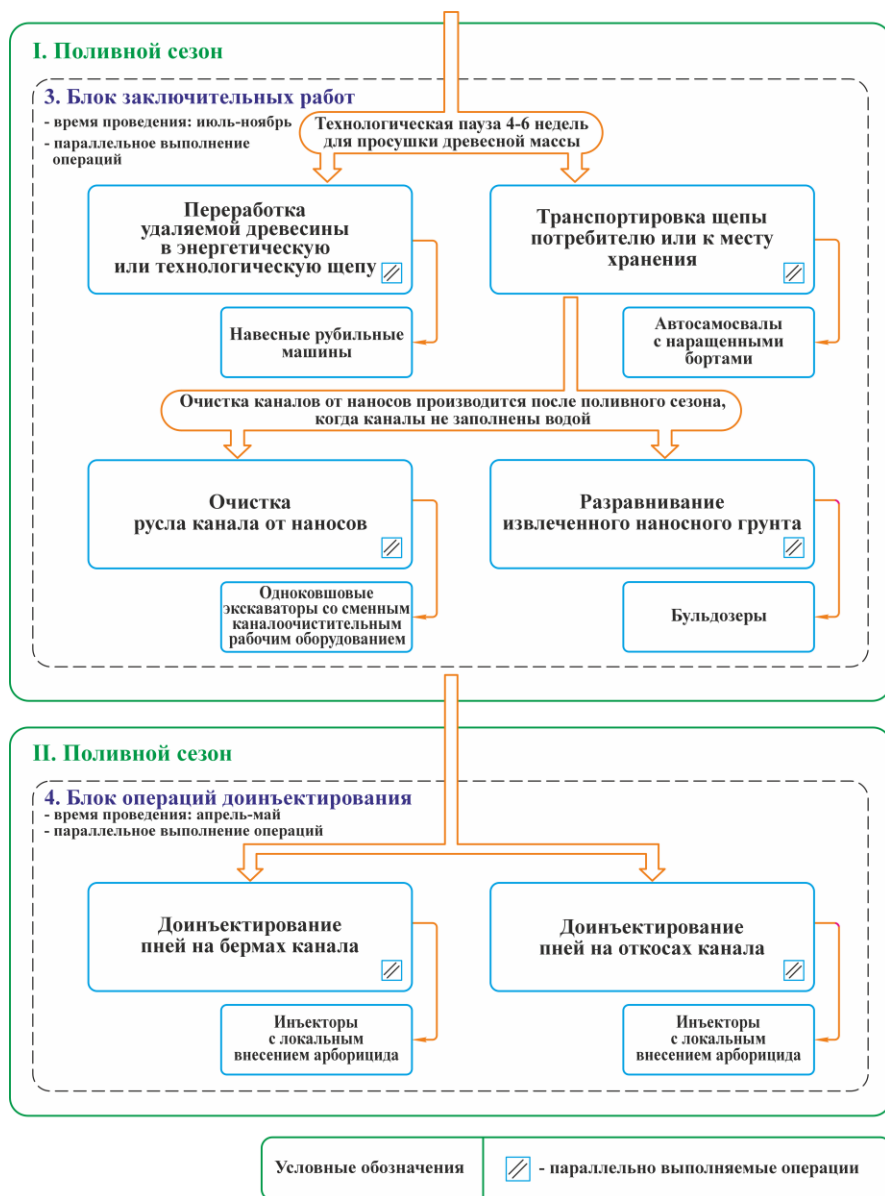


Рисунок 2 – Ресурсосберегающая технология эксплуатации оросительных каналов (окончание)

Определение координат оптимальных мест расположения специализированных монтажных площадок производится по критерию минимума суммарных энергозатрат на транспортные работы по доставке пролетов:

$$\mathcal{E}_{\text{д.пр.}j} = \sum_{i=1}^n L_{ij} \mathcal{E}_{\text{уд.}i}; \quad \mathcal{E}_{\text{д.пр.}j} \rightarrow \min, j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$L_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}; \quad (2)$$

$$X_{\text{пл}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i X_i}{\sum_{i=1}^n l_i}; \quad Y_{\text{пл}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i Y_i}{\sum_{i=1}^n l_i}, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{д.пр.}j}$ – сумма энергозатрат на транспортные работы, кВт; L_{ij} – расстояние между j -м вариантом расположения площадки и i -й дождевальной машиной, м; $\mathcal{E}_{\text{уд.}i}$ – удельные энергозатраты на доставку пролета к месту постоянной эксплуатации от специализированной монтажной площадки для i -й дождевальной машины, кВт/м; $X_{\text{пл}}$ и $Y_{\text{пл}}$ – координаты площадки, м; X_i и Y_i – координаты места постоянной эксплуатации i -й дождевальной машины, м; l_i – длина i -й дождевальной машины, м; n – общее число дождевальных машин на участке, ед.

Технология эксплуатации также включает в себя детализированную систему периодического технического обслуживания, учитывающую неравномерную наработку узлов машины.

В ходе теоретических исследований установлено, что эффективность и надежность внедрения разработанных ресурсосберегающих технологий в мелиоративное производство в решающей степени зависят от оптимизации состава и параметров их технической базы. Таким образом, для поддержания нормального функционирования оросительных систем за счет качественных и ресурсоэффективных работ необходима оптимизация технических комплексов для их эксплуатации, ремонта и реконструкции.

Оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией

Современные дождевальные оросительные системы представляют собой сложные гидромеханические комплексы, эффективность работы которых зависит от слаженного взаимодействия насосной станции, трубопроводной сети и дождевальных машин. Однако на практике это взаимодействие часто сопровождается серьезными проблемами, связанными с возникновением гидроударов и вибраций, которые суще-

ственно снижают надежность всей системы. Решение этих проблем возможно благодаря внедрению интеллектуальных систем управления (ИСУ), которые обеспечивают комплексный контроль и оптимизацию работы всех компонентов дождевальной оросительной системы.

Оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией включает в себя следующие зависимости.

Уравнение баланса расхода

$$Q_{\text{нас}}(t) = \sum_{i=1}^N Q_i(t) + Q_{\text{потерь}}(t), \quad (4)$$

где $Q_{\text{нас}}(t)$ – суммарный расход насосной станции, л/с; $Q_i(t)$ – расход воды для i -й машины в момент времени t , л/с; $Q_{\text{потерь}}$ – потери на утечки, л/с.

Уравнение давления:

$$P_{\text{нас}}(t) = \max(P_i(t) + \Delta P_{\text{сети}}(Q_{\text{нас}})), \quad (5)$$

где $P_{\text{нас}}(t)$ – давление на выходе насосной станции, МПа; $P_i(t)$ – требуемое давление на входе i -й машины, МПа; $\Delta P_{\text{сети}}$ – потери давления в сети, МПа.

Энергопотребление насосной станции:

$$W(t) = \frac{Q_{\text{нас}}(t)P_{\text{нас}}(t)}{\eta_{\text{насоса}}} \rho g, \quad (6)$$

где $\eta_{\text{насоса}}$ – коэффициент полезного действия насоса; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Ограничения:

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P_{\text{нас}}(t) \leq P_{\max}; \\ Q_{\min} \leq Q_{\text{нас}}(t) \leq Q_{\max}; \\ n_{\min} \leq n_{\text{нас}}(t) \leq n_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Оптимизационная задача имеет целевую функцию минимизации суммарного энергопотребления за время T :

$$\sum_{t=1}^T W(t) \Delta t \rightarrow \min \quad (8)$$

при соблюдении условий:

- давление и расход соответствуют требованиям всех машин;
- насосы работают в допустимом режиме (без перегрузок).

Если учесть интеллектуальную систему управления, то следует добавить:

- датчики давления и расхода в реальном времени $\rightarrow Q_i(t), P_i(t)$;
- алгоритм адаптивного управления насосами (ПИД-регуляторы);
- совершенствование управления переходными процессами пуска и останова насосов для минимизации износа.

Дополнительное уравнение для автоматизации будет иметь следующий вид (функция подбирает оптимальное число работающих насосов):

$$n_{\text{нас}}(t) = f(Q_{\text{нас}}(t), P_{\text{нас}}(t)), \quad (9)$$

где $n_{\text{нас}}(t)$ – количество работающих насосов, шт.

Управляющий сигнал $u(t)$ ПИД-регулятора для насосной станции (например, частота вращения насоса или число работающих насосов) определяется по формуле:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (10)$$

где $e(t) = P_{\text{зад}}(t) - P_{\text{факт}}(t)$ – ошибка регулирования (разница между заданным и фактическим давлением); K_p – коэффициент пропорционального усиления; K_i – коэффициент интегрального усиления; K_d – коэффициент дифференциального усиления.

Преимущества предлагаемой модели:

- снижение энергозатрат за счет точного соответствия подачи воды потребностям машин;
- автоматизированное управление через интеллектуальную систему уменьшает влияние человеческого фактора;
- способность модели адаптироваться к изменению количества машин, рельефа поля и других переменных.

Оптимизационная математическая модель формирования парка машин

В работе теоретически обоснована и разработана оптимизационная математическая модель формирования парка машин для мелиоративного производства.

В основе модели лежит аппарат теории множеств, что позволяет формализовать задачу и провести системный отбор единиц техники. Каждой машине m_i из множества M ставится в соответствие множество ее характеристик χ_a , таких, как мощность двигателя, эксплуатационная производительность, планируемый объем работ, фонд рабочего времени:

$$M = \{m_i\}_{i=1}^n = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n\}; \quad (11)$$

$$\chi_{\alpha} = \{\chi_{\alpha}\}_{\alpha=1}^4 = \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4\} = \{N_{\text{дв}}, \Pi_3, V, \Phi\}, \quad (12)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность двигателя машины, кВт; Π_3 – эксплуатационная производительность машины, ед. изм./ч (размерность зависит от вида работ); V – объем работ, ед. изм.; Φ – фонд рабочего времени машины, ч; $\Theta_{\text{раб}}$ – энергозатраты на производство работ, кВт·год/ед. изм.

Для наглядной демонстрации принципа отбора и соответствия машин заданным критериям в работе используются геометрические интерпретации в системах координат и диаграммы Эйлера.

Модель реализует алгоритм выбора, включающий в себя:

1. Выбор набора влияющих характеристик χ_{α} .
2. Определение целевой функции – энергозатрат на производство работ:

$$\Theta_{\text{раб}} = f(N_{\text{дв}}, \Pi_3, V, \Phi). \quad (13)$$

3. Расчет для каждой машины комплексного показателя – коэффициента оптимальности k^* , который агрегирует ее характеристики относительно целевой функции:

$$k^* = \min \left\{ k_i^* \right\}_{i=1}^n; \quad k_i^* = \frac{\Theta_{\text{раб}i}}{\chi_{\alpha i}} \cdot 100 \%. \quad (14)$$

Оптимальная единица техники определяется как элемент с минимальным значением коэффициента оптимальности, что соответствует наименьшим энергозатратам при выполнении заданных работ в конкретных производственных условиях.

Разработанная модель позволяет перейти от качественного анализа к количественному обоснованию состава парка, обеспечивая его формирование из современных высокоэффективных машин, способных выполнить производственную программу своевременно и с минимальными ресурсными затратами.

Оптимизационная математическая модель обновления парка машин

В диссертации разработана и теоретически обоснована оптимизационная математическая модель обновления парка машин для эксплуатационно-ремонтных работ, направленная на сокращение энергозатрат на ключевых этапах жизненного цикла технологических комплексов. Модель рассматривает процесс обновления как динамический, происходящий во времени, и охватывает основные его формы:

полную замену новой техникой, капитальный ремонт, модернизацию и приобретение техники, бывшей в эксплуатации.

В основу математической модели определения оптимального решения при обновлении парка машин положен временной ряд, позволяющий рассматривать эмпирически полученные статистические данные как динамическую систему. При этом в виде множеств представлены совокупности машин парка M , временных значений τ_{ij} , технических характеристик машин Ψ , жизненных циклов машин θ_{ij} . Основной характеристикой из множества Ψ являются энергозатраты на производство работ машиной $\mathcal{E}_{\text{раб.}ij}$, кВт/ед. изм., которые должны стремиться к минимуму:

$$\mathcal{E}_{\text{раб.}ij} = \begin{cases} 0, \tau_{ij} \leq 0; \\ \mathcal{E}_{\text{раб.}ij}, \tau \in [\tau_{i-1,j-1}; \tau_{ij}] \rightarrow \min; \\ \mathcal{E}_{\text{раб.} \max}, \tau_{ij} \geq \tau_{ik+1}. \end{cases} \quad (15)$$

Оценка энергозатрат машиной M_i отражена при подсчете площади S_{M_i} (рисунок 3): ось $O\tau$, ось $O\mathcal{E}_{\text{раб.}}$, функция $\mathcal{E}_{\text{раб.}ij}$, и машиной M_{i+1} при подсчете площади $S_{M_{i+1}}$: ось $O\tau$, ось $O\mathcal{E}_{\text{раб.}}$, функция $\mathcal{E}_{\text{раб.}i+1,j}$.

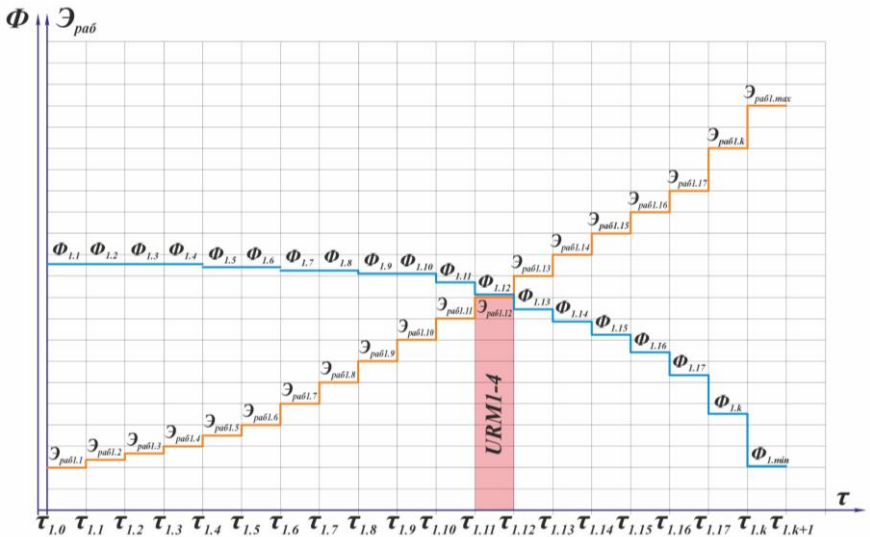


Рисунок 3 – Взаимосвязь энергозатрат, фонда рабочего времени машины и критические значения для принятия решения URM

Управляющее решение относительно машина M_{i+1} может быть выбрано при различных вариантах:

$$URM = \begin{cases} \text{новая машина } (URM_1); \\ \text{капитально отремонтированная машина } (URM_2); \\ \text{модернизированная машина } (URM_3); \\ \text{машина, бывшая ранее в эксплуатации } (URM_4); \\ \text{машина без изменений } (URM_5). \end{cases} \quad (16)$$

Известно, что существует взаимосвязь (см. рисунок 3) между энергозатратами $\Theta_{\text{раб.}ij}$, фондом рабочего времени Φ и управляющим решением как для отдельно взятой единицы техники, так и для парка машин в целом:

$$\Theta_{\text{раб.}ij} = \begin{cases} 0, \Phi_{ij} = 0; \\ \Theta_{\text{раб.}ij}, \Phi_{ij} \neq 0, \Theta_{\text{раб.}ij} = \frac{1}{\Phi_{ij}}, \tau_{ij} > \tau_{ij}^*, \end{cases} \quad (17)$$

где τ_{ij}^* – критическое значение, при котором $\Theta_{\text{раб.}ij} = \Phi_{ij}$, определяющее сроки принятия управляющего решения.

Аналогичная взаимосвязь существует между энергозатратами и эксплуатационной производительностью Π .

Множество критических значений τ_{ij}^* определяется выражением

$$\tau_{ij}^* = \{\tau_{ij} : \Theta_{\text{раб.}ij} = \Phi_{ij}\}. \quad (18)$$

Фактически выражение (18) является решением алгебраической системы:

$$\begin{cases} \Theta_{\text{раб.}} = k_m \Theta_{\text{раб.}}(\tau), \\ \Phi = k_{m\Phi} \Phi(\tau). \end{cases} \quad (19)$$

В системе (19) k_m и $k_{m\Phi}$ – коэффициенты соответствия, которые введены для приведения графиков к единому масштабу. Дальнейшие исследования соотношения энергозатрат и фонда рабочего времени для машины M_i имеют смысл после достижения ими критического значения в точке пересечения графиков, соответствующей значению τ_{ij}^* (см. рисунок 3).

Коэффициент k_s^* , показывает оптимальность выбора машины при различных условиях (16)

$$k_s^* = \frac{S_{M_i}}{S_{M_{i+1}}}, \quad (20)$$

где k_j^* – коэффициент, демонстрирующий оптимальность перехода от варианта машины M_i к варианту машины M_{i+1} , т. е. является критерием выбора оптимального управляющего решения.

При наличии выбора вариантов (от 1 до r) обновления парка машин решающим является максимальное значение коэффициента $k_{э, \max}^*$ из возможных $k_j^* = \{k_{j1}^*, \dots, k_{jr}^*\}$.

Решение задачи относительно определения времени принятия управляющего решения и его содержания представлено алгоритмом:

$$\begin{cases} \tau_{ij}^* = \{\tau_{ij} : \mathcal{E}_{\text{поб.}ij} = \Phi_{ij}\}, \\ URM = \left\{ URM : \begin{cases} 0 < k_j^* < 1, (URM_5) \\ k_j^* > 1, URM_1 - URM_4 \end{cases} \right\}. \end{cases} \quad (21)$$

Предложенная оптимизационная модель позволяет структурировать процесс обновления парка машин во времени, формализовать критерии принятия решений на основе объективных показателей энергоэффективности и определить как оптимальный момент принятия решения, так и наиболее рациональную форму обновления для каждой единицы техники.

Оптимизационная математическая модель оперативного распределения парка машин

Ключевая задача при эксплуатации машин в ресурсосберегающих технологиях – это распределение техники по объектам с учетом их специфики. Игнорирование этих факторов ведет к снижению качества, росту энергозатрат и стоимости работ.

В качестве критерия оптимальности принят минимум энергозатрат. Целевую функцию математической модели можно записать в следующем виде:

$$\mathcal{E}_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{N_{\text{дв}i}}{\Pi_{\text{т}i} K_{\text{усл}j}} \right) X_{ij} \rightarrow \min, \quad (22)$$

где $\mathcal{E}_{\text{сум}}$ – суммарные энергозатраты на производство работ, кВт·год/ед. изм. (размерность зависит от вида выполняемых работ); $N_{\text{дв}i}$ – мощность двигателя i -й машины, кВт; $\Pi_{\text{т}i}$ – техническая производительность i -й машины, ед. изм./ч; $K_{\text{усл}j}$ – коэффициент, учитывающий местные условия на j -м объекте (коэффициент местных условий может принимать значения от 0 до 1); X_{ij} – продолжительность работы i -й машины на j -м объекте, ч.

Условия оптимизации математической модели следующие.

1. Условие соответствия машины виду работ на объекте. В математическом виде это условие можно записать следующим образом:

$$m_i \Rightarrow V_j, \quad (23)$$

где m_i – вид или типоразмер машины; V_j – объем и вид работ на объекте.

При решении задачи оптимизации распределения данное условие может быть реализовано следующим образом: при необходимости (когда машина не соответствует работам) та или иная позиция ij исключается из рассмотрения постановкой для данной позиции условия $X_{ij} = 0$.

2. Качественное выполнение работ на объекте. Если рассматривать работу кусторезов, то показателем качества работ будет выступать высота оставшихся пней после срезания кустарниковой растительности. Выбор минимальной высоты срезания кустарника обосновывается возможностью последующей беспрепятственной работы машин для сбора срезанного кустарника.

Коэффициент качества работ по срезанию кустарника $K_{\text{кк}}$ можно определить по формуле:

$$K_{\text{кк}} = h_{\text{кф}} / h_{\text{кд}}, \quad (24)$$

где $h_{\text{кф}}$ – фактическая высота срезания кустореза, мм; $h_{\text{кд}}$ – допустимая высота срезания кустарника, мм.

Одним из основных параметров, контролируемых при проведении земляных работ, являются недоборы грунта в основании сооружений. Коэффициент качества земляных работ $K_{\text{кз}}$ можно определить по формуле:

$$K_{\text{кз}} = h_{\text{эф}} / h_{\text{эд}}, \quad (25)$$

где $h_{\text{эф}}$ – фактические недоборы грунта, см; $h_{\text{эд}}$ – допустимые недоборы грунта, см.

Условие качества при оптимизации распределения машин по производственным объектам можно записать следующими формулами (соответственно для кусторезов и землеройных машин):

$$0 \leq K_{\text{кк}ij} \leq 1; \quad 0 \leq K_{\text{кз}ij} \leq 1. \quad (26)$$

3. Объем работ должен быть выполнен полностью. Условие выполнения объема работ:

$$V_j = \sum_{i=1}^m (\Pi_{pi} K_{услj}) X_{ij} , \quad (27)$$

где V_j – планируемый объем работ на j -м производственном объекте, ед. изм.; Π_{pi} – техническая производительность i -й машины на j -м производственном объекте, ед. изм./ч; $K_{услj}$ – коэффициент, учитывающий местные условия j -го объекта и позволяющий перевести техническую производительность машины в эксплуатационную; X_{ij} – продолжительность работы i -й машины на j -м производственном объекте, ч; m – количество машин; n – количество производственных объектов.

4. Планируемый объем работ на производственных объектах должен быть выполнен своевременно, в соответствии с имеющимся фондом рабочего времени машин. Это условие можно записать:

$$\Phi_i \geq \sum_{j=1}^n X_{ij} , \quad (28)$$

где Φ_i – фонд рабочего времени i -й машины в планируемом периоде, ч.

5. В связи с тем, что мелиоративные сооружения имеют значительное удаление друг от друга, частое перебазирование техники с объекта на объект недопустимо.

Учитывая производственный опыт планирования распределения техники по объектам, рациональным является такое распределение, при котором машина на производственном объекте должна проработать не менее 5 % времени от планируемого фонда рабочего времени для данной машины, что позволит исключить частые перебазирования техники. Условие ограничения перебазировок можно записать в следующем виде:

$$X_{ij} \geq 0,05\Phi_i . \quad (29)$$

6. Продолжительность работы машины не должна принимать отрицательных значений:

$$X_{ij} \geq 0 . \quad (30)$$

Учитывая отмеченные ограничения, математическая модель оптимизации распределения парка машин по производственным объектам имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
\Theta_{\text{сум}} &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{N_{\text{дв}i}}{\Pi_{\text{т}i} K_{\text{усл}j}} \right) X_{ij} \rightarrow \min; \\
\begin{cases} V_j = \sum_{i=1}^m (\Pi_{\text{т}i} K_{\text{усл}j}) X_{ij}; & j = 1, 2, \dots, n; \\ \Phi_i \geq \sum_{j=1}^n X_{ij}; & i = 1, 2, \dots, m; \end{cases} \\
m_i \Rightarrow V_j; & 0 \leq K_{\text{кк}ij} \leq 1; 0 \leq K_{\text{кз}ij} \leq 1; X_{ij} \geq 0,05\Phi_i; \\
X_{ij} \geq 0; & i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n.
\end{aligned} \tag{31}$$

Распределение техники в соответствии с оптимальным производственным планом, определенным по математической модели (31), позволит качественно, своевременно и в полном объеме выполнить годовую производственную программу с наименьшими энергозатратами.

Оптимизационная модель компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия

Задачей оптимизации водопроводящего трубопровода дождевальных машин кругового действия является определение оптимальных длин участков трубопровода, позволяющее с учетом интенсивности полива и длин пролетов, применяемых в машине, минимизировать длину участков данного трубопровода, что, в свою очередь, позволит снизить массу машины, сократить число самоходных тележек и уменьшить энергозатраты на ее перемещение.

Для определения оптимальной длины первого участка основного водопроводящего трубопровода разработана математическая модель:

$$\begin{cases} L_1 = l_{\text{ш}} + \sum_{i=1}^n l_i \geq L_{1\text{min}} > l_{\text{ш}} + \sum_{i=1}^{n-1} l_i; \\ i = 1, 2, \dots, n; \\ n \rightarrow \min; \\ L_1 \rightarrow \min. \end{cases}, \tag{32}$$

где L_1 – фактическая длина первого участка основного водопроводящего трубопровода машины, м; n – число пролетов, из которых состоит первый участок основного водопроводящего трубопровода машины, шт.; i – порядковый номер пролета, оснащенного трубопрово-

дом, выполненным из водопроводящих труб с внешним диаметром d_1 и толщиной стенки t_1 ; l_i – длина i -го пролета, м; $l_{ш}$ – расстояние между центром вращения дождевальной машины и центром шарнирного соединения первого пролета с поворотным коленом неподвижной опоры, м.

Подбор длины второго участка основного водопроводящего трубопровода машины осуществляется таким образом, чтобы в конце машины можно было бы установить консоль как можно большей длины, выполняя при этом следующее равенство:

$$L_2 = \sum_{j=1}^m l_j = R_d - L_1 - L_k - R_k \pm 0,5, \quad (33)$$

где m – число пролетов, из которых состоит второй участок основного водопроводящего трубопровода машины, шт.; j – порядковый номер пролета, оснащенного трубопроводом, выполненным из водопроводящих труб с внешним диаметром d_2 и толщиной стенки t_2 ; l_j – длина j -го пролета, м; L_k – длина консольного трубопровода, м; R_k – радиус действия концевой аппаратуры или концевой дождевателя или крайней дождевальной насадки, м; $\pm 0,5$ – допустимая погрешность, связанная с подбором радиуса действия концевой аппаратуры, концевой дождевателя или крайней дождевальной насадки, м.

В третьей главе *«Программа и методика экспериментальных исследований»* представлен комплексный подход к верификации теоретических положений и разработанных моделей. Он объединил натурные (полевые и производственные) исследования с компьютерным имитационным моделированием. Поскольку объектом изучения выступали реальные технологические процессы, основным методом была избрана апробация в естественных условиях эксплуатации на действующих мелиоративных объектах.

Натурные исследования проводились на оросительных системах Саратовской, Астраханской и Курской областей в течение 2018–2025 гг. Полевой блок был нацелен на количественную оценку ключевых проблем зарастания каналов кустарниковой растительностью и их заиления. Для этого применялись таксационные методики и инструментальные измерения, позволившие оценить видовой состав, густоту стояния, запасы древостоя, а также изменения гидравлических параметров каналов.

Производственные испытания охватили весь спектр разработанных ресурсосберегающих технологий и оптимизационных моделей.

Эффективность технологий эксплуатации, ремонта и реконструкции оценивали методом сравнительного энергетического анализа на парных участках, где сравнивали новые и традиционные методы. Апробацию оптимизационных моделей (для насосных станций, формирования, обновления и распределения парка машин, компоновки дождевальной техники) проводили в реальных производственных условиях с использованием специализированного оборудования и информационных технологий. Основным критерий оценки – минимизация энергозатрат.

Обработку результатов выполняли методами математической статистики, что обеспечило получение репрезентативных и достоверных данных, подтверждающих эффективность предложенных решений.

В четвертой главе **«Результаты экспериментальных исследований»** представлены результаты комплексных экспериментальных исследований, проведенных для верификации теоретических положений и подтверждения эффективности разработанных ресурсосберегающих технологий и оптимизационных моделей в условиях реальных оросительных систем.

*Результаты полевых исследований зарастания
и заилиения каналов оросительных систем*

Полевые исследования выявили интенсивный и прогрессирующий характер зарастания оросительных каналов кустарниковой растительностью (таблица 1). Установлено, что за период 2018–2024 гг. все ключевые виды (клен ясенелистный, вяз приземистый, лох узколистный) демонстрируют устойчивый рост численности, встречаемости и густоты стояния. Абсолютным доминантом является клен ясенелистный, чья численность превышает 10 тыс. шт./га, а встречаемость к 2024 году достигла 96 %, что свидетельствует о его присутствии практически на всех обследованных территориях.

Статистический анализ размерных характеристик кустарников (высота, диаметр ствола у основания и на высоте 1,3 м) на репрезентативной выборке ($n = 250$) подтвердил положительную динамику их линейных размеров с приростом более 20 % за шестилетний период, что указывает на активное развитие и структурное усложнение растительных ценозов в условиях стабильного гидрологического режима каналов.

Исследования процессов заилиения показали, что толщина наносного слоя на прямолинейных участках каналов составляет 20–50 см, а на переездах и перед задвижками достигает 70 см.

**Таблица 1 – Характеристика кустарниковой растительности,
распространенной на оросительных каналах**

Вид кустарниковой растительности	Численность, шт./га			Встречаемость, %			Густота стояния, шт./га		
	2018 г.	2021 г.	2024 г.	2018 г.	2021 г.	2024 г.	2018 г.	2021 г.	2024 г.
Клен ясенелистный	10692	10856	10980	84	88	96	28340	29144	29712
Вяз приземистый	8784	9000	9184	68	72	80			
Лох узколистный	5968	6132	6232	64	64	68			
Смородина золотистая	2192	2344	2388	60	64	64			
Ива плакучая	456	520	568	24	32	36			
Ясень ланцетный	112	128	140	24	28	28			
Тополь черный	76	88	112	24	24	32			
Груша обыкновенная	40	56	72	4	8	12			
Яблоня лесная	20	20	36	4	8	8			

Расчеты пропускной способности для каналов с различными геометрическими параметрами продемонстрировали, что очистка от наносов позволяет повысить ее на 22,9–31,3 %, что подтверждает острую необходимость регулярных эксплуатационных мероприятий для поддержания проектных характеристик оросительных систем.

Результаты производственных испытаний ресурсосберегающих технологий эксплуатации, ремонта и реконструкции каналов и напорных трубопроводов оросительных систем полива дождеванием

Производственные испытания подтвердили эффективность предложенных ресурсосберегающих технологий, для которых средний показатель интенсификации относительно базовых вариантов составил: ресурсосберегающая технология очистки оросительных каналов – 45,8 %; ресурсосберегающая технология ремонта и реконструкции оросительных каналов – 11,9 %; ресурсосберегающая технология ремонта напорных трубопроводов – 10 %; ресурсосберегающая технология реконструкции напорных трубопроводов – 12,3 %.

Результаты производственных испытаний технологии эксплуатации дождевальных машин кругового действия с определением оптимального местоположения монтажной площадки

В ходе производственных испытаний технологии эксплуатации дождевальных машин кругового действия определялись координаты оптимального расположения монтажных площадок. Размещение площадок на основе оптимизационных расчетов позволило сократить энергозатраты транспортных операций по сравнению с базовым вариантом на 10,7 %.

Результаты экспериментальной апробации оптимизационной математической модели интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией

Применение интеллектуальной системы управления (ИСУ) (рисунок 4), адаптивно подстраивающей работу насосов под текущие потребности дождевальной оросительной системы, позволило стабилизировать давление и расход, исключить гидроудары и снизить энергопотребление на 19,5 % по сравнению с классическим принципом управления.

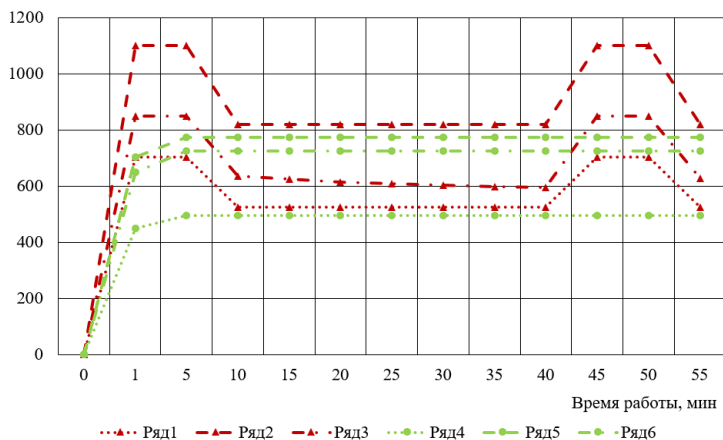


Рисунок 4 – Энергопотребление и параметры работы насосной станции: Ряд1, Ряд2, Ряд3 (без ИСУ) – активная мощность, кВт; потребляемый ток, А; фактический расход, м³/ч; Ряд4, Ряд5, Ряд6 – те же параметры с ИСУ

Результаты экспериментальной апробации оптимизационной математической модели формирования парка машин

Экспериментальные исследования модели позволили определить, что наиболее эффективным являются кусторез марки КН-3М (таблица 2) и одноковшовый экскаватор ЭО-3323М (таблица 3).

Таблица 2 – Коэффициенты оптимальности и индексы эффективности кусторезов

Марка машины	V, м ²	Э _{раб} , кВт·год/м ²	k _i [*] , %	Z _{эф}
МК-1	420000	47,1	0,011	6
МК-2	540000	36,7	0,007	4
КН-1	630000	37,8	0,006	5
КН-2	642000	30,8	0,005	3
КН-3	702000	28,2	0,004	2
КН-3М	756000	26,2	0,003	1

**Таблица 3 – Коэффициенты оптимальности и индексы эффективности
одноковшовых экскаваторов**

Марка машины	V, м ³	Э _{раб} , кВт·год/м ³	k_i^* , %	Z _{эф}
ЭО-2621	46600	5126	11	5
ЭО-3323	58250	5126	8,8	4
ЭО-3323М	90870	3285,9	3,616	1
ЭО-4321	92600	3414,6	3,687	2
ЭО-4121	115750	4398,5	3,8	3

Результаты экспериментальной апробации оптимизационной математической модели обновления парка машин

На основе экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены аппроксимирующие зависимости в виде полиномов n -й степени, описывающие динамику изменения исследуемых показателей во времени:

$$P_n(\tau) = a_n \tau^n + a_{n-1} \tau^{n-1} + \dots + a_2 \tau^2 + a_1 \tau + a_0; \quad \eta, \quad (34)$$

где $P_n(\tau)$ – обозначение полинома степени n от переменной τ ; n – степень полинома; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1, a_0$ – коэффициенты полинома; η – корреляционное отношение.

Составлена расчетная матрица параметров, влияющих на принятие управляющего решения (таблица 4). Графоаналитическим методом определены коэффициенты соответствия k_m и построены графические зависимости (рисунки 5, 6).

Выбор оптимального решения относительно дальнейшего жизненного цикла кустореза КН-3М составляет 11–13 лет (см. рисунок 5), экскаватора ЭО-3323М – 10–12 лет (см. рисунок 6). По прошествии данного времени принимается управляющее решение о замене существующей машины на новую.

**Таблица 4 – Расчетная матрица параметров, влияющих
на принятие управляющего решения**

Параметр	a_3	a_2	a_1	a_0	η	k_m
$\Pi_{\text{Э КН-3М}}$	0	2,7731	–124,84	1380,6	0,9989	0,00079
$\Phi_{\text{КН-3М}}$	0	–1,7529	7,7249	589,05	0,9917	0,00063
$\text{Э}_{\text{раб. КН-3М}}$	0,1963	–4,2065	29,308	–15,332	0,9800	0,0025
$\Pi_{\text{ЭО-3323М}}$	0	0,0678	–3,4847	41,992	0,9983	0,012
$\Phi_{\text{ЭО-3323М}}$	–0,4203	2,487	3,0543	2307,8	0,9879	0,00009
$\text{Э}_{\text{раб. ЭО-3323М}}$	25,194	–540,21	3771,5	–2059,3	0,9801	0,00002

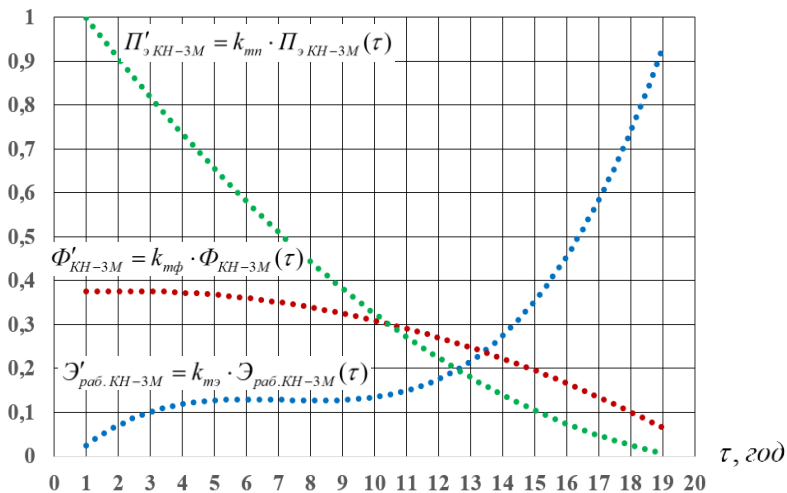


Рисунок 5 – Диаграмма определения времени принятия управляющего решения для кустореза КН-3М

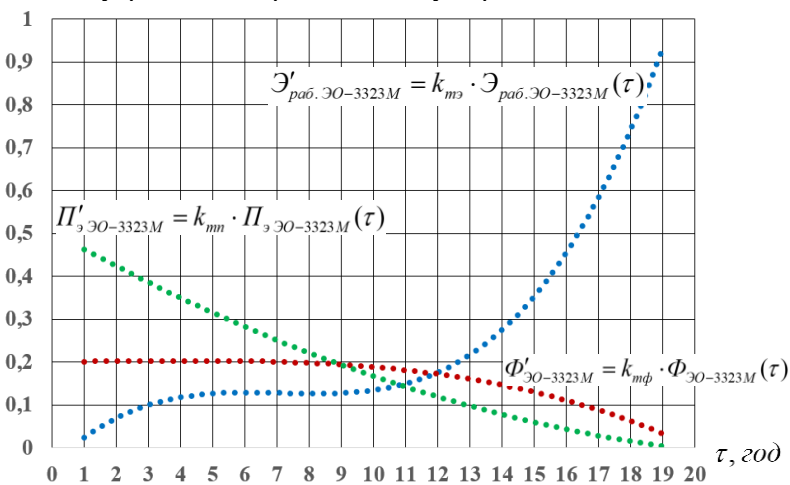


Рисунок 6 – Диаграмма определения времени принятия управляющего решения для одноковшового экскаватора ЭО-3323М

Результаты экспериментальной апробации оптимизационной математической модели распределения машин по объектам

В ходе экспериментальных исследований модели установлено, что оптимизация распределения парка кусторезов позволила сократить энергозатраты на 13,1 % (таблицы 5, 6); парка одноковшовых экскаваторов на 13,6 % (таблицы 7, 8).

Таблица 5 – Энергозатраты на производство работ кусторезами (план)

№ п/п	Марка машины	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
		450000	550000	350000	540000	500000	450000	380000	460000	350000	550000
1	МК-1	0	0	55,0032	0	0	0	9,667378	0	0	0
2	МК-1	39,73045	0	20,77943	0	0	0	0	0	0	0
3	МК-1	0	0	0	0	0	0	60,43956	0	0	0
4	МК-2	22,53702	21,6608	0	0	0	0	0	0	0	0
5	МК-2	0	9,040509	0	0	0	0	0	0	35,34419	0
6	КН-1	0	18,55996	0	0	0	0	0	25,64256	0	0
7	КН-2	0	0	0	0	25,60551	0	0	9,363048	0	0
8	КН-3	0	0	0	9,263072	0	21,83337	0	0	0	0
9	КН-3	0	0	0	17,52242	3,946304	0	0	0	0	9,698626
10	КН-3М	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,14913
Сумма		62,26747	49,26127	75,78263	26,7855	29,55181	21,83337	70,10694	35,00561	35,34419	23,84775
Суммарные энергозатраты на выполнение работ					429,79 кВт год/м²						

Таблица 6 – Энергозатраты на производство работ кусторезами (оптимальный план)

№ п/п	Марка машины	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
		450000	550000	350000	540000	500000	450000	380000	460000	350000	550000
1	МК-1	0	0	0	0	0	34,77387	0	0	0	0
2	МК-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,69573
3	МК-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51,24224
4	МК-2	0	0	0	24,70215	0	15,86235	0	0	0	0
5	МК-2	0	0	0	20,56534	20,40209	0	0	0	0	0
6	КН-1	0	0	0	0	19,86098	0	0	23,43291	0	0
7	КН-2	0	25,02184	0	0	0	0	0	11,13088	0	0
8	КН-3	13,90786	9,658121	0	0	0	0	11,19276	0	0	0
9	КН-3	13,64923	0	0	0	0	0	0	0	20,91372	0
10	КН-3М	0	0	23,3897	0	0	0	11,98704	0	0	0
Сумма		27,5571	34,67997	23,3897	45,26749	40,26307	50,63621	23,1798	34,56378	20,91372	72,93797
Суммарные энергозатраты на выполнение работ					373,39 кВт год/м²						

Таблица 7 – Энергозатраты на производство работ однокоровыми экскаваторами (план)

№ п/п	Марка машины	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
		61000	48000	56000	60000	45000	52000	65000	48000	42000	62000
1	ЭО-2621	0	0	0	7021,918	0	0	0	0	0	0
2	ЭО-2621	0	0	1593,295	5363,145	0	0	0	0	0	0
3	ЭО-2621	0	0	2326,788	0	3772,63	0	0	0	0	0
4	ЭО-2621	0	0	6744,737	0	0	0	0	0	0	0
5	ЭО-3323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5620,614
6	ЭО-3323	0	0	0	0	1972,39	2728,448	0	0	0	939,0966
7	ЭО-3323	0	0	0	0	0	1006,522	0	0	4772,727	0
8	ЭО-3323М	0	163,0406	0	0	0	0	1541,51	0	0	0
9	ЭО-4321	2492,382	0	0	0	0	0	1137,22	0	0	0
10	ЭО-4121	0	1937,296	0	0	0	721,7658	0	2108,914	0	0
Сумма		2492,382	2100,336	10664,82	12385,06	5745,02	4456,735	2678,73	2108,914	4772,727	6559,711
Суммарные энергозатраты на выполнение работ					53964,44 кВт год/м³						

Таблица 8 – Энергозатраты на производство работ однокоровыми экскаваторами (оптимальный план)

№ п/п	Марка машины	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
		61000	48000	56000	60000	45000	52000	65000	48000	42000	62000
1	ЭО-2621	0	0	0	0	0	0	5453,191	0	0	0
2	ЭО-2621	2776,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	ЭО-2621	4658,613	0	0	0	0	761,2146	0	0	0	0
4	ЭО-2621	0	0	0	0	0	0	2638,705	0	0	0
5	ЭО-3323	0	4862,864	0	0	0	0	0	0	0	651,1087
6	ЭО-3323	0	0	0	0	0	0	0	4098,549	0	1432,184
7	ЭО-3323	0	0	0	0	0	4797,456	0	764,3143	0	0
8	ЭО-3323М	0	0	0	4062,789	0	0	0	0	0	348,1838
9	ЭО-4321	0	0	3575,139	0	0	0	0	0	817,7781	0
10	ЭО-4121	0	0	0	0	2158,818	0	0	0	1218,223	1575,401
Сумма		7434,903	4862,864	3575,139	4062,789	2158,818	5558,67	8091,897	4862,864	2036,001	4006,878
Суммарные энергозатраты на выполнение работ					46650,82 кВт год/м³						

Результаты экспериментальной апробации оптимизационной математической модели компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия

Экспериментальные исследования модели позволили определить для дождевальной машины «Каскад» оптимальные значения длины трубопровода под имеющиеся геометрические размеры орошаемых участков, что дало возможность сократить число самоходных тележек (таблицы 9–11) для 1-го участка с 13 до 12 шт., для 2-го – с 11 до 10 шт., для 3-го – с 9 до 8 шт. и, следовательно, снизить массу и энергозатраты при работе машин на 9,3 %.

Таблица 9 – Оптимизация водопроводящего трубопровода дождевальной машины «Каскад», орошаемый участок № 1

Базовая конфигурация ДМ «Каскад»	Оптимальная конфигурация ДМ «Каскад»
Размеры орошаемого участка 1300×1300 м; гидромодуль подачи $q = 0,81$ л/(с·га); радиус полива дождевальной машины $R_d = 650$ м; площадь орошения дождевальной машиной $S_0 = 132,73$ га; расход воды дождевальной машиной $Q_m = 107,51$ л/с	
1-й участок трубопровода $L_1 = 515,3$ м (11 пролетов из труб $\varnothing 203 \times 3$ мм, из которых: 9 пролетов с длиной труб 47,9 м, 2 пролета с длиной труб 42,1 м)	1-й участок трубопровода $L_1 = 414,43$ м (9 пролетов из труб $\varnothing 219 \times 3$ мм, из которых: 6 пролетов с длиной труб 47,9 м, 3 пролета с длиной труб 42,1 м)
2-й участок трубопровода $L_2 = 130,5$ м (2 пролета из труб $\varnothing 159 \times 3$ мм с длиной труб 65,25 м)	2-й участок трубопровода $L_2 = 195,75$ м (3 пролета из труб $\varnothing 159 \times 3$ мм с длиной труб 65,25 м)
Длина консольного трубопровода $L_k = 4,2$ м	Длина консольного трубопровода $L_k = 30$ м
Длина дождевальной машины $L_m = 650$ м	Длина дождевальной машины $L_m = 640,18$ м
Общее число пролетов в машине – 13 шт.	Общее число пролетов в машине – 12 шт.

Таблица 10 – Оптимизация водопроводящего трубопровода дождевальной машины «Каскад», орошаемый участок № 2

Базовая конфигурация ДМ «Каскад»	Оптимальная конфигурация ДМ «Каскад»
Размеры орошаемого участка 1100×1200 м; гидромодуль подачи $q = 1,05$ л/(с·га); радиус полива дождевальной машины $R_d = 550$ м; площадь орошения дождевальной машиной $S_0 = 95,03$ га; расход воды дождевальной машиной $Q_m = 99,78$ л/с	
1-й участок трубопровода $L_1 = 425,3$ м (9 пролетов из труб $\varnothing 203 \times 3$ мм, из которых: 8 пролетов с длиной труб 47,9 м, 1 пролет с длиной труб 42,1 м)	1-й участок трубопровода $L_1 = 330,23$ м (7 пролетов из труб $\varnothing 219 \times 3$ мм, из которых: 6 пролетов с длиной труб 47,9 м, 1 пролет с длиной труб 42,1 м)
2-й участок трубопровода $L_2 = 130,5$ м (2 пролета из труб $\varnothing 159 \times 3$ мм с длиной труб 65,25 м)	2-й участок трубопровода $L_2 = 184,25$ м (3 пролета из труб $\varnothing 159 \times 3$ мм, из которых: 1 пролет с длиной труб 65,25 м, 2 пролета с длиной труб 59,5 м)
Длина консольного трубопровода $L_k = 4,2$ м	Длина консольного трубопровода $L_k = 30$ м
Длина дождевальной машины $L_m = 560$ м	Длина дождевальной машины $L_m = 544,48$ м
Общее число пролетов в машине – 11 шт.	Общее число пролетов в машине – 10 шт.

Таблица 11 – Оптимизация водопроводящего трубопровода дождевальной машины «Каскад», орошаемый участок № 3

Базовая конфигурация ДМ «Каскад»	Оптимальная конфигурация ДМ «Каскад»
Размеры орошаемого участка 1014×1022 м; гидромодуль подачи $q = 0,93$ л/(с·га); радиус полива дождевальной машины $R_d = 507$ м; площадь орошения дождевальной машиной $S_0 = 80,75$ га; расход воды дождевальной машиной $Q_m = 75,1$ л/с	
1-й участок трубопровода $L_1 = 227,9$ м (5 пролетов из труб $\varnothing 219 \times 3$ мм, из которых: 3 пролета с длиной труб 47,9 м, 2 пролета с длиной труб 42,1 м)	1-й участок трубопровода $L_1 = 192,33$ м (4 пролета из труб $\varnothing 219 \times 3$ мм с длиной труб 47,9 м)
2-й участок трубопровода $L_2 = 272,65$ м (4 пролета из труб $\varnothing 159 \times 3$ мм из которых: 3 пролета с длиной труб 71,05 м, 1 пролет с длиной труб 59,5 м)	2-й участок трубопровода $L_2 = 272,65$ м (4 пролета из труб $\varnothing 159 \times 3$ мм, из которых: 3 пролета с длиной труб 71,05 м, 1 пролет с длиной труб 59,5 м)
Длина консольного трубопровода $L_k = 6,5$ м	Длина консольного трубопровода $L_k = 24$ м
Длина дождевальной машины $L_m = 507$ м	Длина дождевальной машины $L_m = 488,98$ м
Общее число пролетов в машине – 9 шт.	Общее число пролетов в машине – 8 шт.

Таким образом, комплексные полевые, производственные и вычислительные эксперименты подтвердили эффективность предложенных ресурсосберегающих технологий и оптимизационных математических моделей управления техническим комплексом мелиоративных систем.

В пятой главе «*Внедрение и экономическая эффективность результатов исследований*» приведена информация по внедрению и оценке эффективности предложенных научных решений. Разработанные ресурсосберегающие технологии для оросительных каналов и напорных трубопроводов, технология эксплуатации дождевальной техники, оптимизационные математические модели, охватывающие вопросы управления насосными станциями, формирования, обновления и оперативного распределения парка машин, а также модель компоновки дождевальной техники, успешно апробированы в производственных условиях и внедрены в хозяйствах Саратовской, Астраханской и Курской областей.

Оценка эффективности выполнена на основе энергетического анализа, являющегося объективным и стабильным критерием в рыночных условиях. Проведено детальное сравнение энергозатрат при использовании традиционных (базовых) и предложенных ресурсосберегающих (новых) вариантов технологий и оптимизационных моделей (таблица 12).

Таким образом, производственное внедрение и последующий комплексный анализ убедительно доказали высокую эффективность разработанных научно-технических решений. Существенное снижение энергозатрат, достигаемое за счет внедрения научно обоснованных технологических процессов и систем математической оптимизации, подтверждает до-

стижение цели диссертационного исследования. Полученный эффект обеспечивает значительный ресурсосберегающий результат для предприятий мелиоративного комплекса, способствуя повышению устойчивости и конкурентоспособности орошаемого земледелия.

Таблица 12 – Эффективность внедрения результатов исследования

Мероприятие	Критерий энергетической эффективности K_3 , $K_3 = \mathcal{E}_{л.нов} / \mathcal{E}_{л.баз}$	Показатель интенсификации I_3 , %, $I_3 = (1 - K_3) \cdot 100 \%$
1. Ресурсосберегающая технология эксплуатации оросительных каналов	0,542	45,8
2. Ресурсосберегающая технология ремонта и реконструкции оросительных каналов	0,881	11,9
3. Ресурсосберегающая технология ремонта напорных трубопроводов	0,900	10
4. Ресурсосберегающая технология реконструкции напорных трубопроводов	0,877	12,3
5. Технология эксплуатации дождевальных машин кругового действия с определением оптимального местоположения монтажной площадки	0,893	10,7
6. Оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией	0,805	19,5
7. Оптимизационная математическая модель формирования парка машин кусторезы одноковшовые экскаваторы	0,842	15,8
	0,827	17,3
8. Оптимизационная математическая модель обновления парка машин кусторезы одноковшовые экскаваторы	0,617	38,3
	0,614	39
9. Оптимизационная математическая модель распределения парка машин кусторезы одноковшовые экскаваторы	0,869	13,1
	0,864	13,6
10. Оптимизационная модель компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия	0,907	9,3

Примечание: $\mathcal{E}_{л.нов}$, $\mathcal{E}_{л.баз}$ – энергозатраты нового и базового вариантов соответственно

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих технологий и комплексов технических средств для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием. Подтверждено, что высокая степень износа оросительных систем, их критическая важность для продовольственной безопасности и значительные объемы работ по их обслуживанию обуславливают чрезвычайно высокую ресурсоемкость этих процессов. Ключевыми факторами являются интенсивное зарастание каналов кустарником (густота стояния 28–30 тыс. шт./га, высота до 3,8 м) и их заиливание (толщина наносного слоя 0,2–0,7 м), снижающее пропускную способность на 23–31 %. Это создает объективную необходимость в совершенствовании и внедрении научно обоснованных ресурсосберегающих решений.

2. Научно обоснована и усовершенствована система эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием, обеспечивающая снижение энергозатрат на 10–45,8 %, и включающая в себя технологию очистки каналов от кустарниковой растительности и наносов, блоки технологий подготовительных работ ремонта и реконструкции каналов и напорных трубопроводов на заросших участках трассы, а также технологии сборки и эксплуатации дождевальных машин кругового действия.

3. Разработана и верифицирована оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией, работающей на сеть закрытых напорных трубопроводов с широкозахватными дождевальными машинами кругового действия, позволяющая сократить энергопотребление на 19,5 % за счет ликвидации потерь на дросселирование и работу насосов в неоптимальных режимах.

4. Разработаны и верифицированы оптимизационные математические модели формирования, обновления и оперативного распределения парка машин для эксплуатационно-ремонтных работ на транспортирующей сети оросительных систем.

Экспериментальная апробация оптимизационной математической модели формирования парка машин позволила определить, что наиболее эффективными являются кусторез марки КН-3М и одноковшовый экскаватор ЭО-3323М. Внедрение модели обеспечило сокращение энергозатрат для парка кусторезов на 15,8 %, для одноковшовых экскаваторов – на 17,3 %.

Экспериментальная апробация оптимизационной математической модели обновления парка машин выявила, что выбор оптимального

решения относительно дальнейшего жизненного цикла кустореза КН-3М составляет 11–13 лет, экскаватора ЭО 3323М – 10–12 лет. По прошествии данного времени принимается управляющее решение о замене существующей машины на новую. Внедрение модели позволило сократить энергозатраты для кусторезов на 38,3 %, для одноковшовых экскаваторов на 39 %.

В ходе экспериментальной апробации оптимизационной математической модели оперативного распределения машин по объектам установлено, что оптимизация распределения парка кусторезов обеспечивает сокращение энергозатрат на 13,1 %; парка одноковшовых экскаваторов на 13,6 %.

5. Экспериментальная апробация оптимизационной математической модели компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия, адаптированной к конфигурации орошаемого поля, позволила определить оптимальные значения длины участков трубопровода под имеющиеся геометрические размеры орошаемого поля, что дало возможность сократить число самоходных тележек, уменьшить массу машин и снизить энергозатраты на 9,3 %.

6. Разработанные ресурсосберегающие технологии и оптимизационные математические модели внедрены на сельскохозяйственных предприятиях Саратовской, Волгоградской, Астраханской и Курской областей. Энергетический анализ, проведенный с применением современных методов, доказал высокую энергетическую эффективность предложенных решений, использование которых способствует снижению энергозатрат на 9,3–45,8 %.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

1. Для эксплуатационных организаций и подрядных ремонтно-строительных предприятий: внедрить ресурсосберегающие технологии эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем полива дождеванием, предусматривающие срезание кустарниковой растительности с последующим угнетением пней и переработкой древесины в энергетическую или технологическую щепу, что позволит повысить эффективность работ на 10–45,8 % по сравнению с традиционными методами.

2. Для служб автоматизации и главных энергетиков эксплуатационных водохозяйственных организаций: оборудовать подкачивающие насосные станции, работающие на сеть закрытых напорных трубопроводов с широкозахватными дождевальными машинами кругового действия, интеллектуальными системами управления, что обеспечит экономию электроэнергии до 19,5 % за счет поддержания стабильного давления и ликвидации потерь на дросселирование.

3. Для машинно-технологических станций, агрохолдингов и отделов механизации мелиоративных организаций: комплектовать и обновлять парк мелиоративной техники на основе оптимизационных математических моделей формирования и обновления парка машин, позволяющих определить наиболее энергоэффективные машины и оптимальный срок их замены в процессе эксплуатации с сокращением энергозатрат на 15,8–39 %.

4. Для диспетчерских служб и отделов эксплуатации водохозяйственных организаций: внедрить систему оперативного распределения техники по производственным объектам на основе оптимизационной математической модели с учетом технических характеристик машин и местных условий, что позволит сократить энергозатраты на 13–14 % при выполнении работ по эксплуатации, ремонту и реконструкции оросительных систем полива дождеванием.

5. Для проектно-конструкторских организаций и заводов-изготовителей дождевальной техники: применять оптимизационную математическую модель для компоновки водопроводящего трубопровода дождевальной машины кругового действия, позволяющую адаптировать ее к конфигурации орошаемого поля, снизить массу и энергозатраты на 9,3 % при сохранении ее эксплуатационных характеристик.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

1. *Разработка и внедрение интеллектуальных систем управления (ИСУ) для мелиоративных комплексов.* Перспективными являются создание и апробация более сложных алгоритмов ИСУ, которые будут учитывать не только текущие параметры насосных станций и дождевальных машин, но и прогнозировать изменение условий (погода, состояние почвы, фаза развития растений) для адаптивного планирования поливов и минимизации энергопотребления в реальном времени.

2. *Создание цифровых двойников оросительных систем.* Разработка комплексных имитационных моделей, объединяющих оптимизационные модели работы насосных станций, парка машин и дождевальной техники. Это позволит проводить виртуальные испытания с использованием различных сценариев эксплуатации, прогнозировать износ оборудования и оптимизировать управление всей оросительной системой как единым объектом.

3. *Углубленная разработка технологий переработки кустарниковой растительности с созданием замкнутых циклов.* Исследование возможностей создания на базе мелиоративных предприятий комплексов по глубокой переработке щепы не только в энергетические, но и в технологические продукты (композитные материалы, биоудобрения, кормовые добавки), что повысит экономическую эффективность и экологичность ресурсосберегающих технологий.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые научные издания, рекомендованные ВАК Минобрнауки России

1. Абдразаков, Ф. К. Экономико-энергетическая оценка эффективности технологии и технических средств для очистки мелиоративных каналов и водоемов противопожарного назначения / Ф. К. Абдразаков, Д. А. Соловьев, **Д. Г. Горюнов**, С. А. Анисимов // Аграрный научный журнал. – 2014. – № 9. – С. 31–35.
2. Абдразаков, Ф. К. Полевые исследования машин для очистки мелиоративных каналов и водоемов противопожарного назначения от древесно-кустарниковой растительности / Ф. К. Абдразаков, Д. А. Соловьев, **Д. Г. Горюнов**, С. А. Анисимов // Аграрный научный журнал. – 2014. – № 12. – С. 51–55.
3. Соловьев, Д. А. Цифровые технологии в управлении орошением / Д. А. Соловьев, Г. Н. Камышова, Н. Н. Терехова, **Д. Г. Горюнов**, А. Вардумян // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 4. – С. 93–97.
4. Анисимов, С. А. Энергетическая оценка технологии удаления кустарника и мелколесья с угнетением пней для обеспечения безопасной эксплуатации линейных объектов / С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов**, О. В. Карпова // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 2. – С. 65–68.
5. Анисимов, С. А. Результаты исследования устройства, подавляющего нежелательную растительность вдоль линейных объектов для обеспечения их безопасной эксплуатации / С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов**, О. В. Карпова, К. Е. Панкин // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 3. – С. 82–85.
6. Соловьев, Д. А. Организация участка орошения для эффективной эксплуатации дождевальной машины «Каскад 65Т» / Д. А. Соловьев, **Д. Г. Горюнов**, Ю. Н. Гrepечук, М. Г. Загоруйко, Р. Е. Кузнецов // Природообустройство. – 2023. – № 1. – С. 28–32.
7. Соловьев, Д. А. Параметры закрытой оросительной сети и конструкция узла подключения дождевальной машины «Каскад 65Т» / Д. А. Соловьев, **Д. Г. Горюнов**, Ю. Н. Гrepечук, М. Г. Загоруйко, Р. Е. Кузнецов // Природообустройство. – 2023. – № 2. – С. 66–71.
8. **Горюнов, Д. Г.** Особенности технического обслуживания дождевальной машины «Каскад 65Т» / Д. Г. Горюнов, М. Г. Загоруйко, Р. Е. Кузнецов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2023. – № 4. – С. 36–38.
9. Соловьев, Д. А. Дистанционное управление и мониторинг дождевальной машины «Каскад 65Т» / Д. А. Соловьев, **Д. Г. Горюнов**, Ю. Н. Гrepечук, М. Г. Загоруйко, Р. Е. Кузнецов // Природообустройство. – 2023. – № 5. – С. 28–32.
10. Чумакова С. В. Математическая модель оптимизации формирования парка машин / С. В. Чумакова, **Д. Г. Горюнов**, М. Г. Загоруйко // Природообустройство. – 2025. – № 1. – С. 56–62. – К1.
11. Абдразаков Ф. К. Математическая модель оптимизации обновления парка мелиоративных машин / Ф. К. Абдразаков, С. В. Чумакова, **Д. Г. Горюнов** // Мелиорация и водное хозяйство. – 2025. – № 4. – С. 22–27 – К2.

Патенты

12. Пат. 2258354 Российская Федерация, МПК7 А 01 G 23/06, 23/08, В 27 В 11/12. Кусторез / Абдразаков Ф. К., Соловьев Д. А., Бахтиев Р. Н., Егоров В. С., **Горюнов Д. Г.** ; заявитель УНПЦ «Волгоагротехника», г. Саратов, патентообладатель – авторы патента. – № 2003135825/12 ; заявл. 10.12.2003 ; опубл. 20.08.2005, Бюл. № 23. – 9 с.

13. Пат. 2316206 Российская Федерация, МПК7 А 01 G 23/06. Кусторез / Абдразаков Ф. К., Мараев В. Н., Соловьев Д. А., Кузнецов Р. Е., **Горюнов Д. Г.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2005136324/12 ; заявл. 22.11.2005 ; опубл. 10.02.2008, Бюл. № 4. – 7 с.

14. Пат. 2716987 Российская Федерация, А 01 G 25/09. Шпренгель фермы дождевальной машины / Соловьев Д. А., Кузнецов Р. Е., Бакиров С. М., Камышова Г. Н., Макаров С. А., **Горюнов Д. Г.**, Колганов Д. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2019103402 ; заявл. 07.02.2019 ; опубл. 17.03.2020, Бюл. № 8. – 8 с.

15. Пат. 2801951 Российская Федерация, С1 В05 В 1/18. Дождевальная насадка / Соловьев Д. А., Кузнецов Р. Е., Соловьев В. А., Колганов Д. А., **Горюнов Д. Г.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова». – № 2022133114 ; заявл. 15.12.2022 ; опубл. 21.08.2023, Бюл. № 24. – 8 с.

16. Пат. 2810574 Российская Федерация, С1 А01 G 25/09. Способ повышения проходимости многоопорной дождевальной машины кругового действия на участках со сложным рельефом / Соловьев Д. А., Кузнецов Р. Е., **Горюнов Д. Г.**, Садаев М. С., Загоруйко М. Г. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова». – № 2023128411 ; заявл. 02.11.2023 ; опубл. 27.12.2023, Бюл. № 36. – 10 с.

17. Пат. 2827428 Российская Федерация, С1 А01 G 25/09. Ферменный пролет дождевальной машины / Соловьев Д. А., Кузнецов Р. Е., **Горюнов Д. Г.**, Колганов Д. А., Шематулин А. И., Гrepечук Ю. Н. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова». – № 2024102454 ; заявл. 01.02.2024 ; опубл. 26.09.2024, Бюл. № 27. – 12 с.

18. Пат. 2864950 Российская Федерация, С1 А01 G 25/09. Способ компоновки водопроводящего трубопровода низконапорной дождевальной машины кругового действия с ферменной конструкцией пролетов / Соловьев Д. В., Кузнецов Р. Е., **Горюнов Д. Г.**, Колганов Д. А., Соловьев Д. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова». – № 2025104402 ; заявл. 26.02.2025 ; опубл. 30.06.2026, Бюл. № 19. – 33 с.

**Публикации в журналах, сборниках научных трудов,
материалах конференций и других изданиях**

19. Абдразаков, Ф. К. Интенсификация технологических процессов мелиоративного производства на основе оптимизации формирования и обновления парков машин / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Механизация строительства. – 2003. – № 1. – С. 20–22.

20. Абдразаков, Ф. К. Энергосберегающая оптимизация распределения землеройной техники / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Вопросы повышения качества образования в области природообустройства и водопользования : сб. материалов 5 межвуз. науч.-методич. и науч.-технич. конф. / Московский гос. ун-т природообустройства. – М., 2003. – С. 98–100.

21. Абдразаков, Ф. К. Зависимость выполнения производственной программы от оптимального состава экскаваторного парка / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов**, В. С. Егоров // Строительные и дорожные машины. – 2003. – № 9. – С. 24–26.

22. Абдразаков, Ф. К. Ресурсо- и энергосберегающие технологии и машины для эффективной эксплуатации оросительных систем / Ф. К. Абдразаков, Д. А. Соловьев, О. В. Кабанов, **Д. Г. Горюнов** // Итоги научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы за 1999–2002 гг. (аннотированный сборник) / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2003. – С. 66–67.

23. **Горюнов Д. Г.** Методика определения эффективных видов и типоразмеров машин в мелиоративном производстве / Д. Г. Горюнов // Молодые ученые ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ» – агропромышленному комплексу Поволжского региона : сб. науч. работ / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2003. – С. 598–601.

24. Абдразаков, Ф. К. Оптимальное планирование распределения техники – основа стабильного развития производства / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Механизация строительства. – 2004. – № 1. – С. 8–10.

25. Абдразаков, Ф. К. Теоретическое обоснование использования кусторезов / Ф. К. Абдразаков, Д. А. Соловьев, Р. Н. Бахтиев, **Д. Г. Горюнов** // Строительные и дорожные машины. – 2004. – № 3. – С. 37–39.

26. Абдразаков, Ф. К. Рациональное обновление парка землеройной техники / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Проблемы в проектировании объектов АПК России : сб. науч. трудов / ФГУП «НИПИгипропромсельстрой». – Саратов, 2005. – С. 305–312.

27. Абдразаков, Ф. К. Решение задачи оптимизации распределения техники по производственным объектам в курсовом и дипломном проектировании / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Организация, технология и механизация производства : сб. науч. работ к 55-летию кафедры «Организация и управление инженерными работами» / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2005. – С. 68–75.

28. Абдразаков, Ф. К. Оптимизация обновления парка землеройной техники / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Актуальные проблемы сельскохозяйственной науки и образования. Вып. 3 : сб. науч. трудов II Международной науч.-практич. конф. / ФГОУ ВПО «Самарская ГСХА». – Самара, 2005. – С. 243–247.

29. Абдразаков, Ф. К. Расчет оптимальных планов распределения техники на ЭВМ / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Агроэкологическое состояние АПК : опыт, поиски, решения : материалы международной науч.-практич. конф. / Саратовский РИППК. – Саратов, 2005. – С. 208–213.

30. Абдразаков, Ф. К. Планирование оптимального парка машин сельскохозяйственного производства для эффективного развития сельских регионов России / Ф. К. Абдразаков, А. В. Волков, **Д. Г. Горюнов** // Роль научных и проектных организаций в социальном развитии села России : сб. науч. трудов по материалам Российской науч.-практ. конф. / ФГУП «НИПИгипропромсельстрой». – Саратов, 2005. – С. 136–147.

31. Абдразаков, Ф. К. Формирование парка машин для их эффективной эксплуатации / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Материалы Международной науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня рождения профессора А.Г. Рыбалко. Ч. 2 / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2006. – С. 60–65.

32. Абдразаков, Ф. К. Практическое решение задачи оптимизации распределения техники по производственным объектам / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** // Современные проблемы развития АПК : материалы науч.-практ. конф. / Волгоградская гос. с.-х. акад. – Волгоград, 2006. – С. 74–79.

33. **Горюнов, Д. Г.** Разработка безотходной технологии очистки каналов от древесно-кустарниковой растительности / Д. Г. Горюнов, С. В. Кошелев // Актуальные вопросы современного водохозяйственного комплекса : материалы международной науч.-практ. конф. / ФГОУ ВПО Омский ГАУ – Омск, 2010. – С. 83–86.

34. Соловьев, Д. А. Определение параметров кусторезов с телескопической подачи рабочего органа / Д. А. Соловьев, М. Г. Загоруйко, Р. Е. Кузнецов, **Д. Г. Горюнов** // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 2. – С. 46–48.

35. Соловьев, Д. А. Алгоритм моделирования технологий и составления технологических комплексов машин / Д. А. Соловьев, М. Г. Загоруйко, Р. Е. Кузнецов, **Д. Г. Горюнов** // Материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию со дня рождения проф. В. Г. Кобы. – Саратов : КУБиК, 2011. – С. 197–201.

36. Соловьев, Д. А. Инновационная ресурсосберегающая технология очистки оросительных каналов от древесно-кустарниковой растительности и наносов / Д. А. Соловьев, Р. Е. Кузнецов, **Д. Г. Горюнов**, С. В. Кошелев // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 5. – С. 49–54.

37. Абдразаков, Ф. К. Исследования работы машин для очистки мелиоративных каналов и водоемов противопожарного назначения от древесно-кустарниковой растительности / Ф. К. Абдразаков, Д. А. Соловьев, **Д. Г. Горюнов**, С. А. Анисимов // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 7. – С. 15–20.

38. Абдразаков, Ф. К. Механизация очистки мелиоративных каналов и водоемов противопожарного назначения и экономическая оценка ее эффективности / Ф. К. Абдразаков, Д. А. Соловьев, **Д. Г. Горюнов** // Механизация строительства. – 2015. – № 2. – С. 42–47.

39. Соловьев, Д. А. Усовершенствованная технология очистки оросительных каналов от древесно-кустарниковой растительности и наносов / Д. А. Соловьев, С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов** // Основные проблемы с.-х. наук. Вып. III : сб. науч. трудов / Инновационный центр развития образования и науки. – Волгоград, 2016. – С. 11–16.

40. Соловьев, Д. А. Конструктивно-технологическая схема устройства для угнетения пней на оросительных каналах / Д. А. Соловьев, С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов** // Сельскохозяйственные науки: от вопросов к решениям : сб. науч. трудов. междунар. науч.-практич. конф. – Томск, 2016. – С. 10–15.

41. Соловьев, Д. А. Устройство инъекционного типа для локального угнетения пней на бермах и откосах оросительных каналов / Д. А. Соловьев, С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов** // Сельскохозяйственные науки: от вопросов к решениям : сб. науч. трудов. междунар. науч.-практич. конф. – Томск, 2016. – С. 15–20.

42. Соловьев, Д. А. Состояние оросительных каналов и пути повышения качества их содержания на примере Саратовской области / Д. А. Соловьев, С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов** // Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2016. – С. 265–272.

43. Соловьев, Д. А. Конструкция ручного иньектора для угнетения пней на оросительных каналах и водоемах противопожарного назначения / Д. А. Соловьев, С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов**, Д. Н. Ермаков // Техногенная и природная безопасность : материалы IV всеросс. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов, 2017. – С. 111–113.

44. Горюнов, Д. Г. Оптимизация распределения парка машин по производственным объектам / **Д. Г. Горюнов**, И. А. Конзелко // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. IV междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов, 2018. – С. 13–15.

45. Горюнов, Д. Г. Повышение эффективности производства земляных работ при ликвидации ЧС на основе оптимизации формирования парков машин / **Д. Г. Горюнов**, И. А. Конзелко // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. IV междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов, 2018. – С. 295–298.

46. Петровичев, И. В. Методы водоочистки на закрытых оросительных системах / И. В. Петровичев, С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов** // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды: материалы I нац. науч.-практ. конф. с междунар. уч. / Саратов : КУБиК, 2019. – С. 95–98.

47. Есин, А. И. Longitudinal Flow of a Conical Deflector with a Stream of Viscous Incompressible Liquid (Продольное обтекание конического дефлектора потоком вязкой несжимаемой жидкости) / А. И. Есин, Д. А. Соловьев, Г. Н. Камышова, Л. А. Журавлева, **Д. Г. Горюнов** // International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. Vol. 10, No. 9, 2019 ; ISSN: 2228-9860.

48. Есин, А. И. Longitudinal Flow of Curviline Rotation Deflector by Viscous Incompressible Liquid (Продольное обтекание криволинейного отражателя вращения

вязкой несжимаемой жидкостью) / А. И. Есин, Д. А. Соловьев, Д. А. Колганов, **Д. Г. Горюнов**, А. В. Кириченко // *Helix* (2020) 10 (2): 72-79. *Helix E-ISSN: 2319-5592* ; P-ISSN: 2277-3495.

49. Анисимов, С. А. Обоснование параметров ручного иньектора для эффективного угнетения пней на оросительных каналах и противопожарных водоемах / С. А. Анисимов, К. Е. Панкин, В. Г. Мальцева, **Д. Г. Горюнов** // Актуальные проблемы и перспективы инновационной агроэкономики : сб. статей нац. (всеросс.) науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ – Саратов, 2020. – С. 3–9.

50. Техническое обеспечение технологии сборки дождевальных машин кругового действия / Д. А. Соловьев, В. А. Акпасов, **Д. Г. Горюнов**, С. А. Анисимов // Актуальные проблемы и перспективы инновационной агроэкономики : сб. статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции – Саратов : ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2020. – С. 333–340.

51. Соловьев, Д. А. Актуальность применения дождевальных машин в зонах рискованного земледелия на примере Саратовской области / Д. А. Соловьев, Р. Е. Кузнецов, **Д. Г. Горюнов**, Ю. Н. Грелечук // *Научная жизнь*. – 2022. – Т. 17, Вып. 4. – С. 507–514.

52. Соловьев, Д. А. Дождевальная машина «Каскад 65Т» для решения проблемы импортозамещения в мелиорации / Д. А. Соловьев, Р. Е. Кузнецов, **Д. Г. Горюнов**, Ю. Н. Грелечук // *Научная жизнь*. – 2022. – Т. 17, Вып. 5. – С. 648–658.

53. Рыжко, Н. Ф. Энергосбережение при поливе многоопорной дождевальной машиной «Волга-СМ» / Н. Ф. Рыжко, С. Н. Рыжко, Е. С. Смирнов, **Д. Г. Горюнов** // *Научная жизнь*. – 2023. – № 1 (127). – С. 20–29.

54. Панкин К. Е. Технология производства и оценка теплоты сгорания биотоплива на основе продуктов гидролиза древесины и древесных отходов / К. Е. Панкин, С. А. Анисимов, **Д. Г. Горюнов**, Г. П. Надежкина // *Аграрный научный журнал*. – 2025. – № 7. – С. 132–137.

55. **Горюнов, Д. Г.** Оптимизационная математическая модель интеллектуального управления подкачивающей насосной станцией / Д. Г. Горюнов // Глобальные вызовы и инновационные решения в мелиоративном комплексе : сб. науч. трудов по матер. научно-практ. конф. / ФГБНУ «ВолжНИИГиМ». – Энгельс : Амирит, 2026. – С. 198–204.

Монографии

56. Абдразаков, Ф. К. Оптимизация парка землеройных машин для проведения строительных и эксплуатационных работ на мелиоративных системах : [монография] / Ф. К. Абдразаков, **Д. Г. Горюнов** ; ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2005. – 144 с.

57. Соловьев, Д. А. Механизация эксплуатационных работ на оросительных каналах: [монография] / Д. А. Соловьев, Р. Е. Кузнецов, **Д. Г. Горюнов** ; ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2010. – 444 с.