

На правах рукописи

**ГОРНОСТАЕВ Владислав Игоревич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ПАРКА МАШИН В ПРИРОДООБУСТРОЙСТВЕ  
С ПОМОЩЬЮ ИНФОРМАЦИОННО - ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2018**

Работа выполнена на кафедре технической эксплуатации технологических машин и оборудования природообустройства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель:

**Новиченко Антон Игоревич,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации технологических машин и оборудования природообустройства ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты:

**Валге Александр Мартынович,**  
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории технологий и технических средств производства кормов из трав ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства»

**Быковский Максим Анатольевич,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства (ЛТ – 7), декан факультета лесного хозяйства, лесопромышленных технологий и садово-паркового строительства Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова»

Защита диссертации состоится «21» июня 2018 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 220.043.14 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19. Тел./факс: 8(499) 976-21-84

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан: «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Т.П. Кобозева

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Обеспечение продовольственной безопасности страны является основной задачей агропромышленного комплекса. Залогом успешного земледелия становится не только внедрение современных ресурсосберегающих агротехнологий, но и эффективное использование имеющихся природных ресурсов, своевременное проведение мероприятий по коренному улучшению эксплуатируемых земель, освоение и введение в эксплуатацию новых высокопродуктивных территорий.

В связи с этим разработаны и реализуются Федеральные целевые программы (ФЦП), направленные на поддержку и развитие ключевых сегментов сельскохозяйственной отрасли, в том числе на проведение комплексных мероприятий в сфере гидромелиорации, природоохранного обустройства территорий и восстановления плодородия сельскохозяйственных земель.

Мероприятия по обеспечению работоспособности и восстановлению мелиоративных систем должны иметь наивысший приоритет, так как нарушение режима орошения неминуемо приводит к снижению продуктивности земель, оказывает губительное влияние на почву и, в целом, усугубляет риски земледелия.

Однако большинство используемых гидромелиоративных систем имеют значительный износ и остро нуждаются в капитальном ремонте как отдельных элементов (гидроузлов сельскохозяйственного назначения), так и в восстановлении и частичной реконструкции линейно-протяженных сооружений: осушительно-оросительных каналов и трубопроводных сетей.

Имеющиеся на сегодняшний день методики формирования технологических комплексов машин в сфере механизации природообустройства изучены недостаточно, имеющиеся подходы основаны на общих рекомендациях строительных норм и правил (СНиП и СП), отражающих устаревшие представления о применяемых материалах, технологиях и средствах механизации технологических процессов.

Таким образом, в условиях отсутствия актуальной нормативно-технической базы, планирование работ по реконструкции линейно-протяженных сооружений в сфере природообустройства становится затруднительным, проектные данные по срокам и стоимости выполнения работ могут иметь высокую степень неопределенности. Многие задачи в природообустройстве являются уникальными и не имеют предварительно сформулированных типовых решений.

В связи с этим использование современных подходов, методов и средств для решения организационных задач, направленных на рациональное распределение производственных ресурсов, в том числе в процессе формирования эффективных технологических комплексов и систем для проведения механизированных работ в природообустройстве, является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования.**

К настоящему времени разработано множество рекомендаций, подходов и методик обеспечения эффективной эксплуатации машинных парков предприятий в различных отраслях народного хозяйства. Большинство методик основано на использовании различного рода простых эмпирических зависимостей, обобщенных статистических моделей или более сложных математических методов, основанных на описании динамических процессов с учетом вероятностных событий, привлекая аппарат теории массового обслуживания.

Во многих научных работах отмечается, что эффективность использования парка машин существенно зависит от уровня технического оснащения предприятий, квалификации механизаторских и управленческих кадров, организации грамотной эксплуатации.

Вопросы разработки методов оптимизации сложных машинных систем, технологий и качества эксплуатации исследовали: А.К. Алферов, А.А. Артюшин, В.И. Балабанов, Х.Г. Барам, О.А. Бардышев, Д.С. Буклагин, О.Н. Дидманидзе, А.С. Дорохов, В.А. Евграфов, М.Н. Ерохин, Ф.С. Завалишин, А.А. Зангиев, С.А. Иофинов, В.В. Кацыгин, Ю.К. Киртбая, Н.В. Краснощеков, А.Г. Левшин, Б.А. Линтварёв, Я.П. Лобачевский, Н.Н. Николаев, Н.М. Орлов, А.В. Погорелый, А.Н. Скороходов, В.Ф. Федоренко, Р.Ш. Хабатов и другие.

Исследования показывают, что оптимизация параметров машин, технологий работ и других производственных факторов позволяют значительно снизить различные виды затрат на производственно-техническую эксплуатацию.

Однако у всех известных методик имеются свои недостатки и ограничения. Обобщить существующие методики, зависимости и опытные данные, полученные при изучении законов функционирования сложных машинных систем, становится возможным благодаря современным информационным технологиям.

Таким образом, использование технологий информационно-экспертных систем с применением имитационного моделирования технологических систем с учетом условий их функционирования является перспективным, но малоизученным направлением.

**Цель исследования** – повышение эффективности эксплуатации парка машин в природообустройстве за счет формирования рациональных технологических комплексов с учетом условий их функционирования и характера производственных задач.

Формируемые решения основаны на информационных технологиях экспертных систем, обеспечивающих обоснованный выбор наиболее приемлемых вариантов состава комплекса машин для определенных производственных условий и заданных технологических режимов.

**Задачи исследования.** Для достижения цели работы решались задачи:

1. Исследовать существующие методики формирования технологических комплексов машин в сельскохозяйственных и смежных отраслях, выявить их основные недостатки и ограничения, сформулировать ключевые требования и направления проработки методического подхода к формированию эффективных машинных технологических систем в области природообустройства.

2. Изучить особенности производства работ по реконструкции линейно-протяженных гидромелиоративных сооружений, построить функциональную модель технологического процесса реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети, определить технические параметры сооружения.

3. Провести сбор и обработку статистической информации по продолжительности технологических циклов исследуемого процесса, эксплуатационной производительности машин и влиянию действующих факторов на производительность технологической системы в реальных условиях эксплуатации.

4. Описать логическую структуру имитационной модели исследуемой технологической системы, выбрать средства и среду моделирования, построить рабочую версию имитационной модели, осуществить ее настройку с последующей оценкой адекватности и точности моделирования.

5. Разработать и реализовать план проведения серии компьютерных экспериментов с имитационным моделированием функционирования комплексов машин различного марочного состава в заданных условиях эксплуатации.

6. Интерпретировать результаты серий компьютерных экспериментов, выявить область предпочтительных решений в соответствии с предложенными критериями оптимальности функционирования технологической системы.

7. Оценить экономическую эффективность внедрения результатов научного исследования, сформулировать план мероприятий по повышению эффективности эксплуатации парка машин на примере рассматриваемой организации.

8. Реализовать полученные результаты и логику определения рационального состава технологического комплекса машин в виде информационно-экспертной системы, предложить рекомендации по ее внедрению на производстве.

**Объектом исследования** являлись технологические машины, входящие в состав технологического комплекса машин для реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети. Также в качестве объектов исследования рассматривались машины, входящие в состав машинного парка организации, осуществляющей производственную деятельность в сфере природообустройства.

Характерные особенности технологического процесса реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети предъявляют определенные требования к объектам исследования. В частности, объекты исследования должны подбираться из числа технологических машин общестроительного назначения и являться представителями следующих групп землеройной техники: одноковшовый экскаватор на гусеничном ходу, бульдозер, экскаватор-погрузчик.

**Предметом исследования** являлись технико-экономические показатели функционирования моделируемой технологической системы в ходе реализации технологического процесса реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети в зависимости от эксплуатационно-технологических параметров объектов исследования, входящих в состав этой системы.

Также предметом исследования являлась моделируемая технологическая система как сложный структурный элемент производственной системы, позволяющий в определенных случаях сохранять относительную стабильность функционирования технологического процесса и нивелировать сбои отдельных элементов системы.

**Научная новизна** заключается в методике оптимизации марочного состава комплекса технологических машин при производстве работ по строительству линейно-протяженных сооружений в природообустройстве на основе технологий имитационного моделирования.

Научно обоснована возможность использования информационно-экспертных систем в задачах формирования рациональных технологических комплексов машин предприятия с учетом условий их эксплуатации и технологии ведения работ. Разработан многофункциональный инструмент поддержки принятия организационных решений в процессе формирования эффективных технологических комплексов машин.

На основе функциональных моделей элементов технологической системы построена мультиагентная имитационная модель, позволяющая наделять объекты исследования свойствами автономных агентов, действующих в соответствии со своими правилами взаимодействия с другими моделируемыми объектами, учитывая при этом внешнее и внутреннее воздействие моделируемой среды. При этом каждый модельный объект наделяется определенными свойствами, соответствующими реальному моделируемому объекту.

Такой подход позволяет создать реалистичную имитационную модель, описывающую технологическую систему по принципу «снизу вверх», когда свойства сложной системы формируются в процессе взаимодействия ее составных частей. При этом становится возможным использование в модели параметров, описывающих свойства модельных объектов с вероятностными значениями, соответствующими реальным процессам. При таком стохастическом моделировании удобно использовать метод Монте-Карло, который позволяет после проведения серии реализаций модели получить устойчивую характеристику откликов модели исследуемой системы.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Результаты работы могут быть востребованы сельскохозяйственными и строительными предприятиями в период обновления машинных парков, а также при выборе наилучшего варианта использования имеющегося парка, прогнозировании продолжительности и стоимости ведения механизированных работ.

Результаты исследования реализованы в методике по определению оптимального состава комплекса машин для проведения работ по реконструкции закрытой оросительной сети, разработана информационно-экспертная система «АгроМАС» для автоматизированного подбора оптимального состава парка технологических машин и оборудования, а также для расчета его основных технико-экономических параметров.

Практическая ценность результатов научных исследований подтверждается успешным внедрением разработанных программных модулей информационно-экспертной системы «АгроМАС» в реальных условиях производственной организации ЗАО «Агромехсервис», осуществляющей профессиональную деятельность в сфере дорожного и гидромелиоративного строительства, обладающей значительным опытом проведения работ по капитальному ремонту и реконструкции межхозяйственных линейных сооружений мелиоративных систем Дмитровского района Московской области.

**Методология и методы исследования.** Основой выполненных исследований являются труды выдающихся ученых, освещавшие методологии повышения и сохранения эффективности эксплуатации средств механизации в сельском хозяйстве, мелиоративном строительстве и транспортном производстве.

На первом этапе исследования применены методические подходы, основанные на принципах исследования особенностей производственных процессов как сложной многокомпонентной технологической системы.

На этапе сбора и обработки информации по объектам исследования применялись методы хронометражных измерений и математической статистики.

Решение задач по определению наиболее эффективного состава технологического комплекса машин выполнялось при помощи современных технологий мультиагентного имитационного моделирования.

Для учета вероятностной природы некоторых протекающих процессов часть факторов описана в виде вероятностных величин, что еще больше приближает модель к описываемым реальным системам.

В процессе моделирования желательно изучить все возможные отклики модели, в связи с чем был использован метод Монте-Карло, который в результате многократных прогонов позволяет статистически описать область решений задачи в виде пространства откликов моделируемой системы.

Полученные характеристики технологического процесса обрабатываются методами математического анализа для оценки эффективности комплекса машин.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Структура мультиагентной имитационной модели технологической системы реконструкции трубопровода закрытой оросительной, построенной на основе хронометражных наблюдений за объектами исследования в условиях подконтрольной эксплуатации.

2. Результаты имитационного моделирования процесса функционирования технологического комплекса машин в зависимости от эксплуатационно-технологических свойств объектов исследования, вошедших в его состав.

3. Результаты оценки экономической эффективности использования имитационного моделирования в процессе принятия решений по формированию технологических комплексов машин в условиях производственной организации.

4. Структура и функционал информационно-экспертной системы «АгроМАС», разработанной с целью определения рационального состава технологического комплекса машин для проведения работ по реконструкции закрытой оросительной сети с учетом условий эксплуатации.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность полученных результатов обеспечивается математической строгостью доказанных утверждений. Исследования проводились с использованием стандартных приборов по стандартным методикам в соответствии с разработанной программой экспериментальных исследований. Достоверность результатов имитационного моделирования обеспечивается качеством настройки модели, что в достаточной мере обеспечивалось в процессе калибровки. Погрешность моделирования обуславливается выбранной методикой. Точность моделирования по методу Монте-Карло определяется числом повторных реализаций модели, что было обеспечено в полной мере в процессе проведения серий компьютерных имитационных экспериментов. Полученные экспериментальные данные расширяют и дополняют технологии изучения сложных стохастических систем и, в целом, позволяют оценить эффективность производственных процессов.

Диссертационное исследование «Повышение эффективности эксплуатации парка машин в природообустройстве с помощью информационно-экспертных систем» выполнялось в рамках научно-исследовательской работы (НИР) кафедры эксплуатации, электрификации и автоматизации технических средств и систем природообустройства и защиты в чрезвычайных ситуациях, с непосредственным участием соискателя В.И. Горностаева в составе научного коллектива в должности ответственного исполнителя (по НИР № 14.2) – «Разработка информационной системы поддержки технологических процессов в агропромышленном комплексе на основе мультиагентного моделирования (на примере работ в природообустройстве)».

По результатам проведенных исследований разработан специализированный программный комплекс информационно-экспертной системы «АгроМАС», а также ряд вспомогательных программных модулей, что подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ: № 2013617532 Яхрома – 1.0\_ЗОС: Закрытые оросительные сети; № 2016613653 АгроМАС: Мелиоводострой; № 2016618434 АгроМАС: Реконструкция закрытой оросительной сети; № 2016619144 АгроМАС: Паспортизация средств механизации; № 2016619467 АгроМАС: Паспортизация технологических процессов; № 2016660825 АгроМАС: Паспортизация производственно-технической базы предприятия; № 2017613875 АгроМАС: Модуль функционального моделирования технологических систем; № 2017614030 АгроМАС: Модуль прогнозирования технического состояния машин; № 2016660824 АгроТехЭксперт – автоматизированная система сбора, обработки и хранения статистической и экспертной информации».

Результаты научных исследований апробированы в производственных условиях ЗАО «Агромехсервис», достигнут значимый эффект от экспериментального внедрения экспертной системы АгроМАС, предоставлен положительный Акт внедрения.

В ходе проработки ключевых вопросов в процессе создания информационно-экспертной системы были предложены уникальные методы организации взаимодействия автономных программных агентов, принципы обработки и хранения «больших» данных среды моделирования, разработана концепция паспортизации моделируемых объектов.

Основные положения научной работы систематически выносились на обсуждение в профессиональной среде на круглых столах и научных конференциях: Международной научной конференции «Научное и кадровое обеспечение продовольственной безопасности России» г. Москва, 2-4 декабря 2014 г.; Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, 2-3 июня 2015 г.; Международной научной конференции молодых ученых и специалистов «Наука молодых – агропромышленному комплексу» г. Москва, 1-3 июня 2016 г.; Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 200-летию Н.И. Железнова г. Москва, 6-8 декабря 2016 г.; Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 100-летию И.С. Шатилова г. Москва, 6-7 июня 2017 г.; Международной научной конференции, посвященной 130-летию Н.И. Вавилова г. Москва, 5-7 декабря 2017 г.

**Публикации результатов исследований.** Основные положения и научные результаты диссертационной работы изложены в 29 научных публикациях, из которых 6 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено 9 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, список используемых литературных источников из 143 наименований, приложение на 39 страницах. Содержание работы изложено на 163 страницах машинописного текста, поясняется 48 рисунками и 12 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена общая характеристика работы.

**В первой главе** выполнен обзор текущего состояния изучаемого вопроса и определены основные причины сложившейся ситуации. Установлено, что принятие управленческих решений на этапе планирования работ в природообустройстве, реализуется на основе устаревших методик, усовершенствование которых возможно реализовать, используя современные методы и технологии. Определены этапы изучения и особенности описания сложных систем и ее элементов. Рассмотрены основные этапы создания инструмента по поддержке принятия решений и предложена его структурная схема. Сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** определены основные особенности функционирования технологической системы на примере технологического процесса реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети, разработана имитационная модель и выполнена ее настройка.

Технологический процесс реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети производится поточным методом по технологии, подразумевающей разработку траншеи до уровня заложения изношенной трубы, ее демонтаж и замену. Основные параметры восстанавливаемого сооружения представлены на рисунке 1:

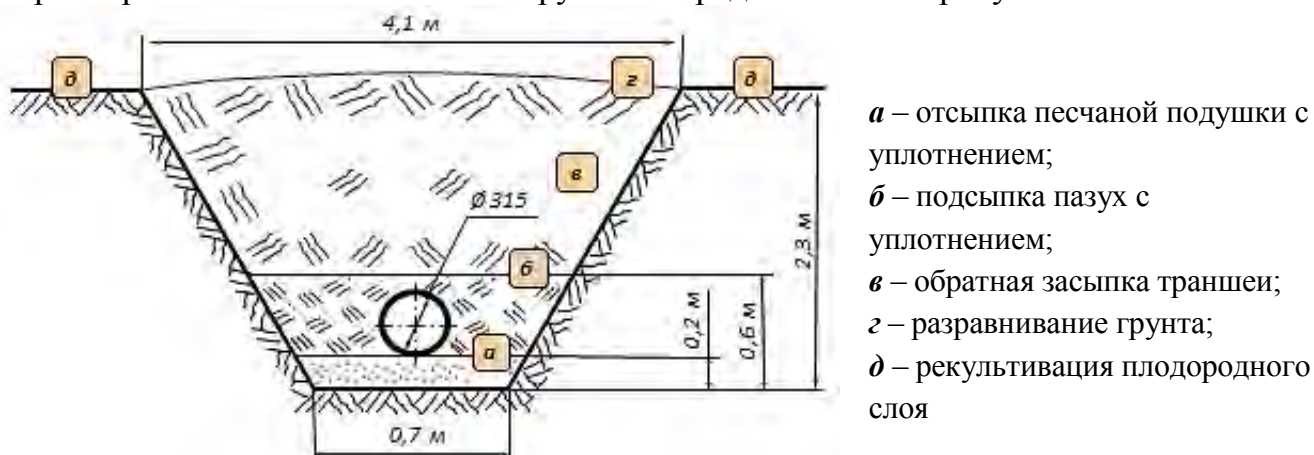


Рисунок 1 – Параметры восстанавливаемого сооружения

После удаления из траншеи старых элементов дно траншеи засыпается песчаной подушкой, которую выравнивают и утрамбовывают при помощи виброплиты высотой не более 0,2 м. На следующей операции подготовленную для укладки трубную плетть располагают в траншее. Трубная плетть представляет собой несколько труб сваренных встык. Ее длина равняется длине захватки и составляет 120 метров. Сварка труб из ПНД выполняется производственным персоналом на бровке траншеи при помощи специализированного сварочного оборудования на протяжении всего процесса реконструкции. Качество сварных соединений после каждого стыка проверяется опрессовочной установкой при помощи сжатого воздуха, после чего производится сварка нового стыка или укладка трубопровода в траншею.

Засыпка траншеи выполняется постепенно. Сначала заполняется пространство между боковой частью трубы и профилем сооружения. Затем выполняется подсыпка грунта в траншею на толщину, приблизительно равную 0.1 м от верхней поверхности уложенной трубы. Последний этап заключается в полной засыпке траншеи и восстановлении плодородного слоя почвы.

Для описания технологического процесса была произведена его декомпозиция, выполненная на основе принципов нотации функционального моделирования IDEF 0, представленной на рисунке 2:

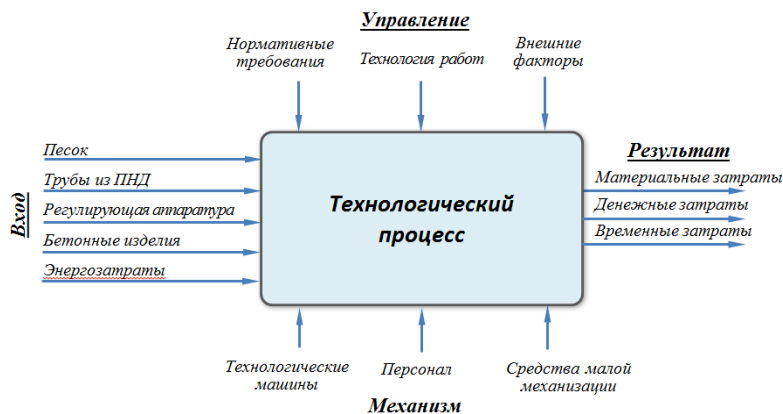


Рисунок 2 – Контекстная диаграмма технологического процесса реконструкции

Декомпозиция контекстной диаграммы состоит из блоков операций, выполнение которых производится с интервалом равным захватке (120 м):

- подготовительные работы;
- основные работы;
- заключительные работы.

Декомпозиция каждого операционного блока составляет 3-4 технологические операции.

Установлено, что для выполнения всех необходимых технологических операций в рассматриваемых условиях достаточно будет использовать следующий состав технологического комплекса: бульдозер, одноковшовый гусеничный экскаватор, два экскаватора-погрузчика, сварочная установка, опрессовочная установка, виброплита.

На рисунке 3 представлена схема взаимодействия технологических машин с технологическими операциями, выполняемыми в процессе производства работ по реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети.

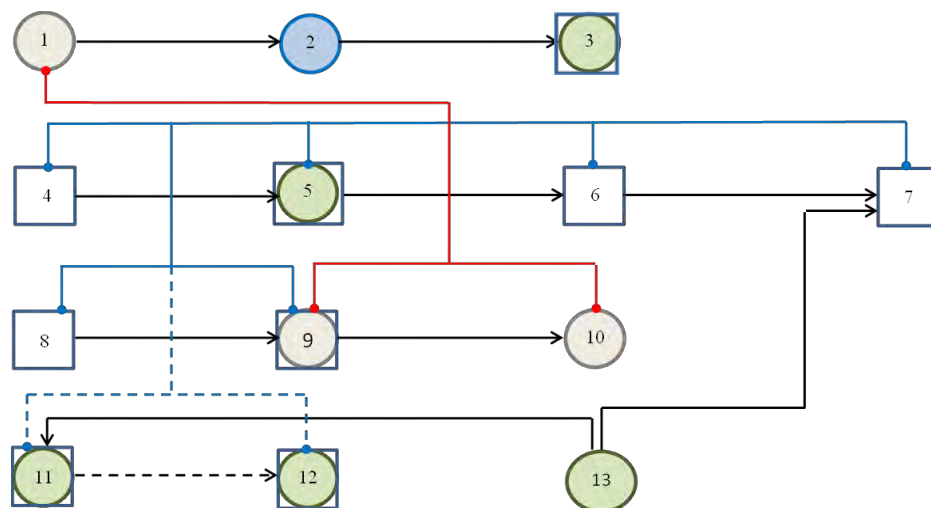


Рисунок 3 – Схема перемещения технологических машин в процессе выполнения технологического процесса:

- – операции с участием элемента «бульдозер»;
- – операции с участием элемента «экскаватор»;
- – операции с участием элементов «экскаватор-погрузчик»;
- – операции с участием элементов «рабочий персонал»;
- – порядок перехода технологических операций в блоке;
- — — — — внутренняя переброска технологических элементов.

#### Технологические операции:

1. Снятие растительного слоя почвы;
2. Разработка траншеи;
3. Выемка пазух и прямиков;
4. Демонтаж трубопровода;
5. Планировка основания;
6. Подсыпка песчаной подушки с уплотнением;
7. Укладка трубной плети со стыковкой;
8. Подсыпка пазух с уплотнением;
9. Обратная засыпка траншеи;
10. Рекультивация плодородного слоя;
11. Установка задвижек на распределительные каналы;
12. Установка стаканов на стыках и их гидроизоляция;
13. Сварка плети и вывода в распределительный канал.

Полученная структура функционирования технологического процесса схематично отражает основной алгоритм выполнения работ.

Алгоритм функционирования для каждой технологической машины в комплексе, отражает технологическую возможность выполнение одной или нескольких операций процесса. На рисунке 4 представлена структура возможной реализации бульдозера в рассматриваемом технологическом процессе:

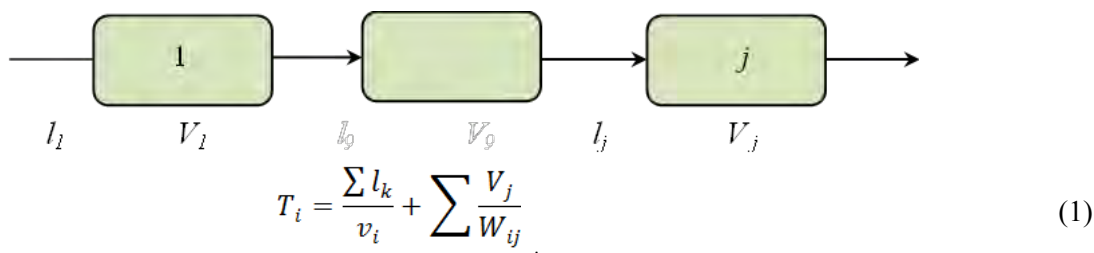


Рисунок 4 –Функционирование алгоритма агента машины в общем виде

где  $l_k$  – объем перемещений агента, м;  $v_i$  – транспортная скорость агента машины, км/ч;  $V_j$  – объем работ на агенте технологической операции, м<sup>3</sup>;  $W_{ij}$  – производительность машины на текущей операции м<sup>3</sup>/ч;  $i$  – номер агента машины;  $j$  – номер агента операции.

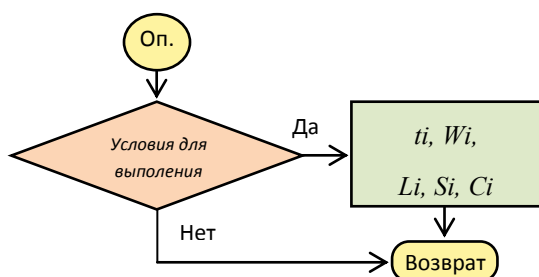


Рисунок 5 – Алгоритм функционирования технологической операции

Алгоритм функционирования агента для операции в общем виде представлен на рисунке 5. Поведение агентов регулируются посредством генерального алгоритма технологического процесса, базирующегося на заложенных в подсистеме управления правилах.

Основные условия запуска расчета объемов работ для каждой операции выражаются группой логических условий, формирующих порядок операций в технологическом процессе и проверку текущего состояния (рисунок 6).

|               |                    |                                         |          | $X_1$    | $X_2$    | $X_3$        | $X_4$        |
|---------------|--------------------|-----------------------------------------|----------|----------|----------|--------------|--------------|
| <b>Блок 1</b> | <b>Операция 1</b>  | Снятие растительного слоя почвы         | $y_1$    | ①        | -        | -            | 2            |
|               | <b>Операция 2</b>  | Разработка траншеи                      | $y_2$    | -        | ①        | 2            | -            |
|               | <b>Операция 3</b>  | Выемка пазух и прямков                  | $y_3$    | -        | -        | ①            | 2            |
| <b>Блок 2</b> | <b>Операция 4</b>  | Демонтаж трубопровода                   | $y_4$    | -        | -        | 2            | ①            |
|               | <b>Операция 5</b>  | Планировка основания траншеи            | $y_5$    | -        | -        | ①            | 2            |
|               | <b>Операция 6</b>  | Подсыпка песчаной подушки с уплотнением | $y_6$    | -        | -        | 2            | ①            |
|               | <b>Операция 7</b>  | Укладка трубной плети со стыковкой      | $y_7$    | -        | 2        | ①            | ①            |
| <b>Блок 3</b> | <b>Операция 8</b>  | Подсыпка пазух с уплотнением            | $y_8$    | -        | -        | ①            | 2            |
|               | <b>Операция 9</b>  | Обратная засыпка траншеи                | $y_9$    | ①        | -        | 2            | -            |
|               | <b>Операция 10</b> | Рекультивация плодородного слоя         | $y_{10}$ | ①        | -        | -            | 2            |
|               |                    |                                         |          | <b>Б</b> | <b>Э</b> | <b>Э-П 1</b> | <b>Э-П 2</b> |

| <b>1. Бульдозеры</b> |                    | <b>2. Экскаваторы</b> |                  | <b>3. Экскаваторы-погрузчики</b> |             | <b>4. Экскаваторы-погрузчики</b> |             |
|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|
| 1                    | ЧТЗ Б10М           | 1                     | ТВЭКС ЕТ-25      | 1                                | МТЗ ЭО-2626 | 1                                | МТЗ ЭО-2626 |
| 2                    | ЧТЗ Б12.6020       | 2                     | ТВЭКС ЕТ-18 LC   | 2                                | МТЗ ЭП-491  | 2                                | МТЗ ЭП-491  |
| 3                    | Уралтрак-ЧТЗ Т-130 | 3                     | Ковровец ЭО-4228 | 3                                | БОРЭКС 3106 | 3                                | БОРЭКС 3106 |
| ...                  | ...                | ...                   | ...              | ...                              | ...         | ...                              | ...         |

Рисунок 6 – Схема распределения объемов работ комплекса

Заключительным этапом создания имитационной модели является ее проверка и настройка. Для проверки использован динамический графический объект, который параллельно выполнению расчетов отражал процесс выполнения объема работ, выполняемых технологическими машинами комплекса в течение времени производства работ (Рисунок 7):

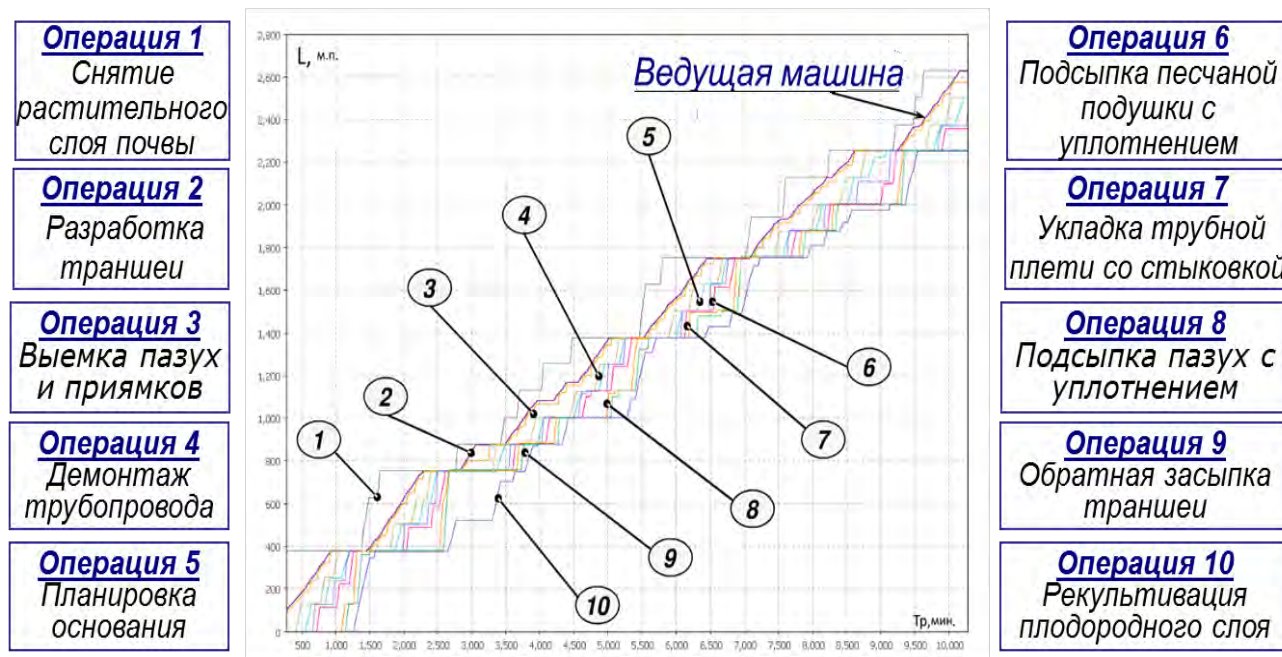


Рисунок 7 – Фрагмент циклограммы технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети, воспроизводимой мультиагентной имитационной моделью

После проверки корректности выполнения модели выполняется ее настройка, которая состоит из трех ключевых этапов: 1) Оценка согласованности; 2) Оценка адекватности; 3) Оценка точности.

Модель будет считаться адекватной, если статистические результаты, полученные с реальной системы, будут находиться в пределах доверительного интервала по формуле (2):

$$y_f \in [y_{mod} - t_{\alpha} \cdot \sigma_{mod}; y_{mod} + t_{\alpha} \cdot \sigma_{mod}], \text{ при } x_{mod} = x_f, \quad (2)$$

где  $y_f$ ,  $y_{mod}$  – результат реальной системы и моделируемой соответственно;  $x_f$ ,  $x_{mod}$  – входные данные реальной системы и моделируемой соответственно;  $t_{\alpha}$  – критерий Стьюдента;  $\sigma_{mod}$  – среднеквадратичное отклонение моделируемых показателей.

По результатам настройки модели получены удовлетворительные значения относительной ошибки, размеры которой не превысили 12%.

**В третьей главе** изложены этапы выполнения экспериментальных исследований, предложена методика сбора и обработки статистических данных, полученных в процессе подконтрольной эксплуатации группы машин в исследуемых условиях эксплуатации, предложена план-матрица компьютерного эксперимента.

Определение наиболее эффективного состава комплекса машин для производства рассматриваемого вида работ выполнялось в условиях парка машин предприятия ЗАО «Агромехсервис». Основные параметры технологических машин, применяемых для выполнения технологического процесса, и, соответственно, используемые при моделировании представлены в таблице 1.

Для улучшения качества результатов, снимаемых с модели, на входе были заданы полученные в процессе хронометражных наблюдений статистические данные, результаты сбора и обработки которых представлены в таблице 2.

Обработка и оценка полученных данных выполнялась по стандартным методикам.

Таблица 1 – Исходные данные объектов исследования для загрузки в имитационную модель

| №  | Тип                  | Марка              | Наработка, мото-ч | Мощность, кВт | Масса, т | Объем рабочего органа, м³ | Цена, тыс. руб. |
|----|----------------------|--------------------|-------------------|---------------|----------|---------------------------|-----------------|
| 1  | Бульдозер            | ЧТЗ Б10М           | 1558              | 132           | 18,8     | 5,7                       | 3600            |
| 2  |                      | ЧТЗ Б12.6020       | 1800              | 158,1         | 24,5     | 7,4                       | 3600            |
| 3  |                      | Уралтрак-ЧТЗ Т-130 | 1482              | 125           | 15       | 4,75                      | 3500            |
| 4  | Экскаватор           | ТВЭКС ЕТ-25        | 1750              | 131           | 23,5     | 1,0                       | 4630            |
| 5  |                      | ТВЭКС ЕТ-18 LC     | 1650              | 90            | 18,5     | 0,77                      | 4230            |
| 6  |                      | Ковровец ЭО-4228   | 1743              | 169           | 25       | 1,25                      | 4980            |
| 7  | Экскаватор-погрузчик | МТЗ ЭО-2626        | 1258              | 65            | 7,9      | 0,8                       | 1700            |
| 8  |                      | МТЗ ЭО-2626        | 1328              | 65            | 7,9      | 0,8                       | 1700            |
| 9  |                      | МТЗ ЭП-491         | 1423              | 65            | 7,2      | 0,5                       | 1400            |
| 10 |                      | МТЗ ЭП-491         | 1523              | 65            | 7,2      | 0,5                       | 1400            |
| 11 |                      | БОРЭКС 3106        | 1315              | 60            | 8,0      | 1,0                       | 1700            |
| 12 |                      | БОРЭКС 3106        | 1915              | 60            | 8,0      | 1,0                       | 1700            |

Таблица 2 – Результаты сбора и обработки статистических данных

| № п.п | Марка машины       | Среднее время цикла, с | Средняя эксплуатационная производительность, м³/ч | Сумма амортизационных отчислений, руб./ч | Средние затраты на ТО и ГР, руб./ч | Средние затраты на ТСМ, руб./ч |
|-------|--------------------|------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | ЧТЗ Б10М           | 128.4                  | 61.3                                              | 228                                      | 98.3                               | 831.6                          |
| 2     | ЧТЗ Б12.6020       | 135.2                  | 70.2                                              | 228                                      | 101.2                              | 925.9                          |
| 3     | Уралтрак-ЧТЗ Т-130 | 127.9                  | 53.4                                              | 222                                      | 87.5                               | 785.6                          |
| 4     | ТВЭКС ЕТ-25        | 29.7                   | 109.1                                             | 293                                      | 145.5                              | 907.2                          |
| 5     | ТВЭКС ЕТ-18 LC     | 28.5                   | 87.6                                              | 268                                      | 138.2                              | 780.4                          |
| 6     | Ковровец ЭО-4228   | 31.2                   | 129.9                                             | 316                                      | 163.0                              | 985.8                          |
| 7     | МТЗ ЭО-2626        | 40.8                   | 63.6                                              | 108                                      | 78.6                               | 302.4                          |
| 8     | МТЗ ЭО-2626        | 40.8                   | 62.4                                              | 108                                      | 78.6                               | 302.4                          |
| 9     | МТЗ ЭП-491         | 39.7                   | 40.8                                              | 89                                       | 73.1                               | 264.6                          |
| 10    | МТЗ ЭП-491         | 40.7                   | 39.8                                              | 89                                       | 73.1                               | 264.6                          |
| 11    | БОРЭКС 3106        | 41.4                   | 78.3                                              | 108                                      | 84.9                               | 322.4                          |
| 12    | БОРЭКС 3106        | 42.4                   | 76.5                                              | 108                                      | 84.9                               | 322.4                          |

Обработанные данные загружаются в модель и используются в процессе проведения серии компьютерных экспериментов. В рассматриваемых условиях количество уникальных сочетаний различных составов технологических комплексов составляет 135 сочетаний. Для каждого сочетания составляется шифр комплекса и очередность выполнения расчетов.

Продолжительность серии экспериментов в высокой степени зависит от количества итераций (повторов опыта). Рекомендуемое значение итераций для получения высокой точности моделирования составляет 9604 прогона. В заданных условиях время непрерывного расчета составит 186.5 часа.

Для оптимизации продолжительности эксперимента опытным путем было определено, что для получения достаточной точности моделирования  $\varepsilon = 0.05$  при доверительной вероятности –  $Q = 90$ , и наименее определенной вероятности исхода –  $p = 0.5$ . требуемое количество прогонов модели для каждого эксперимента приблизительно равно 300 раз.

Установленные параметры позволяют значительно сократить продолжительность серии компьютерных экспериментов вплоть до 12 часов, из которых 5.6 часа составляет расчет модели, а 6.4 ее обслуживание.

Оценка и сравнение полученных результатов выполнялись по показателю продолжительности выполнения технологического процесса. Полученные области изображены на рисунке 8, где левая и правая граница меньшего катета описывают наилучший и наихудший результат соответственно.

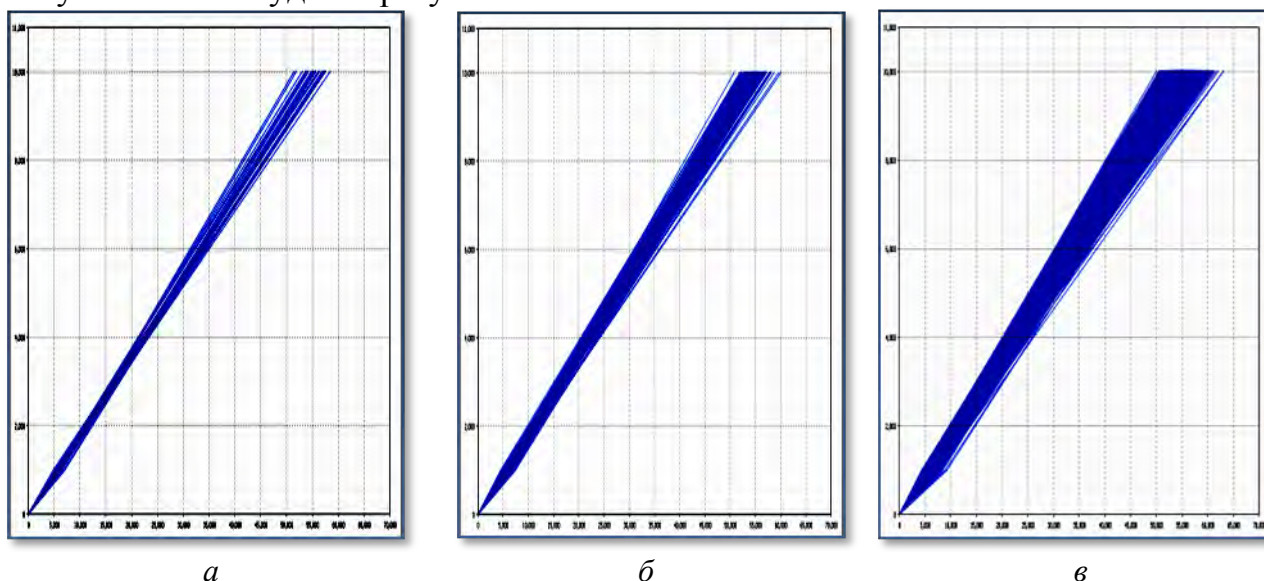


Рисунок 8 – Точность имитационного моделирования при различном числе прогонов модели  
а – 25 прогонов; б – 100 прогонов; в – 2500 прогонов

**В четвертой главе** представлены этапы организации компьютерного эксперимента и обработка полученных результатов.

Организация серии компьютерных экспериментов заключается в разработке план-матрицы, которая содержит информацию по основным параметрам, используемым в процессе моделирования. Результаты, получаемые в процессе 300 итераций при моделировании одного компьютерного эксперимента формируют область решений, определяется ее математическое ожидание. Данные сохраняются.

Наиболее интересными показателями, с точки зрения эффективности эксплуатации комплекса машин, являются сроки выполнения работ и суммарные затраты на реконструкцию. Значения данных показателей при моделировании процесса реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети протяженностью 10000 м приведены на сводном графике (Рисунок 9):

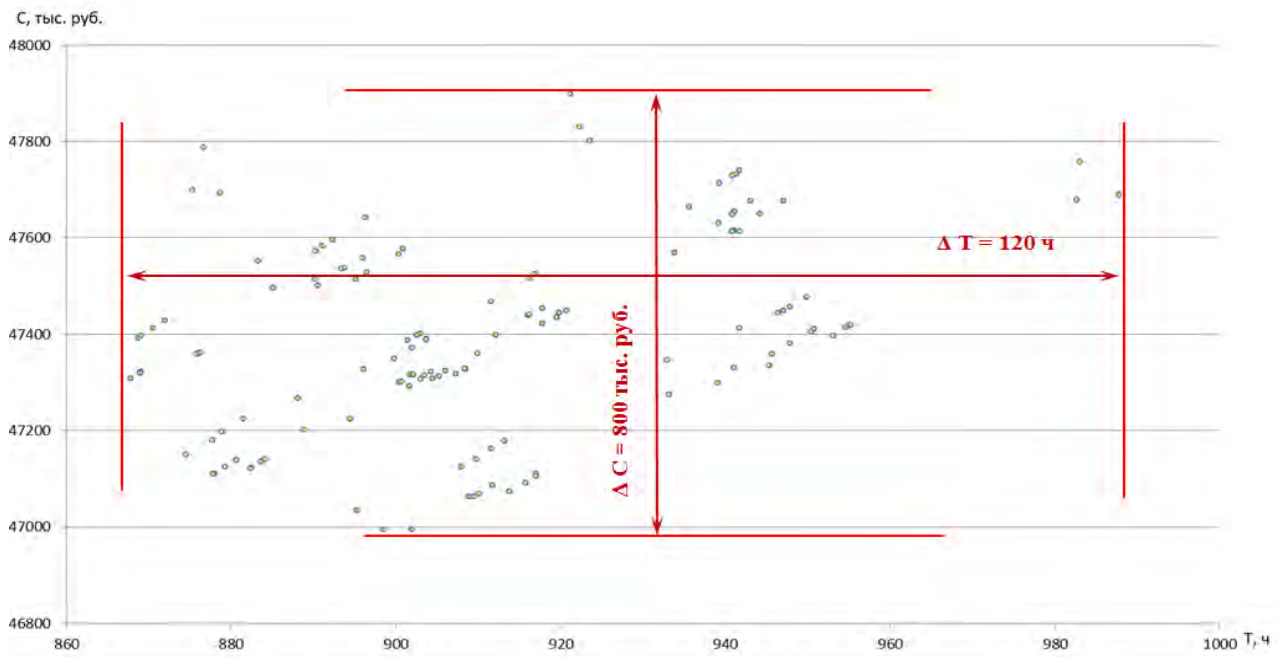


Рисунок 9 – Диапазон варьирования величин исследуемых параметров функционирования технологических комплексов машин по результатам имитационного моделирования

Для поиска оптимального решения был выбран критерий минимума приведенных затрат на единицу выполненной работы, который определяется:

$$З_{\text{ПМ}} = \frac{C_{\text{ЭК}} + C_{\text{Р}}}{W_{\text{ЭП}}} = \frac{(C_{\text{ТО}} + C_{\text{амм.комп}} + C_{\text{зарп}} + C_{\text{ГСМ}} + C_{\text{накл рас}}) + (C_{\text{ЗП}} + C_{\text{В}} + Y_{\text{ПП}})/T_{\text{В}}}{W_{\text{ЭП}}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $З_{\text{ПМ}}$  – приведенные затраты реконструкцию погонного метра закрытой оросительной сети, руб./м.п.;  $C_{\text{ЭК}}$  – затраты на эксплуатацию технологического комплекса, руб./ч.;  $C_{\text{Р}}$  – издержки, связанные с восстановлением машин комплекса, руб./ч.;  $W_{\text{ЭП}}$  – среднечасовая эксплуатационная производительность комплекса, м.п./ч.;  $C_{\text{ТО}}$  – затраты на техническое обслуживание, руб.;  $C_{\text{амм.комп}}$  – амортизационные отчисления на работу комплекса (машины, средства малой механизации), руб.;  $C_{\text{зарп}}$  – заработная плата машинистам, рабочим и ИТР руб.;  $C_{\text{ГСМ}}$  – затраты на топливо и эксплуатационные материалы руб.;  $C_{\text{накл рас}}$  – прочие накладные расходы, руб.;  $C_{\text{ЗП}}$  – средняя стоимость запасных частей машин комплекса, руб.;  $C_{\text{В}}$  – средняя стоимость восстановления машин комплекса, руб.;  $Y_{\text{ПП}}$  – ущерб от потери производительности технологического комплекса в связи с простоем, руб.;  $T_{\text{В}}$  – среднее время восстановления работоспособности, ч.

Оптимальный состав комплекса машин для производства работ по реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети по критерию минимума затрат на реконструкции погонного метра сооружения включает: одноковшовый гусеничный экскаватор ТВЭКС ЕТ-25, бульдозер ЧТЗ Б10М и два экскаватора-погрузчика МТЗ ЭО-2626.01. Затраты на реконструкции одного погонного метра сооружения при этом составит 4469.9 руб./м.п.

В разрабатываемой информационно-экспертной системе критерий оптимальности может изменяться в зависимости от поставленных перед расчетом задач. Для сравнения выбрано четыре различных комплекса, отражающих экстремальные значения параметров. Для оценки эффективности полученных составов комплексов по отношению к базовому [3-1-1-2] (используемому на предприятии) вносится пятый состав комплекса. Расшифровка формулы выбранных комплексов приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Расшифровка марочных составов исследуемых комплексов

| Шифр      | Критерий выбора состава комплекса | Бульдозер             | Экскаватор       | Экскаватор-погрузчик 1 | Экскаватор-погрузчик 2 | Время выполнения работ, Т, ч | Суммарные затраты, $C_{\text{общ}}$ , тыс. руб. |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| [1-1-3-4] | $\sum C_{\text{затр}} = \min$     | ЧТЗ Б10М              | ТВЭКС ЕТ-25      | МТЗ ЭО-2626            | МТЗ ЭО-2626            | 898.6                        | 46994.4                                         |
| [1-2-1-4] | $T_{\text{рас}} = \min$           | ЧТЗ Б10М              | КОВРОВЕЦ ЭО-4228 | БОРЕКС 3106            | МТЗ ЭО-2626            | 867.8                        | 47307.26                                        |
| [3-3-5-6] | $\sum N_i = \min$                 | Уралтрак-ЧТЗ Т-130    | ТВЭКС ЕТ-18 LC   | МТЗ ЭП-491             | МТЗ ЭП-491             | 987.8                        | 47689.74                                        |
| [2-2-1-2] | $\sum N_i = \max$                 | ЧТЗ Уралтрак Б12.6020 | КОВРОВЕЦ ЭО-4228 | БОРЕКС 3106            | БОРЕКС 3106            | 876.6                        | 47786.9                                         |
| [3-1-1-2] | Базовый комплекс                  | Уралтрак-ЧТЗ Т-130    | ТВЭКС ЕТ-25      | БОРЕКС 3106            | БОРЕКС 3106            | 890.2                        | 47513.55                                        |

В пятой главе произведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования, разработана информационно-экспертная система, предложена методика определения рациональных составов машин по компромиссному критерию, сформулированы основные преимущества разработанной информационно-экспертной системы, описаны пути дальнейшего развития информационной системы.

На рисунке 10 приведены результаты моделирования технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети с использованием различных вариантов составов комплексов машин на производственном объекте протяженностью  $L = 10$  км:

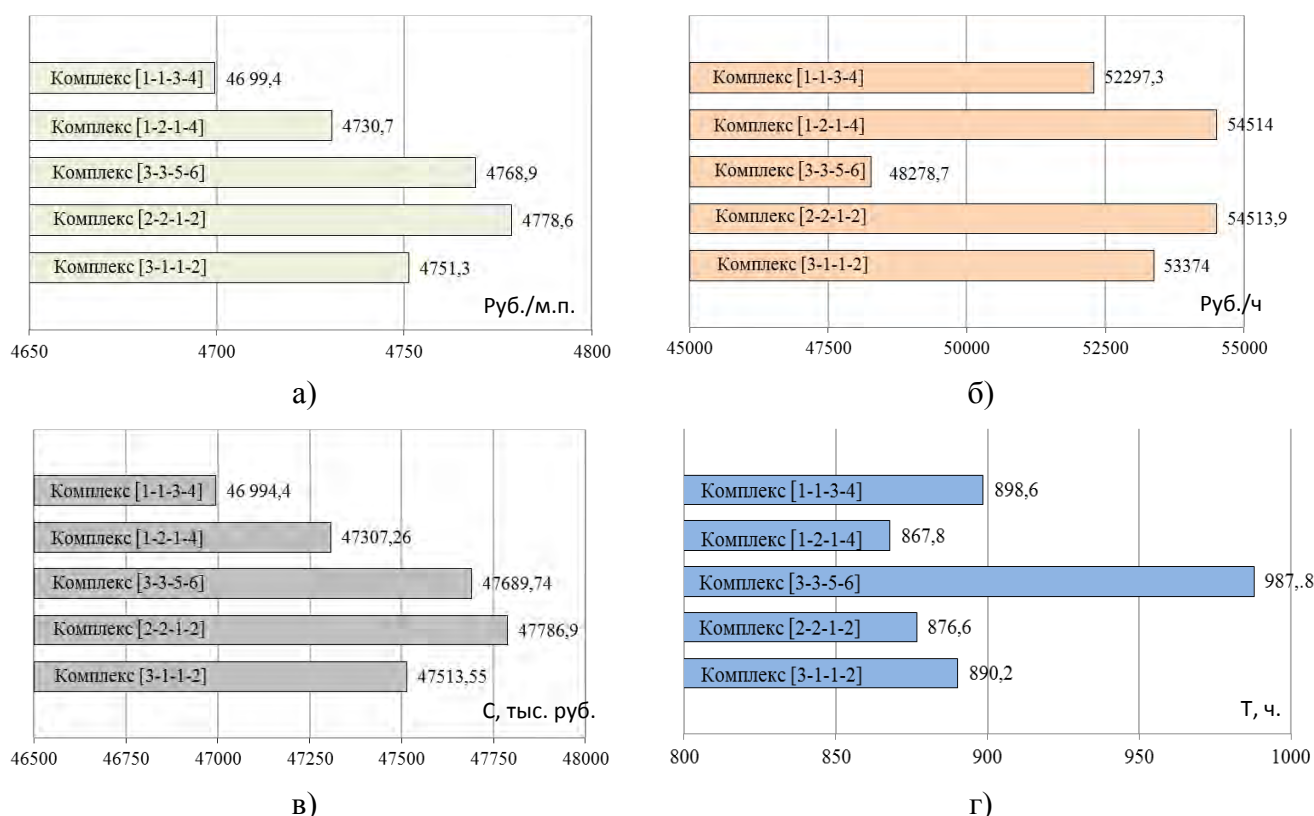


Рисунок 10 – Сравнение результатов моделирования исследуемых технологических комплексов по основным экономическим показателям эффективности использования машин в процессе реконструкции закрытой оросительной сети протяженностью 10 км:

- где а) приведенные затраты на погонный метр выполненной работы, руб./м.п.;  
 б) приведенные затраты на час работы комплекса, руб./ч;  
 в) суммарные затраты на выполнение работ, тыс. руб.;  
 г) общая продолжительность выполнения работ, ч

Исходя из анализируемых данных, экономический эффект от замены используемого в организации комплекса [3-3-1-2] на оптимальный [1-1-3-4] может составить 520 тысяч рублей. При этом средняя продолжительность выполнения работ увеличивается незначительно и может составлять менее 10 часов, т.е. практически соответствует одной рабочей смене.

С точки зрения продолжительности работ (сроков реализации проекта) самый производительный и, соответственно, наиболее согласованный комплекс машин в составе [1-2-1-4] выполняет заданный объем работ за 867.8 ч, что существенно отличается от показателей базового комплекса [3-3-1-2] и составляет приблизительно 23 часа рабочего времени, что соответствует 3 неполным рабочим сменам. Дополнительно к выигрышу по времени, состав [1-2-1-4] выполняет поставленную задачу с меньшими затратами, получая экономию средств в размере 312 тыс. руб.

В целом, в результате сравнительного анализа экономических параметров всей совокупности исследуемых вариантов состава комплекса выявляется существенный разброс возможных суммарных затрат. Так, наиболее существенная разность затрат в процессе выполнения работ различными по составу комплексами может находиться в пределах до 800 тыс. руб., а средняя продолжительность работ может варьироваться в пределах 15 рабочих смен.

На основе полученных результатов исследования подготовлены все необходимые данные для создания и заполнения структуры информационно-экспертной системы.

Функционал информационно-экспертной системы заключается в определении наиболее эффективного сочетания машин в комплексе для заданных условий по выбранному критерию оптимизации. Для получения задания и уточнения всех требуемых условий использованы диалоговые окна. Получив запрос, производится поиск решения из имеющейся базы знаний и предлагается отчет, включающий в себя основные рекомендации. В случае, когда база знаний не содержит ответа, алгоритмически создается задание на его нахождение в имитационную модель и сохранение полученных результатов по выполнению.

Одной из особенностей разработанной информационно-экспертной системы является возможность формирования рекомендаций, основанных на отборе перспективных компромиссных решений, получаемых в процессе анализа наилучших сочетаний комплексов машин для реализации поставленной задачи по двум показателям: затраты на реализацию, поставленной задачи и продолжительность работ.

Для получения компромиссного решения выполняется ранжирование сочетаний составов комплексов машин по каждому из этих параметров от минимального до максимального значения, после чего выполняется суммирование рангов. Зона компромиссных решений определена, в соответствии с принципами Парето-оптимизации (поиск альтернативных решений). Наименьшие суммы рангов формируют область компромиссных решений.

На рисунке 11 и 12 приведены этапы поиска зоны компромиссных решений, а в таблице 4 сформированы рекомендуемые составы комплексов машин для реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети в условиях ЗАО «Агромехсервис».

Оценка полученного результата и принятие решения о выборе состава комплекса для выполнения работ, безусловно, выполняется управляющим персоналом.

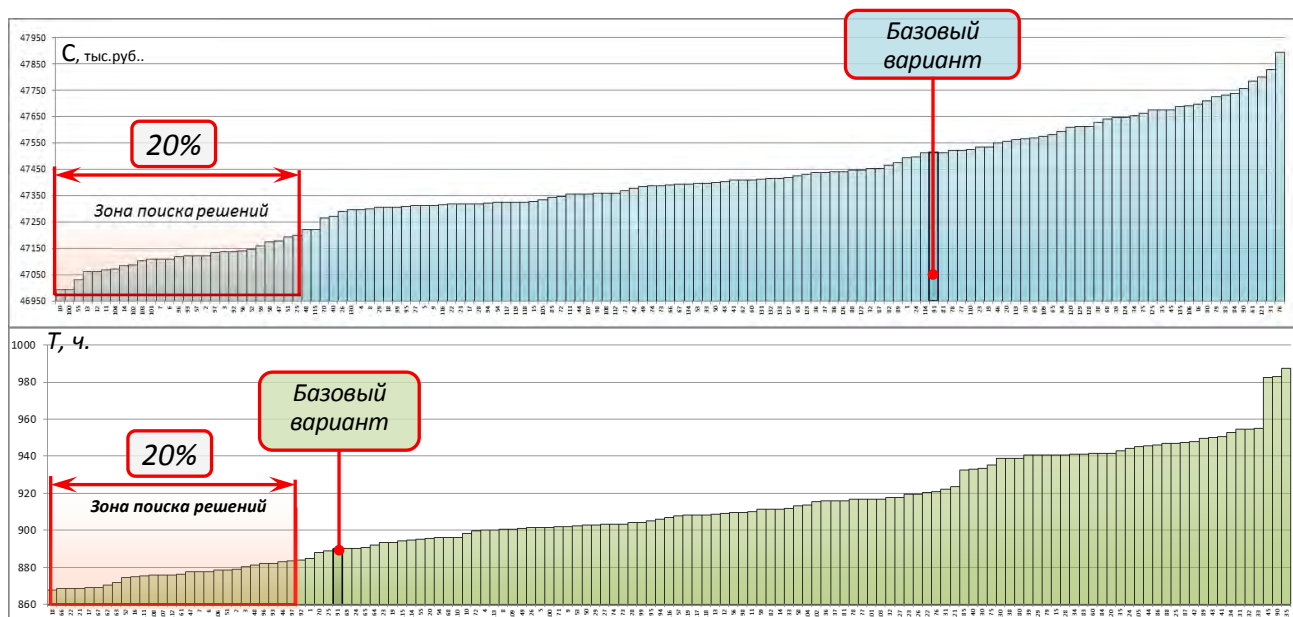


Рисунок 11 – Ранжирование результатов моделирования (135 вариантов состава) технологического комплекса и обозначение области поиска решений по формированию рационального комплекса машин

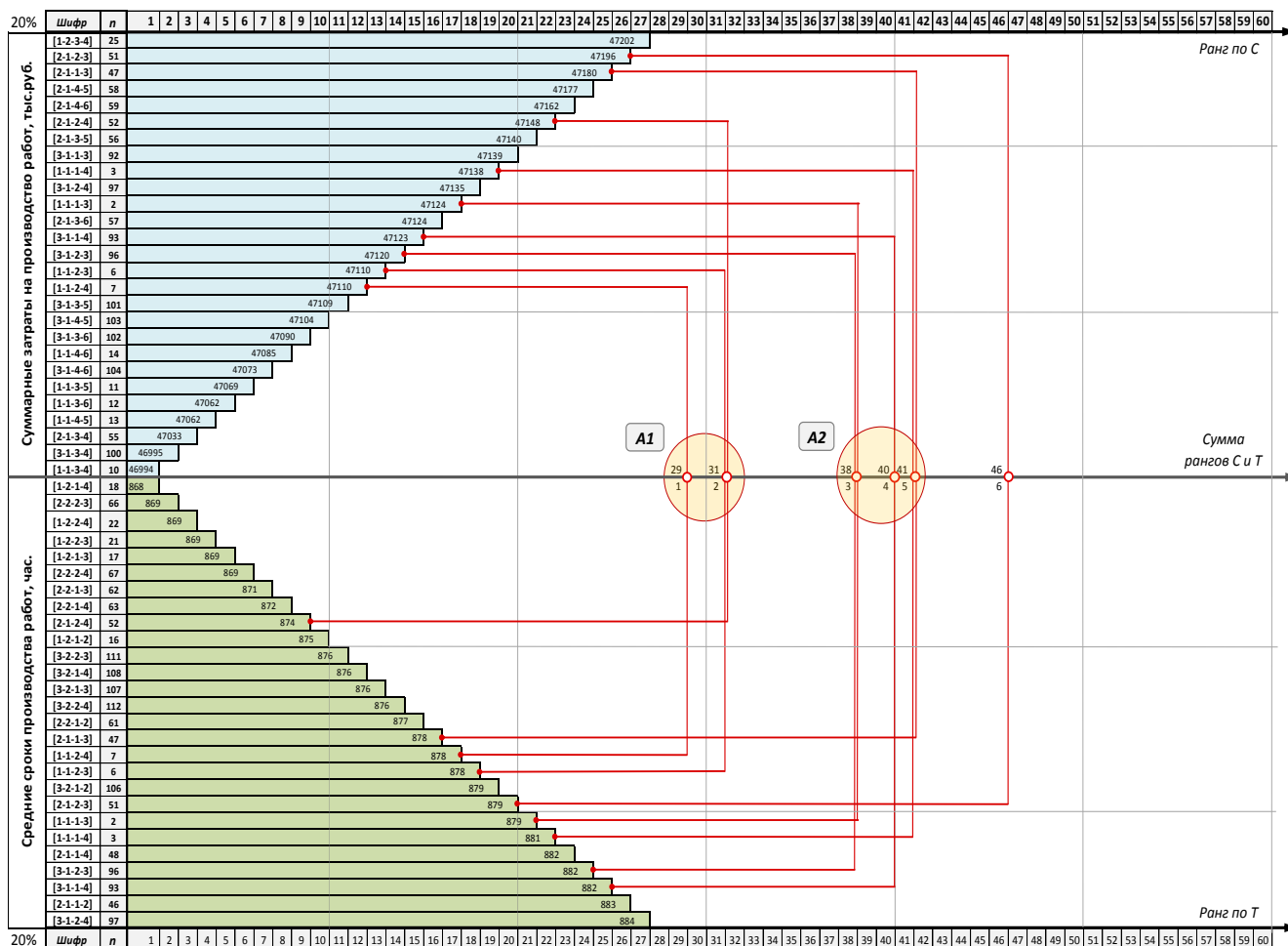


Рисунок 12 – Карта ранжирования вариантов состава технологического комплекса машин и выявление областей поиска компромиссных решений с использованием информационно-экспертной системы

Таблица 4 – Параметры и состав технологических комплексов машин, рекомендованных к использованию на работах по реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети в условиях ЗАО «Агромехсервис»

| Шифр состава | Политика принятия решения | Марочный состав технологического комплекса машин |                  |                        |                        | Средние сроки выполнения работ, Т, ч | Суммарные затраты на выполнение работ, $C_{обш}$ , тыс. руб. |
|--------------|---------------------------|--------------------------------------------------|------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|              |                           | Бульдозер                                        | Экскаватор       | Экскаватор-погрузчик 1 | Экскаватор-погрузчик 2 |                                      |                                                              |
| [1-1-3-4]    | $\sum C_{затр} = \min$    | ЧТЗ Б10М                                         | ТВЭКС ЕТ-25      | МТЗ ЭО-2626            | МТЗ ЭО-2626            | 898.6                                | 46994.4                                                      |
| [1-2-1-4]    | $T_{рас} = \min$          | ЧТЗ Б10М                                         | КОВРОВЕЦ ЭО-4228 | БОРЕКС 3106            | МТЗ ЭО-2626            | 867.8                                | 47307.3                                                      |
| [1-1-2-3]    | А1                        | ЧТЗ Б10М                                         | ТВЭКС ЕТ-25      | БОРЕКС 3106            | МТЗ ЭО-2626            | 878                                  | 47110.7                                                      |
| [1-1-2-4]    |                           |                                                  |                  |                        |                        | 877.8                                | 47110.5                                                      |
| [2-1-2-4]    |                           | ЧТЗ Б12.6020                                     |                  |                        |                        | 874.5                                | 47148.9                                                      |
| [1-1-1-3]    | А2                        | ЧТЗ Б10М                                         | ТВЭКС ЕТ-25      | БОРЕКС 3106            | МТЗ ЭО-2626            | 879.2                                | 47124.8                                                      |
| [1-1-1-4]    |                           |                                                  |                  |                        |                        | 880.6                                | 47138.6                                                      |
| [2-1-1-3]    |                           | ЧТЗ Б12.6020                                     |                  |                        |                        | 877.7                                | 47180.3                                                      |
| [3-1-1-4]    |                           |                                                  |                  |                        |                        | 882.4                                | 47123.3                                                      |
| [3-1-2-3]    |                           | ЧТЗ Т-130                                        |                  |                        |                        | 882.5                                | 47121.0                                                      |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих подходов и методик в сфере повышения эффективности эксплуатации парка машин в АПК, определены основные группы факторов, оказывающих влияние на продолжительность выполнения технологических процессов, среди которых следует выделить: 1 – качество машин; 2 – квалификация механизаторских и управленческих кадров; 3 – технология выполнения работ; 4 – погодные и климатические условия. Выявлено, что на стабильное и согласованное функционирование технологически увязанной группы машин может в значительной степени оказывать влияние вероятностный характер процессов и событий, тем самым значительно снижая эффективность современных методик планирования производства работ.

2. Исследованы особенности технологического процесса производства работ на линейно-протяженных сооружениях гидромелиоративного назначения. На объектах подобного типа применяется поточный метод ведения работ с разбиением протяженного участка сооружения на технологические захватки, количество которых зависит от сложности сооружения, технологии ведения работ и мощности средств механизации. Исследован технологический процесс реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети, определены основные параметры сооружения: диаметр трубопровода (ПНД) – 315 мм, глубина заложения – 1.8 м, высота выравнивающего слоя – 0.2 м, коэффициент заложения откосов траншеи – 0.75, рекомендуемая длина трубной плети – 120 м.

3. Сформирован марочный состав технологических машин, участвующих в формировании технологических комплексов, определены их основные эксплуатационно-технологические параметры:

бульдозеры ЧТЗ Б10 М (средняя эксплуатационная производительность  $W_3 = 69,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), ЧТЗ Б12.6020 ( $W_3 = 70,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), Уралтрак-ЧТЗ Т-130 ( $W_3 = 53,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ); экскаваторы ТВЭКС ЕТ-25 ( $W_3 = 109,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), ТВЭКС ЕТ-18 LC ( $W_3 = 87,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), Ковровец ЭО-4228 ( $W_3 = 129,9 \text{ м}^3/\text{ч}$ ); экскаваторы-погрузчики МТЗ ЭО-2626 ( $W_3 = 63,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), МТЗ ЭП-491 ( $W_3 = 40,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), БОРЭКС 3106 ( $W_3 = 78,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

4. Разработана функциональная схема технологического процесса с использованием нотации графического моделирования IDEF 0, создан алгоритм имитационной модели с применением современных методов описания процессов на основе мультиагентных технологий. Произведен сравнительный анализ современных средств имитационного моделирования, по результатам которого выбрана инструментальная среда моделирования AnyLogic. Разработана структура имитационной модели исследуемой технологической системы, предложена схема настройки модели, выполнена проверка адекватности модели данным статистических наблюдений. Относительная ошибка моделирования не превысила 12%.

5. Разработана план-матрица организации серии компьютерных экспериментов, которая выражалась в проведении имитационного моделирования 135 уникальных вариантов состава технологических комплексов машин. Установлены допустимые значения доверительной вероятности ( $Q = 90$ ) и точности ( $\varepsilon = 0,05$ ) моделирования по методу Монте-Карло.

Определено, что для получения экспериментальных данных с заданными требованиями необходимо осуществить не менее 300 итераций имитационной модели технологической системы. Общая продолжительность компьютерного эксперимента составила 5,6 часа процессорного времени, а с учетом временных потерь на обслуживание эксперимента – свыше 12 часов.

Предложена схема автоматизации проведения серий компьютерных экспериментов, реализована система паспортизации элементов моделируемой технологической системы для осуществления автоматического режима управления потоками данных, обработки и сохранения результатов моделирования.

6. Определен наиболее эффективный состав технологического комплекса машин для выполнения работ по реконструкции трубопровода закрытой оросительной сети в соответствии с критерием оптимальности (минимум приведенных затрат на погонный метр сооружения). Состав комплекса включает: одноковшовый гусеничный экскаватор ТВЭКС ЕТ-25, бульдозер ЧТЗ Б10М и два экскаватора-погрузчика МТЗ ЭО-2626.01.

Установлено, что для рассмотренной технологии и условий проведения работ величина совокупной эксплуатационной мощности машин технологического комплекса не имеет признаков явно выраженного влияния на среднюю эксплуатационную производительность всего комплекса, что подтверждает предположение о низкой эффективности применения различного рода обобщенных нормативных рекомендаций по составлению эффективных технологических комплексов, в том числе из доступной номенклатуры машин парка.

7. Произведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования функционирования технологического комплекса. Определено, что максимальное различие в результатах, полученных при сравнении моделируемых вариантов комплексов машин по суммарной стоимости проведения работ на участке,

протяженностью 10 км составит порядка 800 тыс. рублей, а по продолжительности – 120 часов, что соответствует 15 рабочим сменам.

Произведен сравнительный анализ полученных результатов моделирования технологического комплекса с результатами базового комплекса, используемого на предприятии. Максимально возможный экономический эффект от реализации предлагаемых решений составляет 520 тыс. руб., максимальное сокращение продолжительности работ составляет около 3 рабочих смен.

8. Разработан программный комплекс информационно-экспертной системы «АгроМАС» под ОС MS Windows®. Функционал предложенной системы содержит основные результаты научного исследования: модуль функционального моделирования, модуль системы паспортизации, модуль прогнозирования технического состояния технологических машин и оборудования. С целью облегчения работы с экспертной системой «АгроМАС», большинство необходимых действий, применяемых в процессе исследования технологической системы предприятия, имеют высокую степени автоматизации. Составлено руководство пользователя, разработаны рекомендации по внедрению информационно-экспертной системы «АгроМАС» на производстве. Дополнительно к решению минимаксной задачи, программный комплекс предлагает наиболее рациональные составы технологических комплексов путем ранжирования и оценки результатов моделирования.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**  
**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

**1. Горностаев, В.И.** Функциональное моделирование технологических систем в задачах оценки эффективности механизированных процессов в природообустройстве / А.И. Новиченко, В.А. Евграфов, В.И. Горностаев и др. // Научное обозрение.– 2016.– №24.– С.85-90.

**2. Горностаев, В.И.** Применение мультиагентного подхода при формировании оптимального состава парка машин в среде имитационного моделирования AnyLogic / А.И. Новиченко, В.А. Евграфов, В.И. Горностаев и др. // Научное обозрение.– 2015.– №24.– С.123-127.

**3. Горностаев, В.И.** Определение показателей надежности технологических систем в сфере механизации сельского хозяйства / А.И. Новиченко, В.А. Евграфов, В.И. Горностаев и др. // Успехи современной науки.– 2016.– №12, Том.8.– С.163-165.

**4. Горностаев, В.И.** Повышение эффективности использования средств механизации в сельском хозяйстве с помощью технологий имитационного моделирования / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.И. Горностаев // Инновации и инвестиции.– 2014.– №12.– С.184-186.

**5. Горностаев, В.И.** Применение методов имитационного моделирования при оптимизации состава технологических комплексов в природообустройстве / В.А. Евграфов, А.И. Новиченко, В.И. Горностаев и др. // Образование. Наука. Научные кадры.– 2013.– №3.– С.136-141.

**6. Горностаев, В.И.** Применение методов имитационного моделирования в механизации мелиоративного строительства / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.И. Горностаев и др. // Природообустройство.– 2013.– №3.– С.81-85.

**Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:**

**7. Закрытые Оросительные Сети «Яхрома–1.0.» (ЗОС Яхрома-1.0):** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2013617532 / И.М. Подхвятилин, А.И. Новиченко, В.А. Евграфов, **В.И. Горностаев**; опубликовано 20.09.2013.

**8. АгроМАС: «Мелиоводострой»:** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU №2016613653 / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.А. Евграфов, А.В. Анисимов, **В.И. Горностаев**; опубликовано 20.04.2016.

9. АгроМАС: «Реконструкция закрытой оросительной сети»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU №2016618434 / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.А. Евграфов, А.В. Анисимов, **В.И. Горностаев**; опубл. 20.08.2016.
10. АгроМАС: «Паспортизация средств механизации»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU №2016619144 / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.А. Евграфов, А.В. Анисимов, **В.И. Горностаев**; опубл. 20.09.2016.
11. АгроМАС: «Паспортизация технологических процессов»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU №2016619467 / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.А. Евграфов, А.В. Анисимов, **В.И. Горностаев**; опубл. 20.09.2016.
12. АгроМАС: «АгроТехЭксперт – автоматизированная система сбора, обработки и хранения статистической и экспертной информации»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU №2016660824 / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.А. Евграфов, А.В. Анисимов, **В.И. Горностаев**; опубликовано 20.10.2016.
13. АгроМАС: «Паспортизация производственно-технической базы предприятия»: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU №2016660825 / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.А. Евграфов, А.В. Анисимов, **В.И. Горностаев**; опубл. 20.10.2016.
14. АгроМАС: «Модуль функционального моделирования технологических систем»: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU №2017613875 / А.И. Новиченко, Подхвятилин И.М., В.А. Евграфов, Анисимов А.В., **Горностаев В.И.**; опубл. 03.04.2017.
15. АгроМАС: «Модуль прогнозирования технического состояния технологических машин и оборудования»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU №2017614030 / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.А. Евграфов, А.В. Анисимов, **В.И. Горностаев**; опубликовано: 05.04.2017.

#### *Публикации в научных журналах и сборниках:*

16. **Горностаев, В.И.** Исследование сложных организационно-технологических систем в АПК методом статистических испытаний с применением распределенных вычислений / А.В. Анисимов, А.И. Новиченко, В.И. Горностаев // Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 100-летию И.С. Шатилова, г. Москва, 6-7 июня 2017 г.: Сб. статей.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2017.– С. 318-319.
17. **Горностаев, В.И.** Оценка влияния возрастной структуры парка машин на эффективность его эксплуатации / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.И. Горностаев // Материалы Междунар. научн. конф. молодых учёных и специалистов, посвящ. 100-летию И.С. Шатилова, г. Москва, 6-7 июня 2017 г.: Сб. статей.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2017.– С. 336-338.
18. **Горностаев, В.И.** Моделирование элементов технологических систем в природообустройстве с учётом показателей надёжности / В.А. Евграфов, В.И. Горностаев // Междунар. науч. конф. молодых учёных и специалистов «Наука молодых – агропромышленному комплексу», г. Москва 1-3 июня 2016 г.: Сб. ст.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016.– С.203-205.
19. **Горностаев, В.И.** Обзор методологии оптимизации технологических систем в сельском хозяйстве / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов «Наука молодых – агропромышленному комплексу», г. Москва 1-3 июня 2016г.: Сб. статей.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016.– С. 205-206.
20. **Горностаев, В.И.** Определение требуемой точности компьютерного эксперимента при моделировании поведения технологических систем в АПК / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев // Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 100-летию И.С. Шатилова, г. Москва, 6-7 июня 2017 г.:Сборник статей.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2017.– С. 322-323.
21. **Горностаев, В.И.** Применение технологий искусственного интеллекта в задачах имитационного моделирования человеко-машинных систем / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев // Роль молодых ученых в обеспечении продовольственной и экологической безопасности: Сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2014.– С. 41-46.
22. **Горностаев, В.И.** Разработка информационно-экспертной системы оценки качества эксплуатации средств технологического оснащения производственных организаций АПК / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев, А.В. Анисимов // Международная научн. конф. молодых

учёных и специалистов, посвящённая 150-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, 2-3 июня 2015 г.: Сб. статей.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015.– С. 301-302.

**23. Горностаев, В.И.** Информационное обеспечение транспортного процесса в организациях агропромышленного комплекса / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы международной науч.-технической конференции. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2015.– С.239-242.

**24. Горностаев, В.И.** Оценка эксплуатационно-технологических свойств машин и их паспортизация в системе информационного обеспечения производственных процессов / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев // Доклады ТСХА: Сб. статей. Вып. 287. Том 2. Часть 1.– М.: Грин Эра 2: ООО «Сам полиграфист», 2015.– С.192-195.

**25. Горностаев, В.И.** Синтез потока отказов элементов технических систем в задачах имитационного моделирования технологических процессов [Электронный ресурс] / А.И. Новиченко, И.М. Подхвятилин, В.И. Горностаев, А.В. Анисимов // Журнал Международного Научного Института «Educatio».– 2016.– №2 (20).– С.33-36. URL: <http://edu-science.ru/category/zhurnaly/> (Дата обращения: 25.11.2017).

**26. Горностаев, В.И.** Решение задач оптимизации парка машин и технологического оснащения АПК с применением технологий мультиагентного подхода / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев // Сб. трудов ТСХА. Вып. 288.– М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016.– С. 281-285.

**27. Горностаев, В.И.** Современные подходы в моделировании технических систем на примере эксплуатирующего предприятия АПК / А.И. Новиченко, В.И. Горностаев, А.В. Анисимов // Развитие науки в XXI веке.– 2015.– №12-1.– С.121-124.

**28. Горностаев, В.И.** Формирование технологического комплекса машин в мелиоративном строительстве с помощью имитационного моделирования / А.И. Новиченко, В.А. Евграфов, В.И. Горностаев и др. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики / Естественные и технические науки.– 2013.– №3-4.– С.44-50.

**29. Gornostaev V.I.** Application of methods of imitating modeling at the solution of optimizing tasks in the mechanization of the meliorative construction / V.I. Gornostaev // International scientific conference of young scientists and specialists: scientific journal.– Moscow, publishing Russian state agrarian University Moscow agricultural Academy, 2015.– P.345-348.