

На правах рукописи



РАДАЕВ Антон Евгеньевич

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПАРКА ПОДЪЕМНО-
ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СКЛАДСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.05.04 –
Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: **Пилипчук Сергей Федорович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Маликов Олег Борисович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Шведов Василий Елисеевич
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «21» апреля 2015 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.24 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» <http://www.spbstu.ru/science/defences/details-0631.html>.

Автореферат разослан «19» марта 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.24,
кандидат технических наук, доцент



Бортяков
Данил Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертационного исследования. В современных условиях развития отечественных промышленных, транспортных и торговых предприятий особую важность приобретают проблемы обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования, работа которого напрямую определяет пропускную способность соответствующих подразделений и, как следствие, надежность функционирования предприятия и устойчивость его развития на перспективу. Указанные проблемы обусловлены как наличием огромного количества разновидностей подъемно-транспортных машин с широкими диапазонами значений технических характеристик (как следствие интенсивного развития рынка подъемно-транспортной техники в процессе глобализации мировой экономики), так и ограниченными финансовыми возможностями предприятий в части организационного проектирования и организации функционирования соответствующих подразделений.

При решении задач обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования в рамках промышленных, транспортных и торговых организаций мировая и отечественная практика проектирования и эксплуатации предприятий предполагает реализацию различного рода аналитических и оптимизационных моделей и все больше ориентируется на использование имитационного моделирования как средства, обеспечивающего получение точных прогнозных данных в области функционирования подъемно-транспортного оборудования, а на их основе – адекватный выбор марок, моделей и количества техники. Однако результаты анализа зарубежных и отечественных научных работ по соответствующей тематике свидетельствуют об ограниченности или отсутствии конкретных методических разработок в области обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования, пригодных для практического использования на современных предприятиях промышленности, торговли и транспорта.

Таким образом, острота проблемы для отечественных промышленных, транспортных и торговых предприятий, а также недостаточная степень ее научной разработанности позволяют сделать вывод об актуальности выбранной темы диссертационного исследования.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методики формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов.

Для достижения указанной цели в рамках работы были сформулированы следующие задачи:

- выполнить анализ подходов к решению задач формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складских систем тарно-штучных грузов;
- разработать концепцию обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов;
- разработать математические модели обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов с использованием средств оптимизационного и имитационного моделирования;

- разработать и реализовать на практическом примере методику формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов.

Объектом исследования является парк подъемно-транспортного оборудования, обеспечивающий функционирование складской системы тарно-штучных грузов.

Предметом исследования является оптимизация парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов в части характеристик и количества единиц техники.

Теоретической и методологической основой диссертационного исследования послужили работы отечественных и зарубежных авторов, нормативно-правовые акты и методические материалы в области формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складских систем тарно-штучных грузов. Решение поставленных задач осуществлялось с применением системного анализа, экономико-математического и дискретно-событийного имитационного моделирования, методов статистической обработки информации, программных продуктов «AnyLogic», «Mathcad», «Microsoft Excel».

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Концепция обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования (в том числе классификация задач, структура парка оборудования как элемента складской системы, процедура его формирования).
2. Математические модели обоснования характеристик парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов:
 - модель оптимизации характеристик технологической группы подъемно-транспортного оборудования, базирующаяся на многофакторной модели зависимости первоначальной стоимости единицы подъемно-транспортного оборудования от его технических характеристик;
 - укрупненная модель оптимизации состава технологических групп подъемно-транспортного оборудования без учета формирования очередей грузовых единиц;
 - уточненная модель оптимизации состава технологических групп подъемно-транспортного оборудования с учетом формирования очередей грузовых единиц;
 - имитационная модель функционирования парка подъемно-транспортного оборудования в рамках складской системы тарно-штучных грузов.
3. Методика формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов.

Научная новизна результатов исследования заключается в том, что:

- разработанная концепция обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов предполагает системное представление объекта исследования с выделением классов, технологических групп и экземпляров оборудования;
- разработанные математические модели обоснования характеристик парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных

грузов обеспечивают учет стоимостных показателей и характеристик производительности оборудования при реализации процессов приемки и отправки грузов со склада;

- разработанная методика формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов предполагает выбор оптимального варианта структуры технологических групп оборудования на базе результатов оптимизации состава каждой из них по критерию минимизации затрат или максимизации производительности техники.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии методов моделирования комплектов и систем машин в части прогнозирования характеристик соответствующих технологических процессов, реализуемых в рамках складских систем тарно-штучных грузов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования представленных в диссертации методических разработок в деятельности промышленных, транспортных и торговых предприятий, позволяя повысить эффективность функционирования парка подъемно-транспортного оборудования в рамках соответствующих складских комплексов.

Результаты диссертационного исследования нашли практическое применение на предприятиях Санкт-Петербурга ООО «Морстройтехнология» и ООО «Палфингер Кран Рус», что подтверждается соответствующими актами о внедрении и использовании.

Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете при подготовке инженеров по направлению «Наземные транспортно-технологические средства», бакалавров и магистров по направлению «Наземные транспортно-технологические комплексы» в курсах «Автоматизированные транспортные системы», «Логистика предприятия», «Логистика снабжения и сбыта».

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается современными апробированными программными средствами для разработки математических моделей, адекватностью результатов реализации моделей, использованием современных информационных технологий.

Апробация работы

Основные положения диссертации и результаты исследований были представлены автором и получили одобрение на международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях и семинарах в 2009-2014 гг.

Автор является победителем конкурса грантов для студентов и аспирантов Санкт-Петербурга по теме «Способы повышения эффективности работы складов штучных грузов» (2010 г.), конкурса молодых ученых Санкт-Петербургского государственного политехнического университета на звание «Молодой ученый года» (2011 г.), конкурсных отборов на предоставление субсидий молодым ученым, молодым кандидатам наук вузов Санкт-Петербурга по темам «Методы управления высокотехнологичным производством промышленных предприятий на основе имитационного моделирования» (2011 г.) и «Разработка научно-методического обеспечения для управления высокотехнологичным производством предприятия

(на примере промышленных предприятий Санкт-Петербурга)» (2012 г.), конкурса научных работ молодых ученых имени Новожилова В.В. (2012 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ общим объемом 13,4 п.л. (в том числе авторских 9,33 п.л.), из них 3 работы в рецензируемых изданиях.

Структура работы

Диссертационное исследование состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Общий объем работы 284 страницы (из них 186 страниц основного текста), включая 49 таблиц, 58 рисунков, список литературы из 155 наименований, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описаны объект и предмет, методологическая база исследования, обоснована его научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе «Разработка концепции обоснования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов»** диссертации приведены результаты обзора и сравнительного анализа существующих подходов к обоснованию характеристик технологического оборудования и определения оптимального его количества, а также описание разработанной концепции обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования (ПТО) складской системы тарно-штучных грузов.

Проблемы обоснования структуры парка ПТО складских систем тарно-штучных грузов рассматривались в работах Д. Д. Бауэрсокса, А. М. Гаджинского, В. В. Дыбской, В. М. Макарова, О. Б. Маликова, В. С. Мамаева, И. И. Мачульского, Н. И. Казакова, А. А. Смехова. Соответствующие разработки предполагают независимую реализацию процедур выбора типа оборудования и обоснования требуемого его количества, которая, в свою очередь, определяет трудность установления взаимосвязи между производительностью парка ПТО, техническими характеристиками и количеством машин. Данное обстоятельство определило целесообразность дополнительного обзора и анализа трудов, посвященных аналогичным вопросам в области строительной (в том числе строительно-дорожной) и сельскохозяйственной техники – работ Ф. К. Абдразакова, В. И. Баловнева, Л. В. Зотовой, В. Н. Иванова, И. С. Корягина, А. В. Мясникова, С. В. Прохорова, В. Б. Пермякова, Р. Ш. Хабатова и др. В соответствующих работах приводится описание математических моделей линейной и дробно-линейной оптимизации, реализация которых обеспечивает комплексное обоснование как количества, так и основных характеристик техники в составе парка. Тем не менее, вышеописанные научные разработки в общем случае не могут быть использованы для решения задачи обоснования структуры парка ПТО ввиду наличия существенных различий в особенностях организационного проектирования и организации функционирования строительной-дорожной и сельскохозяйственной техники с одной стороны – и подъемно-транспортных машин с другой. Таким образом, по результатам обзора и анали-

за литературных источников, соответствующих тематике исследования, был сделан вывод о недостаточной степени проработанности вопросов обоснования характеристик и количества подъемно-транспортной техники в рамках складских систем тарно-штучных грузов.

Вышеуказанные результаты, полученные на начальных этапах исследования, явились основой для разработки концепции обоснования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов, в рамках которой:

- уточнены основные понятия, относящиеся к исследуемой области (в том числе «складская система тарно-штучных грузов», «проектно-технологическое решение складской системы тарно-штучных грузов», «парк ПТО», «пропускная способность складской системы тарно-штучных грузов», «производительность ПТО»).
- предложена обобщенная структура парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов, включающая в себя следующие структурные элементы:
 - классы ПТО – разновидности оборудования, каждая из которых определяется составом механизмов передвижения, поворота, подъема и выдвижения грузозахватного устройства (ГЗУ), отличительными особенностями конструкций механизмов, а также совокупностью технических характеристик (в том числе грузоподъемности, рабочих скоростей механизмов, пространственно-габаритных характеристик, параметров маневренности, проходимости и т.д.), варьируемых в установленных диапазонах;
 - технологические группы ПТО – совокупности единиц подъемно-транспортной техники (определяемых одной или несколькими моделями, выпускаемыми единственным или несколькими производителями), соответствующих единому классу оборудования и выполняющих один или несколько технологических циклов, реализуемых над отдельными грузовыми единицами (ГЕ) в определенных технологических зонах и по определенным маршрутам;
 - экземпляры ПТО – подразновидности оборудования, каждая из которых соответствует конкретной технологической группе техники (и, как следствие, определенному классу подъемно-транспортных машин), описывается производителем, моделью ПТО и фиксированными значениями соответствующих стоимостных и технических характеристик.

подробное описание основных характеристик вышеперечисленных структурных элементов парка ПТО с указанием их взаимосвязей с элементами объемно-планировочного решения и технологического процесса, реализуемого в рамках складской системы тарно-штучных грузов, представлено на рисунке 1; пример структуры парка ПТО иллюстрируется рисунком 2.
- предложена классификация задач обоснования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов, предполагающая выделение различных групп задач в разрезе следующих основных признаков:
 - стадия жизненного цикла складской системы (организационное проектирование или организация функционирования);

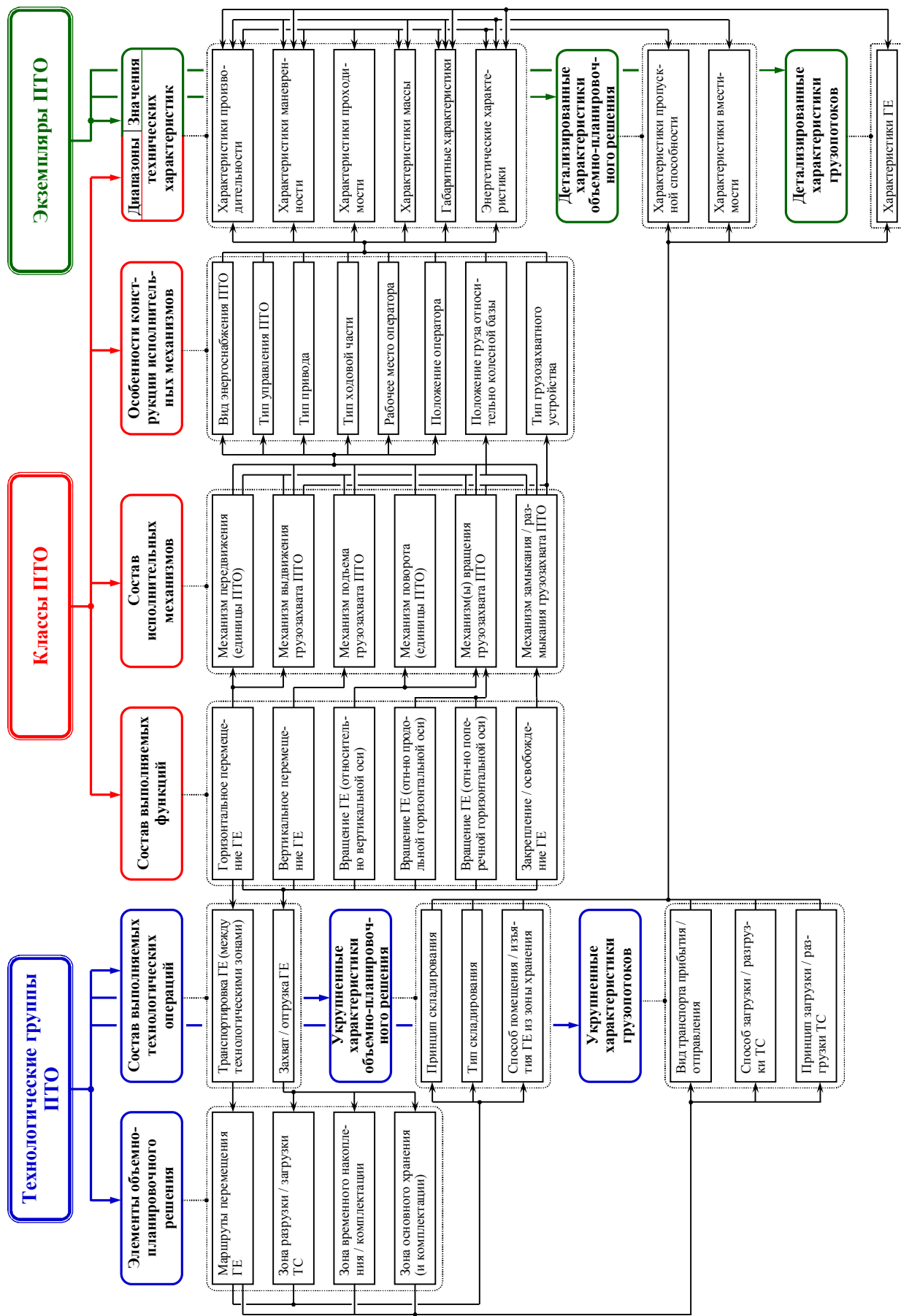


Рисунок 1 – Основные характеристики структурных уровней парка ПТО (в рамках складской системы тарно-штучных грузов) и их взаимосвязи

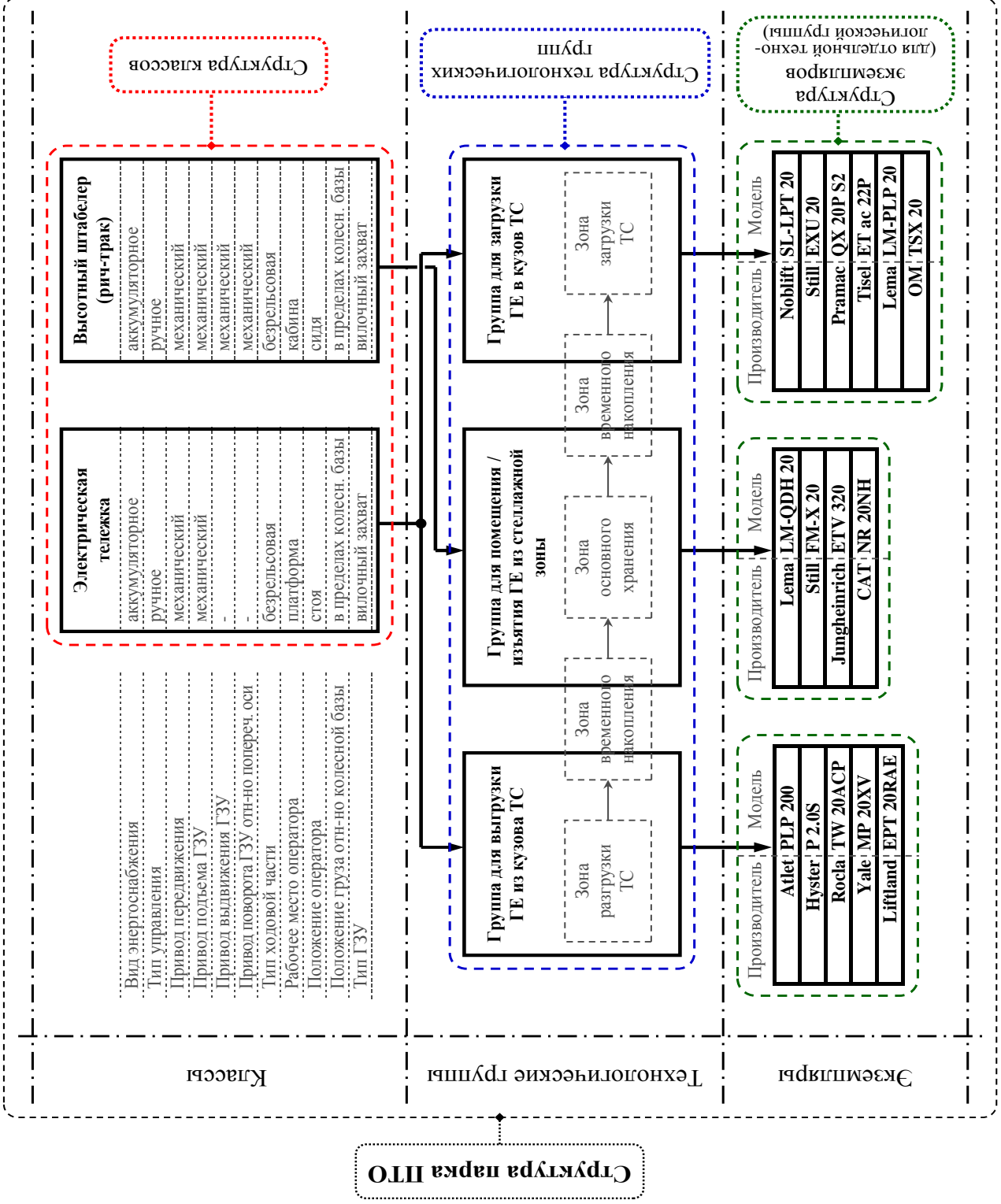


Рисунок 2 – Пример структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов

- критерий обоснования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов (минимизация затрат на ПТО при ограничении по производительности оборудования или максимизация производительности подъемно-транспортных машин при ограничении по затратам на технику);
- способ обеспечения складской системы подъемно-транспортными машинами (приобретение нового / поддержанного ПТО или аренда / лизинг оборудования);
- разработана процедура решения задач обоснования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов, включающая в себя следующие основные этапы:
 - формирование для каждого варианта проектно-технологического решения склада альтернативных вариантов структуры технологических групп оборудования – вариантов закрепления альтернативных классов ПТО за сформированными технологическими группами;
 - оптимизация состава всех технологических групп ПТО в рамках складской системы отдельно для каждого альтернативного варианта структуры указанных групп в составе каждого альтернативного варианта проектно-технологического решения склада по критерию минимизации затрат на ПТО или максимизации его производительности с использованием средств оптимизационного и имитационного моделирования;
 - выбор из альтернативных вариантов структуры технологических групп оборудования наиболее предпочтительного либо по минимальным затратам на ПТО, либо по максимальной пропускной способности склада для каждого варианта проектно-технологического решения склада;
 - определение наиболее предпочтительного варианта проектно-технологического решения склада с использованием критериев капитальных и текущих затрат на ПТО, пропускной способности складской системы при приемке и отправке ГЕ, а также капитальных и текущих затрат на функционирование складской системы.

При этом исходные данные, обеспечивающие реализацию вышеописанной процедуры, в общем случае включают в себя:

- характеристики сопряженности технологических операций и их параметры (протяженность маршрутов, требуемая высота подъема / опускания ГЕ и т.д.) для различных вариантов проектно-технологического решения склада;
- стоимостные и технические характеристики исходно рассматриваемых экземпляров ПТО в разрезе соответствующих им классов техники;
- ограничения по наиболее важным (для реализации процесса грузопереработки) техническим характеристикам ПТО для каждого типа технологических операций и класса техники;
- характеристики грузопотоков (объемы транспортных партий прибытия и убытия для различных видов грузов, интервалы времени между поступлениями партий в обработку и т.п.)
- капитальные и текущие затраты, обеспечивающие функционирование склада при различных вариантах проектно-технологического решения.

Во второй главе «Разработка оптимизационной модели обоснования характеристик технологической группы подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов» рассмотрены вопросы оценки взаимозависимости между техническими характеристиками, затратами на приобретение (содержание) и производительностью единицы ПТО как наиболее важными расчетными параметрами с позиций обоснования структуры парка оборудования складской системы тарно-штучных грузов.

Если зависимость производительности единицы ПТО от ее технических характеристик описывается существующими аналитическими моделями, включающими в себя также характеристики технологических циклов, реализуемых оборудованием, то взаимосвязь между стоимостными и техническими характеристиками единицы техники требует дополнительного обоснования ввиду ограниченности соответствующих научных разработок.

В рамках исследования для описания зависимости между первоначальной стоимостью единицы ПТО, принадлежащей определенному классу машин, и ее техническими характеристиками было предложено использовать многофакторные модели, общая информация о которых приведена в таблице 1.

Для оценки адекватности структуры предложенных моделей в рамках исследования для нескольких классов ПТО – электрической тележки с платформой для оператора (в положении стоя), высотного штабелера (рич-трака) и электрического погрузчика – был произведен расчет параметров моделей – коэффициентов пропорциональности a_i – по методу наименьших квадратов с последующей оценкой точности прогнозирования (скорректированного коэффициента детерминации R_{adj}^2) моделей на базе данных о конкретных экземплярах ПТО – моделях оборудования марок «Atlet», «Clark», «Hyster», «Jungheinrich», «Lema», «Mitsubishi», «Toyota», «Rocla», «Still», «Xilin», «Yale» и др., реализуемых на территории Российской Федерации в 2013–2014 гг., – в части первоначальной стоимости y (руб.) и определяющих ее технических характеристик x_i в расчете на единицу техники. При этом в качестве последних рассматривались грузоподъемность (кг), скорость передвижения единицы ПТО с грузом (км/ч), высота подъема ГЗУ (мм), скорость подъема ГЗУ с грузом (м/с), радиус поворота (мм), емкость (А·ч) и напряжение (В) аккумуляторной батареи (АКБ). В качестве источников соответствующей информации использовались бумажные и электронные каталоги ПТО, предоставленные соответствующими торговыми организациями, а также техническая документация на технику (в том числе размещенная на официальных сайтах) от компаний-производителей. Полученные по результатам расчета значения коэффициента детерминации R_{adj}^2 для подавляющего большинства вариантов моделей в рамках каждого из рассматриваемых классов ПТО превышают значение 0.85, что свидетельствует о высокой степени соответствия сформированных зависимостей фактическим данным и, как следствие, о применимости предложенных многофакторных моделей для описания взаимосвязи между техническими характеристиками и первоначальной стоимостью единицы оборудования. Графическая интерпретация результатов расчета, полученных для одного из вышеуказанных классов ПТО, – проранжированных по возрастанию фактических (исходно известных), а

также соответствующих прогнозных (полученных на базе значений технических характеристик и параметров многофакторных моделей, описанных в таблице 1) значений первоначальной стоимости единиц техники для различных экземпляров ПТО – представлена на рисунке 3.

Таблица 1 – Многофакторные модели зависимости первоначальной стоимости единицы ПТО от ее технических характеристик

№ п.п.	Наименование многофакторной модели	Аналитическое описание модели	Назначение коэффициентов пропорциональности
1	Простая линейная модель	$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \cdot x_i$	a_0 – поправка к первоначальной стоимости единицы ПТО, не зависящая от значений технических характеристик оборудования; a_1, a_2, \dots, a_m – определяют величину стоимости ПТО, приходящуюся на единицу измерения технической характеристики оборудования.
2	Линейная модель с абсолютными отклонениями	$y = y^{\bar{a}az} + \sum_{i=1}^m a_i \cdot q_i^{abc},$ $q_i^{abc} = \begin{cases} x_i - x_i^{\bar{a}az}, & \text{if } \partial y / \partial x_i \geq 0; \\ x_i^{\bar{a}az} - x_i, & \text{if } \partial y / \partial x_i < 0; \end{cases}$	a_1, a_2, \dots, a_m – определяют изменение стоимости ПТО относительно эталонного значения, приходящееся на единицу абсолютного отклонения текущего значения технической характеристики от соответствующего базового (эталонного).
3	Линейная модель с относительными отклонениями	$y = y^{\bar{a}az} \cdot \sum_{i=1}^m a_i \cdot q_i^{omn},$ $q_i^{omn} = \begin{cases} x_i / x_i^{\bar{a}az}, & \text{if } \partial y / \partial x_i \geq 0; \\ x_i^{\bar{a}az} / x_i, & \text{if } \partial y / \partial x_i < 0; \end{cases}$	a_1, a_2, \dots, a_m – определяют доли соотношений текущих и базовых (эталонных) значений технических характеристик ПТО в соотношении первоначальных стоимостей рассматриваемой и базовой (эталонной) единиц оборудования.

Примечание: $x_i, x_i^{\bar{a}az}$ – соответственно текущее и базовое (эталонное) значение i -й технической характеристики ПТО, принадлежащего определенному классу;
 q_i^{abc}, q_i^{omn} – соответственно абсолютное и относительное отклонение текущего значения i -й технической характеристики ПТО определенного класса от соответствующего базового значения;
 m – количество технических характеристик, определяющих стоимость единицы ПТО определенного класса;
 a_i – коэффициент, определяющий пропорциональность между стоимостью единицы техники и i -й технической характеристикой ПТО, соответствующего отдельному классу;
 $y_i, y_i^{\bar{a}az}$ – значение первоначальной стоимости соответственно для рассматриваемой и базовой (эталонной) единиц ПТО.

На базе предложенных многофакторных моделей была разработана оптимизационная модель обоснования характеристик технологической группы ПТО, выполняющей определенное количество наиболее вероятных технологических цик-

лов, описываемых усредненными пространственными характеристиками маршрутов перемещения ГЕ. Варьируемыми параметрами модели являются следующие:

- значения технических характеристик p_i^{tcg} , определяющих первоначальную стоимость единицы ПТО в составе отдельной g -й технологической группы ПТО определенного c -го класса, соответствующей заданному t -му варианту проектно-технологического решения складской системы; $t \in \{1, 2, \dots, T\}$, где T – количество рассматриваемых вариантов проектно-технологического решения склада; $c \in \{1, 2, \dots, C\}$, где C – количество исходных классов ПТО, рассматриваемых при решении задачи обоснования структуры парка техники; $g \in \{1, 2, \dots, G_t\}$, где G_t – общее количество технологических групп ПТО для t -го варианта проектно-технологического решения склада; $i = 1, 2, \dots, m$, где m – общее количество технических характеристик, определяющих первоначальную стоимость единицы ПТО;
- количество r^{tcg} (ед.) единиц ПТО в составе технологической группы.

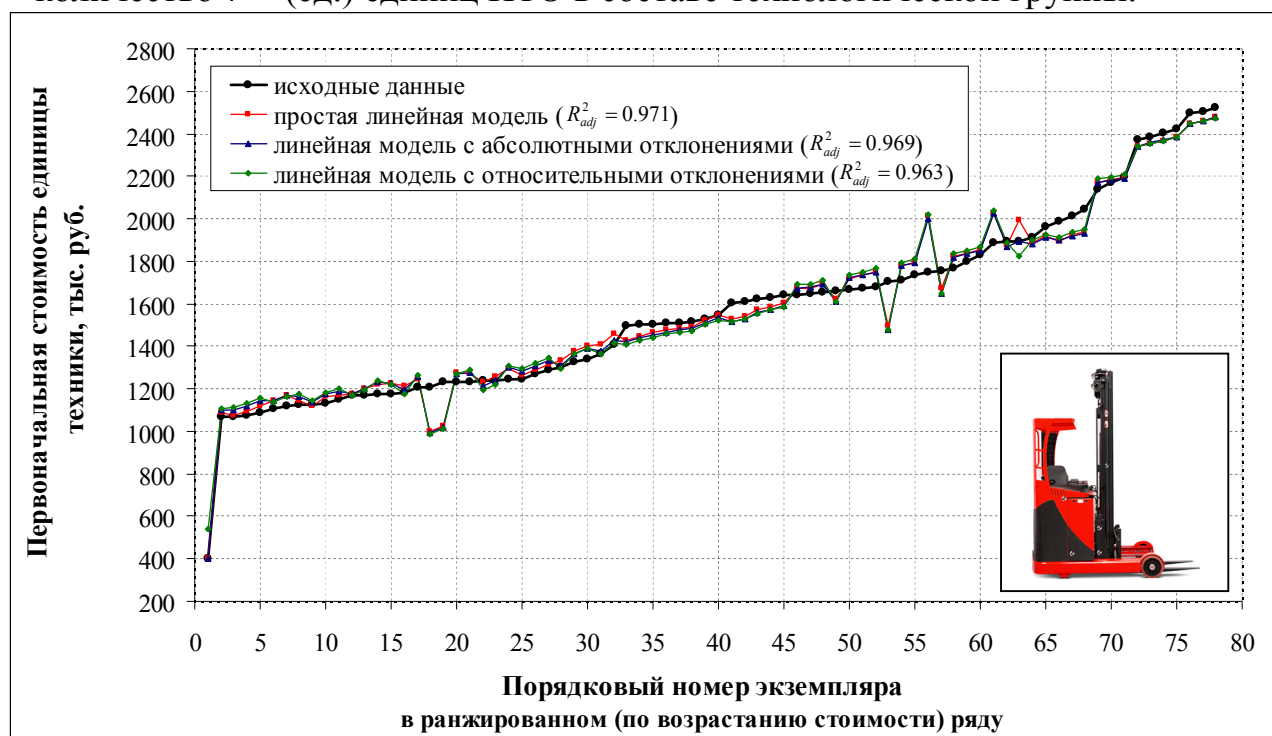


Рисунок 3 – Фактические и прогнозные (полученные на базе многофакторных моделей) значения первоначальной стоимости единиц ПТО, соответствующих определенному классу (высотный штабелер)

Перечисленные параметры являются базой для расчета следующих характеристик модели:

- длительность T_u^{tcgs} (с) выполнения s -го наиболее вероятного технологического цикла единицей ПТО в составе технологической группы, вычисляемая на базе элементов массива $\{p_i^{tcg}\}$ (рабочих скоростей механизмов оборудования, характеристик маневренности и т.п.) по известным формулам; $s = 1, 2, \dots, S_{ig}$, где S_{ig} – количество наиболее вероятных технологических циклов, выполняемых рас-

сма­три­вае­мой g -й тех­но­ло­гиче­ской груп­пой в рам­ках задан­но­го t -го вари­ан­та про­ект­но-тех­но­ло­гиче­ско­го ре­ше­ния;

- про­из­во­ди­тель­ность Pr_{Σ}^{tcg} (шт./ч) тех­но­ло­гиче­ской груп­пы ПТО, опре­де­ляе­мая вы­ра­же­ни­ем

$$Pr_{\Sigma}^{tcg}(r^{tcg}, \{p_i^{tcg}\}) = r^{tcg} \cdot \sum_{s=1}^{S_{ig}} \frac{\gamma^{tcgs}}{T_u^{tcgs}(\{p_i^{tcg}\})}, \quad (1)$$

где γ^{tcgs} – до­ля в об­щем фон­де вре­ме­ни ра­бо­ты ПТО (в со­ста­ве рас­сма­три­вае­мой груп­пы) за смену, со­от­вет­ст­вую­щая ре­али­за­ции s -го наи­бо­лее ве­ро­ят­но­го тех­но­ло­гиче­ско­го ци­кла;

$\sum_{s=1}^{S_{ig}} \gamma^{tcgs} = 1$;

- сум­мар­ная ра­бо­та A_u^{tcgs} (Дж), вы­пол­няе­мая еди­ни­цей ПТО в со­ста­ве рас­сма­три­вае­мой груп­пы ма­шин за ци­кл, вы­чи­с­ляе­мая на ба­зе эле­мен­тов мас­си­ва $\{p_i^{tcg}\}$ (ра­бо­чих скор­ос­тей ме­ха­низ­мов обо­ру­до­ва­ния, ха­рак­те­рис­тик ма­не­врен­но­сти и т.п.) и ха­рак­те­рис­тик тех­но­ло­гиче­ских ци­клов по из­вест­ным фор­му­лам;
- по­тре­бная сум­мар­ная энер­гия $[A_{\Sigma}^{tcg}]$ (Дж), не­об­хо­ди­мая для не­прерыв­но­го функ­ци­о­ни­ро­ва­ния еди­ни­цы ПТО в те­че­ние опре­де­лен­но­го ин­тер­ва­ла вре­ме­ни, опи­сы­вае­мая вы­ра­же­ни­ем

$$[A_{\Sigma}^{tcg}](\{p_i^{tcg}\}) = T_{cm}^{tg} \cdot k_{ep}^{tg} \cdot \sum_{s=1}^{S_{ig}} A_u^{tcgs}(\{p_i^{tcg}\}) \cdot \frac{\gamma^{tcgs}}{T_u^{tcgs}(\{p_i^{tcg}\})}, \quad (2)$$

где T_{cm}^{tg} – дли­тель­ность (с) не­прерыв­ной ра­бо­ты ПТО в со­ста­ве груп­пы, как пра­ви­ло, опре­де­ляе­мая про­дол­жи­тель­но­стью ра­бо­чей смен­ы;

k_{ep}^{tg} – коэф­фи­циент уче­та про­сто­ев ПТО в со­ста­ве тех­но­ло­гиче­ской груп­пы при ре­али­за­ции про­цес­са грузопе­ре­ра­бот­ки;

- наи­бо­ль­шее зна­че­ние фак­ти­че­ской сум­мар­ной энер­гии A_{Σ}^{tcg} (Дж), рас­хо­дуе­мой в те­че­ние ин­тер­ва­ла вре­ме­ни не­прерыв­ной ра­бо­ты еди­ни­цей ПТО, вы­чи­с­ляе­мая на ос­но­ве эле­мен­тов мас­си­ва $\{p_i^{tcg}\}$ (ха­рак­те­рис­тик АКБ, по­ка­за­те­лей рас­хо­да то­пли­ва и т.п.) по из­вест­ным фор­му­лам;
- пер­во­на­чаль­ная сто­и­мость $C_{e0}^{tcg \text{ nep6}}$ (руб.) еди­ни­цы ПТО, опре­де­ляе­мая иско­мы­ми зна­че­ни­ями $\{p_i^{tcg}\}$ тех­ни­че­ских ха­рак­те­рис­тик обо­ру­до­ва­ния в со­от­вет­ствии с мно­го­фак­тор­ны­ми мо­де­ля­ми, пред­став­лен­ны­ми в та­б­ли­це 1;
- пер­во­на­чаль­ная сто­и­мость всех еди­ниц ПТО $C_{\Sigma}^{tcg \text{ nep6}}$ (руб.) в со­ста­ве рас­сма­три­вае­мой тех­но­ло­гиче­ской груп­пы тех­ни­ки, опи­сы­вае­мая вы­ра­же­ни­ем

$$C_{\Sigma}^{tcg \text{ nep6}}(r^{tcg}, \{p_i^{tcg}\}) = C_{e0}^{tcg \text{ nep6}}(\{p_i^{tcg}\}) \cdot r^{tcg}. \quad (3)$$

Целе­вая функ­ция и ос­нов­ное функ­ци­о­наль­ное огра­ни­че­ние оп­ти­ми­за­ци­он­ной мо­де­ли опре­де­ляе­ются кри­те­рием обос­но­ва­ния струк­ту­ры пар­ка ПТО: для за­дач ми­ни­ми­за­ции зат­рат на обо­ру­до­ва­ние и ма­кси­ми­за­ции про­из­во­ди­тель­но­сти тех­ни­ки вы­ше­ука­зан­ные эле­мен­ты раз­ра­бо­тан­ной мо­де­ли бу­дут иметь вид со­от­вет­ст­вен­но

$$\begin{cases} C_{\Sigma}^{tcg \text{ nep6}}(r^{tcg}, \{p_i^{tcg}\}) \rightarrow \min; \\ Pr_{\Sigma}^{tcg}(r^{tcg}, \{p_i^{tcg}\}) \geq [Pr_{\Sigma}^{tcg}] \end{cases} \quad (4)$$

и

$$\begin{cases} Pr_{\Sigma}^{tcg}(r^{tcg}, \{p_i^{tcg}\}) \rightarrow \max; \\ C_{\Sigma}^{tcg \text{ nep6}}(r^{tcg}, \{p_i^{tcg}\}) \leq [C_{\Sigma}^{tcg \text{ nep6}}] \end{cases} \quad (5)$$

где $[Pp_{\Sigma}^{tcg}]$ – требуемое (минимально допустимое) значение производительности (шт./ч) рассматриваемой технологической группы ПТО в целом;
 $[C_{\Sigma}^{tcg\ neps}]$ – максимально допустимое значение капитальных затрат (руб.) на приобретение ПТО в составе рассматриваемой группы.

Дополнительное функциональное ограничение, а также ограничения на варьируемые параметры, учитываемые как при минимизации затрат на ПТО, так и при максимизации производительности оборудования, описываются выражением

$$\begin{cases} A_{\Sigma}^{tcg}(\{p_i^{tcg}\}) \geq [A_{\Sigma}^{tcg}](\{p_i^{tcg}\}); \\ \max(\underline{p}_i^{c\ констр}, \underline{p}_i^{tcg\ усл}) \leq p_i^{tcg} \leq \min(\bar{p}_i^{c\ констр}, \bar{p}_i^{tcg\ усл}), i = 1, 2, \dots, m; \\ \underline{r}^{усл\ tcg} \leq r^{tcg} \leq \bar{r}^{усл\ tcg}, r^{tcg} \in \mathbf{N}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\underline{p}_i^{c\ констр}$, $\bar{p}_i^{c\ констр}$ – соответственно минимальное и максимальное конструктивно допустимые (определяемые особенностями конструкции оборудования) значения i -й технической характеристики ПТО;

$\underline{p}_i^{tcg\ усл}$, $\bar{p}_i^{tcg\ усл}$ – соответственно минимальное и максимальное условно допустимые (определяемые особенностями объемно-планировочного решения склада) значения i -й технической характеристики ПТО;

$\underline{r}^{усл\ tcg}$, $\bar{r}^{усл\ tcg}$ – соответственно минимально и максимально возможные значения количества (ед.) ПТО в составе технологической группы;

\mathbf{N} – множество натуральных чисел.

Результаты реализации вышеописанной оптимизационной модели являются основой для формирования перечня альтернативных экземпляров ПТО в рамках рассматриваемой технологической группы посредством проверки фактических значений технических характеристик машин на выполнение условий вида

$$\begin{cases} p_i^{ce} \geq \max\left(\underline{p}_i^{c\ констр}, \underline{p}_i^{tcg\ усл}, p_i^{tcg\ opt} - \sigma_i^c \cdot \sqrt{(1 - R_{adj}^2) \cdot \frac{E_c - n}{E_c - 1}}\right); \\ p_i^{ce} \leq \min\left(\bar{p}_i^{c\ констр}, \bar{p}_i^{tcg\ усл}, p_i^{tcg\ opt} + \sigma_i^c \cdot \sqrt{(1 - R_{adj}^2) \cdot \frac{E_c - n}{E_c - 1}}\right), \end{cases} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где p_i^{ce} – фактическое значение i -й технической характеристики для e -го экземпляра ПТО c -го класса; $e = 1, 2, \dots, E_c$;

$p_i^{tcg\ opt}$ – оптимизированное значение i -й технической характеристики оборудования, полученное по результатам реализации разработанной модели;

E_c – общее количество исходных экземпляров ПТО, используемых при формировании зависимости $C_{ед}^{tcg\ neps}(\{p_i^{tcg}\})$ (на базе многофакторных моделей таблицы 1) как составного элемента реализованной оптимизационной модели, а также рассматриваемых при формировании структуры технологической группы;

σ_i^c – значение среднеквадратического отклонения для i -й технической характеристики ПТО, полученное в процессе статистической обработки соответствующих данных для исходных экземпляров оборудования;

R_{adj}^2 – скорректированный коэффициент детерминации, определяющий степень соответствия зависимости $C_{ed}^{tcg\ nepb}(\{p_i^{tcg}\})$, используемой при реализации оптимизационной модели, реальным данным;

n – количество параметров (коэффициентов пропорциональности) многофакторной модели, на базе которой сформирована зависимость $C_{ed}^{tcg\ nepb}(\{p_i^{tcg}\})$.

В третьей главе «Разработка моделей обоснования состава технологических групп парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов» приводится описание инструментальных средств, разработанных для определения количества альтернативных экземпляров ПТО в составе соответствующих технологических групп, обеспечивающих реализацию заданного процесса грузопереработки в рамках складской системы тарно-штучных грузов. К упомянутым инструментальным средствам относятся:

- укрупненная модель оптимизации состава технологических групп ПТО без учета формирования очередей ГЕ;
- уточненная модель оптимизации состава технологических групп ПТО с учетом формирования очередей ГЕ;
- имитационная модель функционирования парка ПТО в рамках складской системы тарно-штучных грузов.

В первую очередь была разработана укрупненная оптимизационная модель, варьируемые параметры которой представляют собой количество r_{gj}^{tw} (ед.) каждого j -го экземпляра оборудования в составе каждой g -й группы машин в рамках w -го варианта структуры технологических групп оборудования, соответствующего t -му варианту проектно-технологического решения склада; $j = 1, 2, \dots, J_{twg}$, где J_{twg} – количество альтернативных вариантов экземпляров ПТО в g -й технологической группе в рамках w -го варианта структуры технологических групп оборудования; $g = 1, 2, \dots, G_t$; $w \in \{1, 2, \dots, W_t\}$, где W_t – общее количество вариантов структуры технологических групп ПТО, сформированных для t -го варианта проектно-технологического решения склада; $t \in \{1, 2, \dots, T\}$.

Вышеописанные варьируемые параметры укрупненной модели являются основой для расчета следующих характеристик:

- средняя длительность $T_{g\ u}^{tw\rho}$ (с) выполнения технологического цикла ПТО в составе g -й группы, вычисляемая в разрезе процедур приемки ($\rho = 1$) и отправки ($\rho = 2$) грузов по формуле

$$T_{g\ u}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) = \frac{\sum_{j=1}^{J_{twg}} T_{gj\ u}^{tw\rho} \cdot r_{gj}^{tw}}{\sum_{j=1}^{J_{twg}} r_{gj}^{tw}}, \quad (8)$$

где $T_{gj\ u}^{tw\rho}$ – средняя длительность (с) выполнения технологического цикла единицей ПТО j -го экземпляра в составе g -й группы при реализации процедур и отправки грузов;

- средняя пропускная способность $Пп_{\Sigma}^{tw\rho}$ (шт./ч) склада при реализации процедур приемки и отправки ГЕ, описываемая формулой

$$Pr_{\Sigma}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) = \frac{1}{\sum_{g=1}^{G_t} T_{g\ u}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\})}; \quad (9)$$

– суммарные текущие за период $C_{mek\ \Sigma}^{tw}$ и капитальные $C_{nep8\ \Sigma}^{tw}$ затраты (руб.) на ПТО в составе рассматриваемых технологических групп

$$C_{mek\ \Sigma}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\}) = \sum_{g=1}^{G_t} \sum_{j=1}^{J_{twg}} C_{mek\ gj}^{tw} \cdot r_{gj}^{tw}; \quad (10) \quad C_{nep8\ \Sigma}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\}) = \sum_{g=1}^{G_t} \sum_{j=1}^{J_{twg}} C_{nep8\ gj}^{tw} \cdot r_{gj}^{tw}, \quad (11)$$

где $C_{mek\ gj}^{tw}$, $C_{nep8\ gj}^{tw}$ – текущие за период и капитальные затраты (руб.), описывающие соответственно содержание и приобретение единицы ПТО j -го альтернативного экземпляра в составе g -й технологической группы техники.

Целевая функция и основные функциональные ограничения оптимизационной модели в зависимости от критерия обоснования структуры парка ПТО (минимизации затрат на оборудование или максимизации производительности техники) определяются выражениями вида

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{mek\ \Sigma}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\})}{C_{mek\ \Sigma}^{tw\ q}} \cdot \beta_{C\ mek} + \frac{C_{nep8\ \Sigma}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\})}{C_{nep8\ \Sigma}^{tw\ q}} \cdot \beta_{C\ nep8} \rightarrow \min; \\ Pr_{\Sigma}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) \geq [Pr_{\Sigma}^{\rho}], \rho = 1, 2; \end{array} \right. \quad (12) \quad \text{и} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\rho=1}^2 \frac{Pr_{\Sigma}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\})}{Pr_{\Sigma}^{tw\rho\ q}} \cdot \beta_{Pr\ \rho} \rightarrow \max; \\ C_{mek\ \Sigma}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\}) \leq [C_{mek\ \Sigma}]; \\ C_{nep8\ \Sigma}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\}) \leq [C_{nep8\ \Sigma}]; \end{array} \right. \quad (13)$$

где $C_{mek\ \Sigma}^{tw\ q}$, $C_{nep8\ \Sigma}^{tw\ q}$, $Pr_{\Sigma}^{tw\rho\ q}$ – эталонные значения соответственно текущих за период и капитальных затрат на ПТО (руб.), а также пропускной способности складской системы (шт./ч) при реализации ρ -й технологической процедуры;

$[C_{mek\ \Sigma}]$, $[C_{nep8\ \Sigma}]$, $[Pr_{\Sigma}^{\rho}]$ – требуемые значения соответственно текущих за период и капитальных затрат на ПТО (руб.), а также пропускной способности складской системы (шт./ч) при реализации ρ -й технологической процедуры;

$\beta_{C\ mek}$, $\beta_{C\ nep8}$, $\beta_{Pr\ \rho}$ – коэффициенты учета значимости соответственно текущих и капитальных затрат на ПТО, а также пропускной способности складской системы при реализации ρ -й технологической процедуры; $\beta_{C\ mek} + \beta_{C\ nep8} = 1$; $\sum_{\rho=1}^2 \beta_{Pr\ \rho} = 1$.

Прямые ограничения на варьируемые параметры разработанной модели имеют вид

$$\underline{r}_{gj}^{tw} \leq r_{gj}^{tw} \leq \bar{r}_{gj}^{tw}, \quad r_{gj}^{tw} \in \mathbf{N}, \quad (14)$$

где \underline{r}_{gj}^{tw} , \bar{r}_{gj}^{tw} – соответственно минимально и максимально возможные значения количества (ед.) ПТО j -го экземпляра в составе g -й технологической группы.

Для устранения основного недостатка укрупненной модели – отсутствия учета неравномерности грузопотока, обуславливающей образование очередей ГЕ, ожидающих обработки техникой – была разработана уточненная модель оптимизации состава технологических групп ПТО, базирующаяся на следующих основных положениях:

– складская система тарно-штучных грузов рассматривается как совокупность систем массового обслуживания (СМО), осуществляющих обработку заявок,

отождествляемых с транспортными партиями ГЕ со средним объемом v_{np}^{tp} (шт.), в разрезе процедур приемки и отправки грузов со склада; заявки поступают в систему через интервалы времени, соответствующие экспоненциальному закону распределения со средним значением T_{np}^{tp} (мин.);

- зона разгрузки / загрузки ТС рассматривается как многоканальная СМО с неограниченной длиной очереди; при этом каждый из каналов обслуживания (в количестве $n_{обсл}^t$ (ед.)) указанной СМО отождествляется с рабочей зоной для помещения или изъятия ГЕ из отдельного ТС;
- парк ПТО рассматривается как многофазная СМО, компоненты которой представляют собой многоканальные СМО с ограниченной длиной очереди, каждая из которых отождествляется с определенной технологической группой ПТО; при этом канал обслуживания многоканальной СМО рассматривается как совокупность единиц ПТО в составе соответствующей технологической группы, выделяемая для обработки отдельной заявки – транспортной партией ГЕ; количество каналов обслуживания $n_{g\ обсл}^{tw}$ (ед.) и максимальная длина очереди $m_{g\ оч}^{tw}$ (ед.) каждой g -й многоканальной СМО ($g = 1, 2, \dots, G_t$) определяются выражениями

$$n_{g\ обсл}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\}) = \left\lceil \sum_{j=1}^{J_{twg}} r_{gj}^{tw} / r_g^{tw\ обсл} \right\rceil; \quad (15)$$

$$m_{g\ оч}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\}) = n_{обсл}^t - n_{g\ обсл}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\}), \quad (16)$$

где $\lceil \dots \rceil$ – обозначение результата округления значения в скобках до ближайшего большего целого;

$r_g^{tw\ обсл}$ – количество единиц ПТО в составе g -й группы (ед.), одновременно выделяемых для обслуживания отдельной транспортной партии ГЕ.

Варьируемые параметры уточненной модели оптимизации состава технологических групп ПТО аналогичны соответствующим структурным элементам укрупненной модели и являются базой для расчета следующих характеристик:

- для g -й технологической группы оборудования (многоканальной СМО с ограниченной очередью):
 - средняя длительность $T_{g\ обсл}^{tw\rho}$ (мин) обработки заявки (транспортной партии ГЕ) в разрезе процедур приемки и отправки грузов, описываемая выражением

$$T_{g\ обсл}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) = \frac{v_{np}^{tp} \cdot T_{g\ оч}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) \cdot n_{g\ обсл}^{tw}(\{r_{gj}^{tw}\})}{\sum_{j=1}^{J_{twg}} r_{gj}^{tw}}; \quad (17)$$

- вероятность $P_{g\ оч}^{tw\rho}$ образования очереди из заявок (транспортных партий ГЕ), ее средняя длина $L_{g\ оч}^{tw\rho}$ (ед.), а также средняя длительность $W_{g\ оч}^{tw\rho}$ (мин.) ожидания в очереди, определяемые на основе варьируемых параметров $\{r_{gj}^{tw}\}$, а также характеристик $n_{g\ обсл}^{tw}$, $m_{g\ оч}^{tw}$, T_{np}^{tp} и $T_{g\ обсл}^{tw\rho}$ по известным формулам из теории СМО;
- для зоны разгрузки / загрузки ТС (многоканальной СМО с неограниченной длиной очереди):

- средняя длительность $T_{обсл\ TC}^{tw\rho}$ (мин) обслуживания заявки (ТС, соответствующего транспортной партии ГЕ) при реализации процедур приемки и отправки грузов, определяемая формулой

$$T_{обсл\ TC}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) = T_{g^*\ обсл}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) + W_{g^*\ оч}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}), \quad (18)$$

где g^* – индекс технологической группы ПТО, осуществляющей разгрузку и / или загрузку ТС;

- вероятность $P_{оч\ TC}^{tw\rho}$ образования очереди из заявок (ТС), ее средняя длина $L_{оч\ TC}^{tw\rho}$ (ед.), а также средняя длительность $W_{оч\ TC}^{tw\rho}$ (мин.) ожидания в очереди, определяемые на основе варьируемых параметров $\{r_{gj}^{tw}\}$, а также характеристик $n_{обсл}^t$, T_{np}^{tp} и $T_{обсл\ TC}^{tw\rho}$ по известным формулам из теории СМО;
- средняя пропускная способность $Pr_{\Sigma}^{tw\rho}$ (шт./ч) склада при реализации процедур приемки и отправки ГЕ, определяемая выражением

$$Pr_{\Sigma}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) = \frac{v_{np}^{tp}}{\sum_{g=1}^{G_s} (T_{g\ обсл}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}) + W_{g\ оч}^{tw\rho}(\{r_{gj}^{tw}\}))}. \quad (19)$$

Целевая функция, прямые и основные функциональные ограничения уточненной модели аналогичны соответствующим структурным элементам укрупненной модели и определяются выражениями (12)–(14).

Дополнительные структурные ограничения уточненной модели определяют отсутствие превышения расчетных значений характеристик СМО ($T_{g\ обсл}^{tw\rho}$, $P_{g\ оч}^{tw\rho}$, $L_{g\ оч}^{tw\rho}$, $W_{g\ оч}^{tw\rho}$ для каждой g -й технологической группы ПТО, а также $T_{обсл\ TC}^{tw\rho}$, $P_{оч\ TC}^{tw\rho}$, $L_{оч\ TC}^{tw\rho}$, $W_{оч\ TC}^{tw\rho}$ для зоны разгрузки / загрузки ТС) соответствующих предельно допустимых значений.

На основе уточненной модели оптимизации состава технологических групп ПТО была разработана имитационная модель функционирования парка техники в рамках складской системы тарно-штучных грузов. Модель описывает процессы грузопереработки, реализуемые двумя технологическими группами ПТО – электротележками с платформой для оператора и высотными штабелерами (ричтраками) различных экземпляров (производителей и моделей) – при перемещении паллетированных ГЕ с однономенклатурной продукцией между зоной разгрузки / загрузки автомобильных ТС, зоной временного накопления (однорусного штабелирования) и основного хранения (в многоярусных стеллажах) ГЕ. Создание имитационной модели производилось в программной среде «AnyLogic» на базе дискретно-событийной парадигмы моделирования, обеспечивающей наибольшую степень соответствия структуры модели положениям теории СМО, по следующим основным принципам:

- состав входных параметров имитационной модели включает в себя варьируемые параметры и исходные данные базовой оптимизационной модели;
- выходные параметры имитационной модели соответствуют целевой функции, а также расчетным характеристикам (левым частям) функциональных ограничений базовой оптимизационной модели.

Оптимизация состава технологических групп ПТО производится посредством реализации серии прогонов модели с различными комбинациями значений количества учитываемых экземпляров ПТО с последующим выбором наиболее предпочтительной комбинации, при которой зафиксированные по окончании соответствующего прогона значения выходных параметров удовлетворяют критерию поиска решения и функциональным ограничениям базовой оптимизационной модели. Фрагмент анимации прогона имитационной модели представлен на рисунке 4.

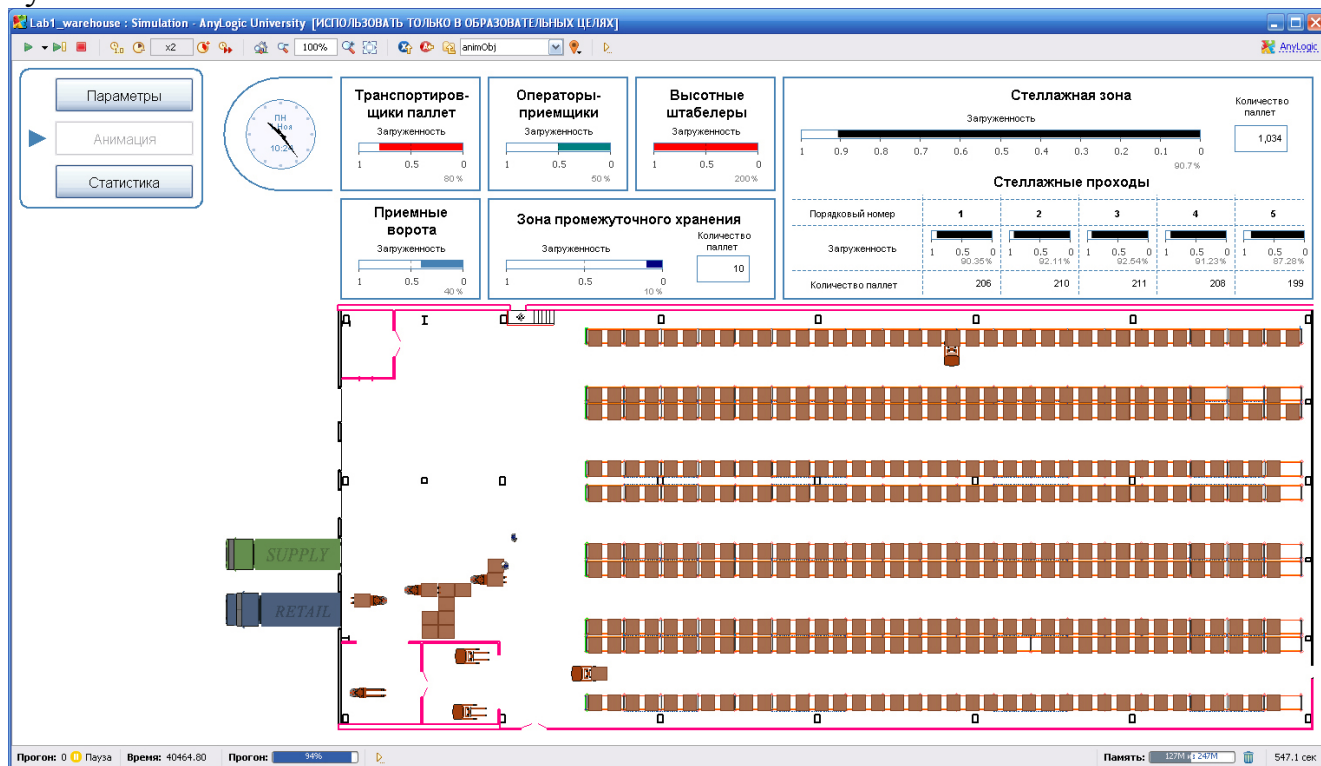


Рисунок 4 – Фрагмент анимации прогона имитационной модели функционирования парка ПТО в рамках складской системы тарно-штучных грузов

В четвертой главе «Разработка методики формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов» приводится детальное описание процесса решения поставленной задачи при различных вариантах структуры исходных данных для организационного проектирования или организации функционирования склада.

В наиболее общем случае структура методики включает в себя следующие основные этапы:

1. Группировка смежных технологических операций (в исходных последовательностях) в циклы для каждого варианта проектно-технологического решения складской системы.
2. Оценка выполнимости технологических операций (в составе каждого заданного варианта проектно-технологического решения склада) рассматриваемым ПТО в разрезе отдельных классов и экземпляров.
3. Формирование для каждого варианта проектно-технологического решения склада обобщенной структуры технологических групп ПТО – совокупности

групп оборудования, каждой из которых соответствует определенный набор технологических циклов.

4. Формирование набора альтернативных экземпляров ПТО в разрезе классов техники для каждой технологической группы машин, выделенной в рамках отдельного варианта проектно-технологического решения склада, по результатам оценки выполнимости операций в составе соответствующих группе технологических циклов.
5. Формирование перечня вариантов структуры технологических групп ПТО, каждый из которых определяет соответствие каждой отдельной группы машин определенному классу оборудования.
6. Обоснование характеристик каждой технологической группы ПТО в рамках каждого альтернативного варианта структуры технологических групп техники для каждого варианта проектно-технологического решения склада с использованием соответствующей оптимизационной модели (выражения (1)–(6)).
7. Уточнение сформированных на этапе 4 наборов альтернативных экземпляров ПТО по результатам оценки соответствия значений технических характеристик машин предпочтительным диапазонам, полученным на основе вышеуказанной модели (выражение (7)).
8. Обоснование состава технологических групп ПТО в рамках каждого альтернативного варианта структуры последних для каждого варианта проектно-технологического решения склада с использованием средств оптимизационного (выражения (8)–(19)) или имитационного моделирования.
9. Выбор наиболее предпочтительного варианта структуры технологических групп ПТО, соответствующего минимальным затратам на оборудование или максимальной пропускной способности склада, в рамках каждого варианта проектно-технологического решения.
10. Выбор наиболее предпочтительного варианта проектно-технологического решения склада по результатам расчета интегрального критерия (формула для расчета будет подобна целевой функции в выражениях (12) или (13)), учитывающего текущие и капитальные затраты на функционирование склада, пропускную способность склада при реализации процедур приемки и отправки ГЕ, текущие и капитальные затраты на соответственно содержание и приобретение ПТО (значения последних двух групп характеристик соответствуют наиболее предпочтительному варианту структуры технологических групп оборудования).

Разработанная методика была реализована на реальном объекте для решения задачи оптимизации состава парка ПТО при известных проектно-технологическом решении склада, структуре технологических групп и классов оборудования. В процессе решения вышеуказанной задачи было произведено обоснование характеристик технологических групп оборудования, формирование уточненного перечня экземпляров ПТО и определение оптимального их количества в рамках каждой технологической группы в соответствии с этапами 6–8 разработанной методики. При выполнении последнего из перечисленных этапов была произведена реализация уточненной оптимизационной модели обоснования состава технологических групп ПТО (выражения (10)–(19)), а также имитационной модели реаль-

ного объекта, разработанной с использованием программной среды «AnyLogic» в соответствии с дискретно-событийной парадигмой моделирования. Результаты реализации вышеуказанных моделей полностью совпадают по общему количеству единиц ПТО в исходно выделенных технологических группах техники, но при этом несколько отличаются друг от друга по составу групп оборудования, что обусловлено учетом в имитационной модели большего количества факторов и особенностей процесса функционирования рассматриваемого склада по отношению к соответствующей оптимизационной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получены следующие основные выводы и результаты:

1. Обоснована недостаточная степень проработанности вопросов определения потребных характеристик и количества подъемно-транспортной техники в рамках складских систем тарно-штучных грузов.

2. Разработана концепция обоснования структуры парка подъемно-транспортного оборудования, определяющая основные структурные элементы парка машин (классы, технологические группы, экземпляры), характер их взаимосвязей с другими элементами складской системы (элементами объемно-планировочного решения, структурой грузопотоков и технологических процессов), классификацию соответствующих задач, а также принципы их решения в части формирования альтернативных вариантов структуры парка техники и последующего выбора из них наиболее предпочтительного.

3. Предложены многофакторные модели зависимости первоначальной стоимости единицы подъемно-транспортного оборудования от его технических характеристик. Полученные для некоторых классов оборудования результаты оценки параметров моделей, а также точности их прогнозирования подтвердили адекватность предложенных моделей.

4. Разработана модель оптимизации характеристик технологической группы подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов при заданных значениях требуемой производительности группы техники или предельных затрат на ее приобретение, базирующаяся на вышеуказанных многофакторных моделях.

5. Разработаны математические модели обоснования состава (количества различных экземпляров техники) технологических групп подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов при заданных значениях требуемой пропускной способности склада при приемке и отправке грузов или значениях предельных затрат на приобретение и содержание техники.

6. Разработана методика формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов, базирующаяся на всех вышеперечисленных результатах исследования. Произведена реализация методики на реальном объекте для решения задачи обоснования состава технологических групп техники с использованием средств оптимизационного и имитационного моделирования. Полученные результаты свидетельствуют о

высокой адекватности предложенных оптимизационных моделей и определяют целесообразность построения и реализации имитационной модели исключительно в целях уточнения результатов применения средств оптимизационного моделирования за счет возможности более детального описания процессов грузопереработки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Пилипчук, С. Ф. О проектировании склада штучных грузов [Текст] / С. Ф. Пилипчук, **А. Е. Радаев** // Логистика и управление цепями поставок. – 2010. – № 4(39). – С. 21-33. – 0,85 п.л. (0,43 п.л. автора).
2. **Радаев, А. Е.** Методика обоснования структуры парка оборудования для складского комплекса промышленного предприятия на основе имитационного моделирования [Текст] / А. Е. Радаев, В. В. Кобзев // Научно-технические ведомости СПбГПУ (Экономические науки). – 2011. – № 1(114). – С. 98-104. – 0,38 п.л. (0,19 п.л. автора).
3. **Радаев, А. Е.** Системы поэтапного имитационного моделирования производственных процессов [Текст] / А. Е. Радаев, В. А. Левенцов // Организатор производства. – 2011. – № 3(50). – С. 30-33. – 0,39 п.л. (0,2 п.л. автора).

Статьи в других научных изданиях, материалы конференций, учебные пособия

4. **Радаев, А. Е.** Имитационное моделирование производственных систем [Текст]: учеб. пособие / А. Е. Радаев, В. В. Кобзев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 156 с. – 9,75 п.л. (7,32 п.л. автора).
5. Пилипчук, С. Ф. Моделирование логистических процессов [Текст] / С. Ф. Пилипчук, **А. Е. Радаев** // Научные исследования и образование в области логистики и управления цепями поставок: современное состояние и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции (14-16 декабря 2011 года). – СПб.: Изд-во СПбГУ, Высшая Школа Менеджмента, 2011. – С. 42-45. – 0,25 п.л. (0,13 п.л. автора).
6. **Радаев, А. Е.** Формирование структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы [Текст] / А. Е. Радаев // Современное машиностроение: наука и образование: материалы III-й международной научно-практической конференции; М.М. Радкевич [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 1009-1019. – 0,52 п.л.
7. Ноздрачева, Ю. А. Применение дискретно-событийного имитационного моделирования при проектировании производственных систем [Текст] / Ю. А. Ноздрачева, **А. Е. Радаев** // XXXXII-я Неделя науки СПбГПУ: материалы науч.-практ. конференции с международным участием. Лучшие доклады.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 58-63. – 0,31 п.л. (0,16 п.л. автора).
8. Пилипчук, С. Ф. Принципы формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования складских систем тарно-штучных грузов [Текст] / С. Ф. Пилипчук, **А. Е. Радаев** // Логистика: современные тенденции развития: материалы междунар. науч.-практ. конф. 24, 25 апреля 2014 г.; В. С. Лукинский

- [и др.] – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2014. – С. 246-249. – 0,19 п.л. (0,1 п.л. автора).
9. Nozdrachyova, Yu. A. Optimization model for the handling machinery park of the unit load warehousing systems [Text] / Yu. A. Nozdrachyova, S. F. Pilipchuk, **A. E. Radaev** // Логистика: современные тенденции развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 24, 25 апреля 2014 г. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2014. – С. 359-363. – 0,22 п.л. (0,08 п.л. автора).
10. Ноздрачева, Ю. А. Оптимизационная модель обоснования характеристик технологической группы подъемно-транспортного оборудования [Текст] / Ю. А. Ноздрачева, С. Ф. Пилипчук, **A. E. Радаев** // Современное машиностроение: наука и образование: материалы IV-й международной научно-практической конференции; М. М. Радкевич [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 732-742. – 0,54 п.л. (0,2 п.л. автора).

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1] – произведен сравнительный анализ методов аналитического и имитационного моделирования, используемых при решении задачи формирования структуры парка подъемно-транспортного оборудования, разработана и реализована имитационная модель склада штучных грузов для решения задачи определения потребного количества оборудования; [2] – разработана оптимизационная и имитационная модели укрупненного обоснования количества различных вариантов оборудования в определенной технологической зоне складской системы тарно-штучных грузов; [3] – разработан комплекс имитационных моделей, описывающих процессы функционирования производственных и складских подразделений промышленного предприятия; [4] – разработан укрупненный алгоритм решения задач организационного проектирования и организации функционирования производственных систем, разработан комплекс оптимизационных моделей, а на его основе – комплекс соответствующих имитационных моделей для решения отдельных видов задач; [5] – разработаны имитационные модели технологических процессов, реализуемых с использованием обрабатывающего, транспортного и складского оборудования; [7] – разработана и реализована имитационная модель производственного процесса для определения оптимального количества различных видов подъемно-транспортного оборудования, обслуживающего обрабатывающие комплексы; [8] – предложена структура парка подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов; [9] – разработана оптимизационная модель обоснования состава технологических групп подъемно-транспортного оборудования складской системы тарно-штучных грузов; [10] – предложены многофакторные модели зависимости первоначальной стоимости единицы подъемно-транспортного оборудования от его технических характеристик, разработана модель оптимизации характеристик технологической группы машин в рамках складской системы тарно-штучных грузов.