

На правах рукописи



БАШАРИНА ОЛЬГА ЮРЬЕВНА

**Методы и средства моделирования логистических складских
комплексов с использованием высокопроизводительных
вычислений**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ИрГУПС)

Научный руководитель: **Носков Сергей Иванович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Батурин Владимир Александрович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления СО РАН»,
г. Иркутск, главный научный сотрудник
лаборатории системного анализа
и вычислительных методов

Шакиров Владислав Альбертович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», доцент кафедры
электроэнергетики и электротехники

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский
государственный университет технологий
и управления», г. Улан-Удэ

Защита состоится 25 декабря 2014 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 218.004.01 на базе ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-803. Тел: (8-3952) 63-83-11; факс: (8-3952) 38-76-72; e-mail: maknv@irgups.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения» <http://www.irgups.ru>

Автореферат разослан 10 ноября 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



А. В. Данеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные логистические складские комплексы (ЛСК) представляют собой сложно организованные хозяйственные объекты, ориентированные на управление грузопотоками большой ёмкости, в том числе на дистрибуцию товаров, и, вследствие этого, играют важную роль в производственной сфере деятельности. Тенденция развития современных ЛСК заключается в постоянном расширении множества складских операций и повышении уровня их сложности. Вследствие этого эффективное управление складом становится исключительно важной и сложной проблемой. Чтобы справиться с неизбежным ростом числа операций и их усложнением, управление ЛСК должно базироваться на системном подходе.

Один из наиболее эффективных подходов к исследованию процессов функционирования производственных объектов и управления ими основан на применении методов системного анализа представленных, в частности, в работах ведущих зарубежных и российских учёных: Р. Беллмана, Р. Бертоланфи, Р. Винера, Э. Квейда, М. Месаровича, С. Л. Оптнера, Ч. Хитча, Р. Эшби, С. П. Никанорова, В. М. Матросова, Н. Н. Моисеева, Ф. И. Перегудова, В. С. Симанкова, В. Н. Спицнадея, Ф. П. Тарасенко, Ю. И. Черняка, а также методов математического моделирования, представленных в работах В. Н. Бусленко, Т. Нейлора, С. И. Носкова, В. В. Окольнишникова, Т. К. Сиразетдинова, Б. Я. Советова, Х. А. Таха, Ю. И. Толуева, И. А. Ушакова и других известных специалистов.

Зачастую основное внимание в методах исследования производственных объектов уделяется статическим моделям, в то время как многие важные особенности поведения таких объектов могут проявиться только в динамике. Сложность динамической структуры современных производственных объектов, обусловленная большим числом важных характеристик их функционирования и связей между ними, требует построения согласованного семейства моделей (аналитических и имитационных), что позволяет проводить исследование этих объектов на разных уровнях детализации и зачастую приводит к значительным техническим и методическим трудностям. По этой причине, с учётом бурного развития высокопроизводительной вычислительной техники, актуализируется использование новых, основанных на парадигмах параллельного и/или распределённого программирования, инструментальных средств и методики разработки, агрегирования и применения моделей сложных производственных объектов.

Логистические системы класса ERP (Enterprise Resource Planning), такие как, например, системы Oracle E-Business Suite, SAP ERP, Microsoft Dynamics AX, Ваап являются мощными инструментами управления внутренними процессами предприятия, включая работу ЛСК. Однако такие коммерческие системы ориентированы в основном на крупные предприятия и используют, как правило, только аналитические методы моделирования. Современные системы управления складскими процессами класса WMS (Warehouse Management System) представлены такими программными комплексами как GESTORI Pro,

1С:WMS, Solvo.WMS, WMS Logistics Vision Suite, Exceed 4000 и многими другими. Такого рода программные комплексы включают в себя средства моделирования складских процессов, но имеют, как правило, узкую специализацию и не пригодны для моделирования многих логистических процессов, возникающих при совместном осуществлении функций складирования, транспортировки и торговли. Таким образом, возникает необходимость применения средств формулировки и решения «нестандартных» (с точки зрения используемых логистических систем) задач. Для их решения существует множество различных программных средств. Проблема заключается в разработке методики их согласованного использования. Все вышеизложенное обуславливает актуальность исследований, выполненных в рамках диссертационной работы.

Цель работы состоит в разработке модели, методик и инструментальных средств анализа, оценки и прогнозирования динамики основных показателей производственного объекта с использованием высокопроизводительных вычислений в распределённой вычислительной среде (РВС).

Основными задачами для достижения поставленной цели являются:

- исследование эффективности известных методов и средств анализа сложных производственных объектов;
- разработка и реализация новых или адаптация известных моделей и методик анализа, оценки и прогнозирования динамики основных показателей функционирования производственного объекта;
- разработка инструментальных средств применения разработанных модели и методики при решении практических задач;
- разработка методики и инструментальных средств планирования и проведения распределённых вычислительных экспериментов в целях обеспечения достоверности разрабатываемых моделей и результатов их применения.

Объектом исследования являются теоретические и прикладные аспекты анализа процессов функционирования сложных производственных объектов.

Предметом исследования являются методы и средства решения задач анализа, оценки и прогнозирования динамики основных показателей функционирования производственного объекта с использованием высокопроизводительных вычислений.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы системного анализа, в том числе концептуального, аналитического и имитационного моделирования, а также методы статистического анализа, параллельных и распределённых вычислений.

Научную новизну диссертации составляют и на защиту выносятся:

- модель анализа и оценки показателей эффективности функционирования ЛСК, базирующаяся в отличие от известных на интегрированном применении методов концептуального, аналитического и имитационного моделирования исследуемого объекта;
- методика анализа и оценки динамики основных показателей функционирования производственного объекта, базирующаяся на поэтапном применении соответствующих уровней интегрированной модели ЛСК;

- инструментальный комплекс, реализующий предложенную методику с использованием высокопроизводительных вычислительных систем;
- методика планирования и проведения вычислительных экспериментов по имитационному моделированию ЛСК с использованием моделей на языке GPSS в PBC;
- инструментальные средства автоматизации предложенной методики планирования и проведения вычислительных экспериментов по имитационному моделированию ЛСК, обеспечивающие по сравнению с известными дополнительные функциональные возможности.

Практическая значимость. Применение разработанных модели, методик и программных средств в процессах принятия управленческих решений по повышению эффективности функционирования производственных объектов позволяет сократить сроки выполнения и повысить качество этих процессов, что подтверждается практическим использованием этих разработок на предприятиях ООО «Завод Родник» и ООО «Иркутский хладокомбинат».

Разработка и применение представленных в диссертационной работе программных средств автоматизации имитационного моделирования в распределенной вычислительной среде выполнялись в рамках НИР № 111-09-103 «Создание и внедрение в учебный процесс вычислительного кластера международного факультета» (2008–2010 гг.).

Достоверность полученных в работе результатов базируется на теории планирования вычислительных экспериментов, в том числе применении методов валидации данных для имитационных моделей, статистического сравнения между откликами реальных систем и моделей, дисперсионного и регрессионного анализа результатов моделирования.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VI, VIII, X Международные научно-практические конференции «Моделирование. Теория, методы и средства» (Новочеркасск, 2006 г., 2008 г., 2010 г.); IV Всероссийская конференция «Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях» (Иркутск, 2014 г.); IV, V Международные научно-практические конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2013 г., 2014 г.); IV Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире» (Санкт-Петербург, 2013 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновационное развитие современной науки» (Уфа, 2014 г.); I Всероссийская конференция «Товароведение и экспертиза товаров» (Иркутск, 2011 г.); VII Восточно-Азиатский экономический и культурный Форум (Иркутск, 2011 г.); «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 2011 г.).

Публикации. Результаты научных исследований отражены в семнадцати научных работах [1–17], из которых статьи [1–5] опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для представления научных результатов диссертации. Из совместных работ в диссертацию включены только те результаты, которые принадлежат лично автору.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографии из 113 наименований и 7 приложений. Общий объём работы – 121 страница, из которых 110 страниц основного текста, включающего 12 таблиц и 23 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи, определена научная и практическая ценность работы. Приведено описание содержания диссертации.

В первой главе приведено содержательное описание исследуемой системы, построена концептуальная модель предметной области, а также решены задачи системного анализа: сформулирована постановка задачи, определены показатели эффективности функционирования ЛСК, собрана экспертная и статистическая информация о процессах функционирования реальных систем.

Содержательное описание исследуемой системы. ЛСК выполняет ряд логистических функций (складирование, грузопереработка, упаковка, снабжение, дистрибуция, транспортировка, сбор возвратных отходов, ценообразование, физическое распределение и т. д.) путем реализации соответствующих логистических операций. В том числе такие операции как: погрузочно-разгрузочные работы (ПРР); затаривание; хранение грузов; приёмка и отпуск товара со склада; перегрузка; сортировка, комплектация; консолидация грузов; разукрупнение грузов; сбор, хранение, передача информации о грузах (товарах); расчёты с поставщиками и покупателями; категорирование объектов (товаров, клиентов); поставка и продажа товаров; управление ассортиментом товаров. Многие логистические функции реализуются и на предприятиях промышленности, преимущественно на этапах снабжения и сбыта.

Концептуальная модель предметной области. Методология построения концептуальной модели базируется на общих принципах структурного анализа предметной области: выделении взаимодействующих между собой объектов и их атрибутов, определение их отношений и ограничений на эти отношения. Затем согласование построенной модели предметной области с экспертом – специалистом по логистике.

Пусть O – множество объектов ЛСК, а $O_1, O_2, \dots, O_m \subset O$ – подмножества товарных зон, помещений для хранения товаров, товарных групп, товаров, клиентов, уровней обслуживания клиентов, видов транспортных средств, логистических операций, программных модулей, реализующих модели логистических операций, показателей эффективности ЛСК, ограничений и других объектов предметной области. Множество $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ включает атрибуты объектов из O . Каждый атрибут a_s имеет допустимую область значений D_s . Элементы множеств O_1, O_2, \dots, O_m наделены соответствующими наборами атрибутов. Значения элементов множеств O_1, O_2, \dots, O_m определяются значениями их атрибутов. Для формального описания модели применяется следующая нотация¹: $R(O_i(n_1, n_2):O_j(n_3, n_4)/C)$, где O_i, O_j – множества объектов предметной области, свя-

¹ Цикритзис Д., Лоховски Ф. Модели данных. М. : Финансы и статистика, 1985. 344 с.

занные бинарным отношением R ; n_1, n_2 – числа, которые означают соответственно минимальное и максимальное число элементов O_i , связанных с элементом O_j ; n_3, n_4 – числа, которые означают соответственно минимальное и максимальное число элементов O_j , связанных с элементом O_i ; C – множество ограничений целостности, накладываемых на элементы O_j , участвующие в отношении R . Использование данной нотации позволяет детализировать связи между элементами множеств типа «один-к-одному», «один-ко-многим» и «многие-ко-многим» и задать для них необходимые ограничения, определяемые конкретной предметной областью. На множестве логистических операций определены составные операции суммы, композиции, выбора и цикла, связывающие простые логистические операции.

Введем математические модели логистических операций, используя в качестве их прототипов модели вычислительных операций, применяемые для планирования вычислений². Пусть F – множество функций, моделирующих логистические операции. С каждой функцией $f(X) \in F, X \subset A$ связано два множества $IN^f, OUT^f \subset A (IN^f \subseteq X)$, называемых соответственно её входом и выходом. Функция $f(X)$ расширяет подмножество атрибутов из A , значения которых известны, атрибутами из $OUT^f: f(X) = X \cup OUT^f$. Пусть $IN^f = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$, $OUT^f = \{y_1, y_2, \dots, y_r\}$. В процессе вычислений выполняются интерпретации I_i функции $f(X)$, в результате которых вычисляются значения атрибутов из OUT^f по известным значениям атрибутов из IN^f :

$$y_i' = I_i(f, x_1', x_2', \dots, x_s'), y_i' \in D_i^y, x_j' \in D_j^x, i = \overline{1, r}, j = \overline{1, s},$$

где x_1', x_2', \dots, x_s' и y_1', y_2', \dots, y_r' – соответственно значения атрибутов из IN^f и OUT^f , D_i^y – допустимая область значений атрибута y_i , D_j^x – допустимая область значений атрибута x_j .

Возможность применения логистических операций определяется набором продукций следующего вида:

$$p(X_1) = f(X_2),$$

где $p(X_1) \in F, X_1, X_2 \subset A$. В выходе логической функции (предиката) выделим атрибут $e_p \in OUT^p: e_p' \in \{0, 1\}$.

Введённая в диссертации интерпретация функций, моделирующих логистические операции, позволяет формализовать постановки задач исследования процессов функционирования ЛСК для методов статистического анализа результатов вычислений и их оптимизации.

Постановка задачи. Пусть имеется складской комплекс. Информационно-логические связи между объектами представлены с помощью концептуальной модели, описанной выше. В ЛСК поступает запрос на выполнение набора взаимосвязанных логистических операций. Требуется спрогнозировать эффективность выполнения этого набора операций с учётом заданных ограничений на используемые ресурсы ЛСК. Конкретизируем данную неформальную постановку задачи для ряда случаев, перечисленных ниже.

² Опарин Г. А., Феоктистов Д. Г. Новые языковые средства пакетов прикладных программ в метасистеме САТУРН // Пакеты прикладных программ. Функциональное наполнение. Новосибирск: Наука, 1985. С. 20–28.

1. Задача статистического прогноза:

$$y_i' = I_i(f, x_1', x_2', \dots, x_s'), y_i' \in D_i^y, x_j' \in D_j^x, i = \overline{1, r}, j = \overline{1, s}. \quad (1)$$

2. Задача многофакторного анализа:

$$y_i' = I_i(f, x_1', x_2', \dots, x_s') + \varepsilon, \quad (2)$$

где ε – ошибка эксперимента, определить степень влияния x_j' на y_i' , $j = \overline{1, s}, i = \overline{1, r}$.

3. Задача однокритериальной оптимизации:

$$y_i' = I_i(f, x_1', x_2', \dots, x_s') - \min(\max), y_i' \in D_i^y, x_j' \in D_j^x, i = \overline{1, r}, j = \overline{1, s}. \quad (3)$$

Для решения задач классов (1)–(3) в диссертации используются следующие методы: задача (1) решается путем многовариантных расчётов в РВС с последующим автоматизированным сбором результатов вычислений (статистических показателей состояния объектов ЛСК); задача (2) решается методом дисперсионного анализа; задача (3) решается методом статистического анализа, результаты используются для проведения регрессионного анализа. Средства для решения этих задач встроены в используемую для целей диссертационного исследования систему имитационного моделирования GPSS World.

4. Задача многокритериального выбора:

$$y_i' = I_i(f, x_1', x_2', \dots, x_s'), y_i' \in D_i^y, x_j' \in D_j^x, i = \overline{1, r}, j = \overline{1, s}. \quad (4)$$

Пусть $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ – множество показателей эффективности, $y_i = f_i(X)$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ – множество вариантов (векторов) значений этих показателей, $v_i = (y_{i1}', y_{i2}', \dots, y_{in}')$, а $V^* \subseteq V$ – множество вариантов значений показателей, удовлетворяющих условиям задачи. Обозначим через \hat{y}_{ij} оценку качества значения y_{ij}' . Выбор вариантов значений показателей y_1, y_2, \dots, y_n основывается на лексикографическом методе, в котором каждый предыдущий показатель y_i существенно важнее последующего y_{i+1} . Упорядоченность показателей задаётся специалистом предметной области.

Выбор вариантов осуществляется по правилу:

$$V^* = \{v_i \in V : (\forall v_j \in V, i \neq j)(\exists k \in \overline{1, n-1})(\hat{y}_{i1} = \hat{y}_{j1} \wedge \hat{y}_{i2} = \hat{y}_{j2} \wedge \dots \wedge \hat{y}_{ik} = \hat{y}_{jk} \wedge \hat{y}_{i,k+1} > \hat{y}_{j,k+1})\}.$$

Если такой возможности упорядочения нет, то применяется мажоритарный метод выбора. В этом случае предполагается, что вариант v_i превосходит вариант v_j по большему числу оценок значений показателей, чем v_j превосходит v_i . Выбор вариантов осуществляется по правилу:

$$V^* = \{v_i \in V : -((\exists v_j \in V, j \neq i)(\sum_{l=1}^n \text{sign}(\hat{y}_{jl} - \hat{y}_{il}) > 0))\}.$$

Показатели эффективности функционирования ЛСК. В качестве основных показателей функционирования ЛСК в диссертации используются показатели качества функционирования ЛСК, показатели уровня стабильности функционирования ЛСК и показатели производительности склада, приведённые в работах В. В. Дыбской, О. Кононенко, Л. Б. Миротина, А. И. Якимова. Эти показатели положены в основу оценки качества логистического сервиса, эффективности выполнения логистических операций и функционирования исследуемой системы.

Статистическая информация о функционировании реальных систем. Были решены задачи построения концептуальных моделей предметных областей, а также выбора показателей эффективности функционирования для двух исследуемых систем: производственного предприятия ООО «Завод Родник» и ЛСК ООО «Иркутский хладокомбинат».

По всем объектам концептуальных моделей была собрана необходимая статистическая информация. Обработка собранной информации осуществлялась с помощью универсального пакета Mathcad и других программных комплексов, включающих средства статистического анализа.

Во второй главе разработаны инструментальные средства системного анализа современных производственных объектов путем интегрированного применения методов аналитического и имитационного моделирования с использованием распределённых вычислений, а также предложена методика применения разработанных инструментальных средств.

Инструментальные средства. Подавляющее большинство имитационных моделей производственных систем создаются с помощью средств дискретного моделирования, таких как Arena, AutoMod, eM-Plant (SIMPLE++, Plant Simulation), Enterprise Dynamics, Extend, ProModel, QUEST, Simul8 и WITNESS, а также с помощью универсальных средств AnyLogic, GPSS World и GPSS/H.

Инструментальные средства, реализованные в ходе выполнения диссертационной работы, базируются на основе методологии модульного программирования и ориентируются, в отличие от соответствующих средств известных систем управления складскими процессами, на проведение расчётных работ в РВС. Использование модульного подхода обеспечивает ряд важных возможностей. Во-первых, достаточно гибкую модификацию и «безболезненное» развитие математического и программного базиса для моделирования ЛСК посредством добавления или замены модулей (программ) этого базиса новыми модулями, в том числе модулями уже разработанных библиотек программ. Во-вторых, быструю «точечную» реализацию дополнительных средств моделирования процессов функционирования ЛСК, не представленных в используемых системах управления этими комплексами.

Процесс моделирования ЛСК включает два основных этапа (рис. 1). На первом этапе решается задача оптимизации основных параметров процессов функционирования ЛСК и выбора стратегий управления ими путем исследования его аналитической модели с использованием параллельных вычислений. На следующем этапе осуществляется оценка характеристик выбранных стратегий для окончательной реализации процессов функционирования ЛСК. Данная оценка определяется на основе статистических данных, получаемых путем воспроизведения работы ЛСК во времени с помощью системы распределённого имитационного моделирования с сохранением логической структуры, связей между событиями и последовательности протекания их во времени, а также с учётом большого числа технологических деталей функционирования моделируемого объекта. Результаты моделирования фиксируются в базе расчётных данных и обрабатываются в дальнейшем с помощью различных универсальных и/или специализированных статистических пакетов.



Рис. 1. Схема моделирования ЛСК

Аналитическая модель ЛСК. Данная модель базируется на принципах динамики производственных объектов и управления ими, изложенных в работе Т. К. Сиразетдинова³, с учётом специфики организационно-функциональной структуры ЛСК. Аналитическая модель M_a строится путем определения математических соотношений (5)–(12) между объектами предметной области, соответствующих их связям в концептуальной модели $M_{лск}$.

Предприятие несёт расходы $Z(\tau)$ по предоставлению услуг

$$Z(\tau) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ki}(\tau), \quad (5)$$

где $\alpha_{ki}(\tau)$ – это количественный показатель k -го компонента расходов на обеспечение услуги u_i в момент времени τ .

ЛСК требуется определять вероятные планы оказания услуг, их сроков и возврата. Для анализа эффективности реализации проекта и внесения корректирующих воздействий в ходе его выполнения предприятию необходимо производить расчёты показателей по предоставлению услуг за определенный период времени t .

³ Сиразетдинов Т.К. Динамическое моделирование экономических объектов. – Казань: Фэн, 1996. – 223 с.

Основные показатели функционирования ЛСК, такие как оценка потенциальной мощности услуг $E(t)$, мощность освоенных услуг (текущих и завершённых) $y(t)$, оценка мощности неосвоенных услуг $E_n(t)$, суммарный доход $H(t)$; суммарные затраты $G(t)$, прибыль $PR(t)$ и рентабельность $RN(t)$ рассчитываются методами численного интегрирования и определяются соотношениями следующего вида:

$$E(t) = \int_{\tau_0}^t e(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где функция $e(\tau)$ определяет оценку потенциальной интенсивности оказания услуг ЛСК в момент времени τ ;

$$y(t) = \int_{\tau_0}^t (u(\tau) + w(\tau)) d\tau, \quad (7)$$

где функции $u(\tau)$ и $w(\tau)$ определяют соответственно объёмы текущих и завершённых услуг ЛСК в момент времени τ ;

$$E_n(t) = E(t) - y(t), \quad (8)$$

$$H(t) = \int_{\tau_0}^t \sum_{i=1}^n h_i(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где функция $h_i(\tau)$ определяет объём доходов от i -го вида услуги в момент времени τ ;

$$G(t) = \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^s z_j(\tau) d\tau, \quad (10)$$

где функция $z_j(\tau)$ определяет объём расходов на реализацию j -го вида услуги в момент времени τ ;

$$PR(t) = H(t) - G(t), \quad (11)$$

$$RN(t) = PR(t) / G(t). \quad (12)$$

В соотношениях (6)–(10) характеристики, относящиеся к количественным показателям грузооборота и показателям эффективности выполнения логистических операций, учитываются в функциях $e(\tau)$, $u(\tau)$, $w(\tau)$, $h(\tau)$ и $z(\tau)$. Процесс грузооборота оценивается по общепринятым показателям, таким, например, как: пропускная способность склада, грузооборот склада, себестоимость грузовой переработки, коэффициент использования складской площади, уровень механизации складских работ, трудоёмкость и др.

Технология решения задач на данной модели базируется на методологии крупноблочного модульного программирования и позволяет реализовать как параллелизм по управлению, так и параллелизм по данным. Такое эффективное распараллеливание вычислений обеспечивает возможность оперативного проведения многовариантных расчётов с целью определения оптимальных показателей эффективности и стабильности развития процессов функционирования ЛСК. Рассматриваемая технология реализована в виде программного комплекса «Пакет моделирования складских процессов» (Warehouse Modelling Package – WMP). Функциональное наполнение пакета WMP состоит из программ, моделирующих процессы функционирования ЛСК и реализующих вы-

числительные операции над объектами (параметрами) аналитической модели. Системная часть пакета WMP включает конструктор программ, осуществляющий автоматический синтез параллельных расчётных программ по непроедурной постановке задачи вида: «зная M по заданным значениям параметров x_1, x_2, \dots, x_n вычислить значения параметров y_1, y_2, \dots, y_k », где M представляет собой описание параметров и вычислительных операций аналитической модели и информационно-логических связей между ними. Высокоуровневый пользовательский интерфейс пакета WMP обеспечивает специалисту-«предметнику» возможность формулировки постановок его исследовательских задач в терминах предметной области. В качестве средства поддержки параллелизма конструктор использует коммуникационную библиотеку Parallel Virtual Machine, позволяющую порождать динамические вычислительные процессы в разнородной среде. Синтезированные параллельные программы автоматически запускаются и выполняются в РВС, например, на вычислительном кластере.

Имитационная модель ЛСК. В качестве среды моделирования ЛСК выбрана система GPSS World, получившая широкое распространение для анализа дискретных процессов, благодаря наличию в своем составе средств построения адекватных, детализируемых с необходимой степенью точности моделей таких процессов.

В рамках диссертационной работы был решён ряд практических задач, одна из них – моделирование процесса ПРР для ЛСК. Для этой цели была разработана имитационная модель, включающая следующие сегменты: поступление случайных заявок, формирование плановых заявок, разгрузка товара, приёмка товара, грузопереработка, сбор возвратных и невозвратных отходов, отпуск товара, дистрибуция, погрузка, имитация неисправностей технических средств, продвижение модельного времени. Транзактами (динамическими объектами) в данной модели являются: заявка клиента, заявка кладовщика, заявка покупателя, отказы и сбои оборудования, модельное время. Для имитации ПРР использовались следующие многоканальные устройства, предназначенные для имитации оборудования, осуществляющего параллельную обработку: менеджеры, кладовщики, продавцы, грузчики, водители электропогрузчиков, специалисты по обслуживанию и ремонту технических средств, электропогрузчики, посты загрузки/отгрузки, лифты, технические средства. Транзакты и устройства имитационной модели связаны с объектами концептуальной модели. Разработана библиотека сегментов имитационной модели типовых процессов функционирования предприятия.

Интенсивность возникновения случайных событий в модели реализуется с помощью библиотечных генераторов случайных чисел GPSS World на основе статистической информации о функционировании реальной системы. Для оценки и прогнозирования показателей эффективности функционирования ЛСК автором диссертации разработана библиотека процедур на встроенном в GPSS World языке программирования PLUS.

Методика анализа, оценки и прогнозирования динамики основных показателей функционирования производственного объекта. Данная методика основана на подходах к моделированию сложных систем, ориентирована на использование РВС для проведения многовариантных расчётов и направлена на

интеграцию аналитического и имитационного моделирования. Предложенная методика позволяет более детально анализировать деятельность складского комплекса в динамике и выполнять быструю точечную реализацию дополнительных средств моделирования процессов функционирования ЛСК, не представленных в используемых системах управления этими комплексами. Основные этапы методики представлены на рис. 2. Разработана инструментальная система, обеспечивающая частичную или полную автоматизацию всех этапов данной методики.

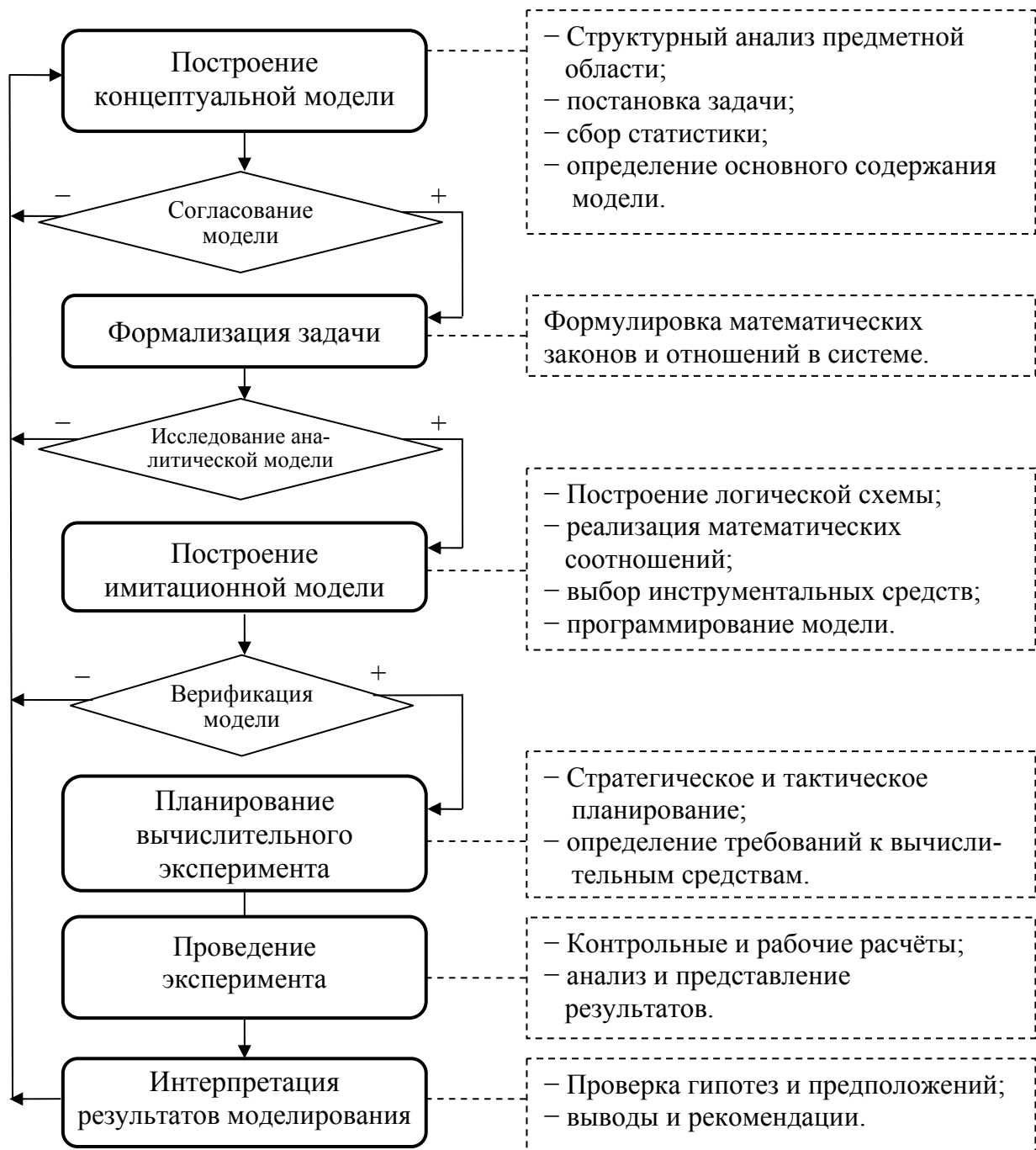


Рис. 2. Методика анализа, оценки и прогнозирования динамики основных показателей функционирования производственного объекта

В третьей главе разработана методика планирования и проведения вычислительного эксперимента, приведены примеры применения разработанной методики для решения конкретных практических задач. Методика планирования и проведения вычислительного эксперимента включает семь основных этапов:

1. Подготовка исходных данных, необходимых для проведения эксперимента: выбор GPSS-модели и дополнительных файлов, подключаемых к модели, а также файлов с вариантами исходных данных.

2. Планирование числа прогонов модели для перехода в рабочий режим и функционирования непосредственно в рабочем режиме.

3. Подготовка паспорта задания – спецификации процесса решения задач, содержащей информацию о требуемых вычислительных ресурсах, исполняемых прикладных программах, входных/выходных данных, а также другие необходимые сведения.

4. Постановка задания в очередь кластерной системы управления прохождением заданий (СУПЗ).

5. Выполнение задания в РВС и передача результатов моделирования на машину, с которой производился запуск.

6. Сбор результатов вычислительного эксперимента (данных о процессах моделирования и отчётах системы GPSS World, а также лог-файлах СУПЗ).

7. Анализ полученных данных средствами дисперсионного и регрессионного анализа. Автором диссертационной работы реализованы средства проведения дисперсионного анализа (рис. 3), которые в отличие от стандартных средств GPSS World позволяют использовать неограниченное число факторов и их уровней, обеспечивают возможность параллельного проведения полного и частичного факторного эксперимента, автоматизацию процессов его планирования и выполнения. Регрессионный анализ проводится средствами GPSS World.

| Имя фактора | Тип данных | Уровень 1 | Уровень 2 | Уровень 3 |
|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| A | | | | |
| B | | | | |
| C | | | | |
| D | | | | |
| E | | | | |
| F | | | | |

Рис. 3. Форма для проведения дисперсионного анализа

Все этапы данной методики полностью или частично автоматизированы. Ниже приведены результаты решения ряда практических задач с использованием рассмотренной методики.

1. *Анализ фондоёмкости выпускаемой продукции для производственного объекта (ООО «Завод «Родник»)*. Исследуемый производственный объект осуществляет выпуск напитков с использованием различных технологических линий и ряда складских объектов для хранения выпускаемой продукции. Спецификой решения данной задачи является необходимость моделирования как производственных, так и складских процессов. Комплексное моделирование

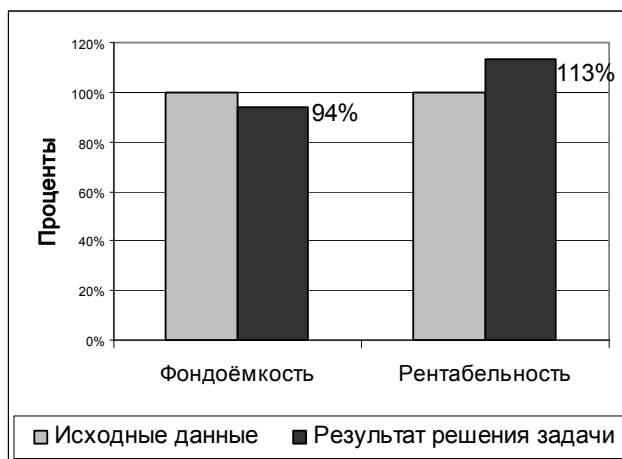


Рис. 4. Сравнение показателей фондоёмкости и рентабельности

производственно-складских процессов с использованием аналитических и имитационных методов исследования выполнено с помощью разработанного «Пакета моделирования складских процессов» (WMP). На основании результатов исследования управленческими службами производственного объекта были внесены коррективы в ассортимент и объём выпускаемой продукции, а так же проведена оптимизация схемы складирования товаров, что привело к снижению фондоёмкости продукции и повышению её рентабельности (рис. 4).

2. *Моделирование процесса ПРР для ООО «Иркутский хладокомбинат»*. Исследуемый складской комплекс осуществляет операции с входными и выходными материальными потоками как по плановым, так и по случайным заявкам. В плановых заявках, формирующихся ежедневно, содержится информация о времени поступления/убытия груза, времени обслуживания заявки, об объёме груза и требуемых для проведения работ ресурсах. Интенсивность поступления случайных заявок различна, поступление/убытие ТС различной грузоподъёмности подчиняется определенному вероятностному распределению. Для обслуживания заявок используются технические и человеческие ресурсы: электропогрузчики, водители электропогрузчиков, грузчики и кладовщики. Специфической особенностью проведения ПРР, как правило, не реализуемой в современных WMS, является необходимость учёта этажности складского комплекса и использования лифтов. Имитировалась работа складского комплекса в течение одного месяца. Результаты моделирования (таблица 1) были использованы в управленческих службах хладокомбината при разработке методики формирования плановых и учёта случайных заявок клиентов, формировании состава и графика работ бригад грузчиков и кладовщиков, планировании технического обслуживания и обновления парка электропогрузчиков.

На основе данных таблицы 1 оптимальным вариантом формирования плановых и случайных заявок был выбран вариант В5, в варианте В6 показатели грузооборота выходят за область допустимых значений, определяемых пропускной способностью склада.

Таблица 1

Результаты моделирования плановых и случайных заявок

| Показатели | Варианты | | | | | | |
|--|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | В1 | В2 | В3 | В4 | В5 | В6 | В7 |
| Грузооборот по случайным заявкам, т | 7252 | 6652 | 7070 | 6993 | 10334 | 10817 | 10164 |
| Грузооборот по плановым заявкам, т | 2668 | 2668 | 2668 | 2668 | 2668 | 2668 | 2668 |
| Коэффициенты полезного использования кар/ грузчиков/ кладовщиков на отгрузке | 0.680 | 0.827 | 0.906 | 0.737 | 0.954 | 0.872 | 0.923 |
| | 0.824 | 0.858 | 0.907 | 0.727 | 0.957 | 0.873 | 0.961 |
| | 0.022 | 0.022 | 0.047 | 0.033 | 0.072 | 0.069 | 0.069 |
| Коэффициенты полезного использования кар/ грузчиков/ кладовщиков на загрузке | 0.755 | 0.748 | 0.921 | 0.899 | 0.922 | 0.910 | 0.928 |
| | 0.833 | 0.824 | 0.921 | 0.933 | 0.931 | 0.933 | 0.948 |
| | 0.018 | 0.018 | 0.037 | 0.039 | 0.067 | 0.066 | 0.068 |

3. Моделирование уровня обслуживания ПРР для ООО «Иркутский хладокомбинат». Исследуемый ЛСК предоставляет услуги по проведению ПРР при использовании авто- и железнодорожного транспорта различной грузоподъемности. Существуют нормативы проведения ПРР с учётом вида грузового транспорта, вида и категории груза. Невыполнение данных нормативов влечёт за собой штрафные санкции. Необходимо определить такое количество ресурсов на складе (человеческих и технических), чтобы: среднее время ожидания транспортом ПРР было меньше заданного значения a ; процент времени простоя персонала склада не превышал заданного значения b ; показатели процесса ПРР оставались в допустимых пределах. Результаты моделирования были использованы в управленческих службах хладокомбината при разработке нормативов ПРР (таблица 2) и определении категорий «лояльных» клиентов.

Таблица 2

Результаты моделирования уровня обслуживания ПРР

| Показатель | Число бригад, единиц | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|-------|-------|------|-------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Коэффициент изменения дохода | 1.04 | 1.06 | 1.09 | 1.09 | 1.11 |
| Коэффициент изменения себестоимости | 0.81 | 0.88 | 0.94 | 1.08 | 1.18 |
| Коэффициент изменения прибыли | 0.23 | 0.18 | 0.15 | 0.01 | -0.07 |
| Рентабельность, % | 28.40 | 20.45 | 15.96 | 0.93 | -5.93 |
| Коэффициент простоя | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.31 | 0.32 |
| Среднее время в очереди, мин | 4.86 | 2.54 | 2.02 | 1.96 | 1.95 |

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что при использовании двух, пяти и шести бригад для проведения ПРР оцениваемые показатели выходят за область допустимых значений, определенную экспертом. Из оставшихся значений по мажоритарному принципу целесообразно выбрать использование трёх бригад.

Также было проведено исследование влияния числа клиентов различных категорий на доход от ПРР. Исходя из моделируемых ограничений на объём хранения и пропускную способность склада, а также характеристик категорий клиентов (объём грузооборота, стоимость ПРР, интенсивность прихода и т. п.), оптимальным вариантом стало наличие 3, 6, 1, 11, 1 и 0 единиц клиентов для пяти исследованных категорий клиентов.

Имитационные модели разработаны в системе GPSS World Student Version, функционирующей под управлением операционных систем семейства Windows. Имитационное моделирование выполнялось на кластере разнородных персональных компьютеров МИЭЛ ИГУ с OS Windows NT и СУПЗ Condor (при решении различных задач число доступных компьютеров кластера изменялось от 4 до 20 единиц) и кластере из 12 однородных персональных компьютеров ИДСТУ СО РАН с OS Windows XP и СУПЗ Condor. Общее число доступных ядер изменялось от 8 до 64 единиц. Параллельные вычисления для исследования аналитической модели выполнялись на кластерах МВС-1000 и «Blackford» Суперкомпьютерного центра при ИДСТУ СО РАН (<http://hpc.icc.ru/>). Число вариантов данных в вычислительных экспериментах изменялось от 100 до 10 000. Для обработки одного варианта данных генерировалось индивидуальное задание для СУПЗ Condor.

В качестве примера эффективности разработанной методики на рис. 5 и 6 приводится сравнение усреднённых значений времени автоматизированного и неавтоматизированного моделирования для решения задачи «Моделирование уровня обслуживания ПРР».

Применение средств автоматизации вычислительного эксперимента позволило в значительной степени сократить трудозатраты на проведение имитационного моделирования, особенно на этапах формирования паспортов заданий, сбора полученных данных, что позволяет сделать вывод об эффективности использования данного инструментального комплекса для решения подобных задач.

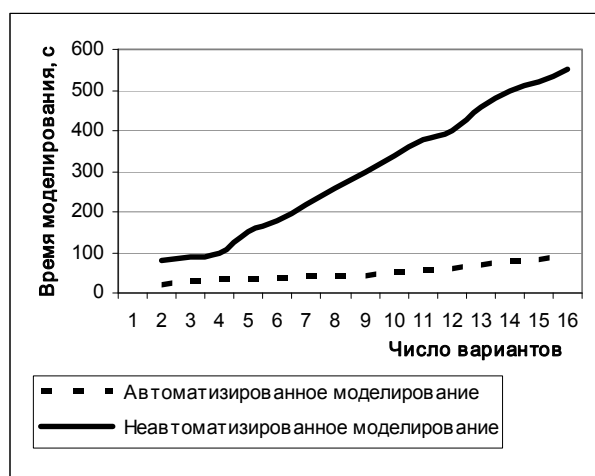


Рис. 5. Динамика роста времени моделирования в зависимости от увеличения числа вариантов данных

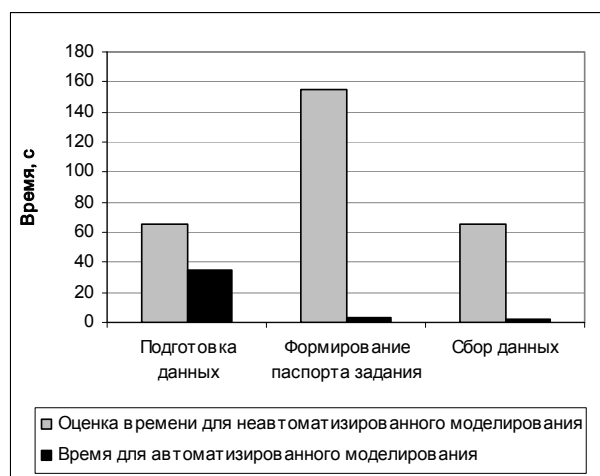


Рис. 6. Сравнение временных затрат на разных этапах проведения эксперимента для одного варианта данных

В заключении приведены основные результаты проведённых исследований. **Приложения** включают исходные тексты имитационных моделей на языке GPSS, примеры экспериментальных данных, акты о внедрении и другие дополнительные материалы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана новая интегрированная модель анализа и оценки показателей эффективности функционирования логистических складских комплексов, базирующаяся в отличие от известных на комплексном использовании концептуальной, аналитической и имитационной моделей процессов исследуемого объекта.

2. Предложена новая методика анализа и оценки динамики основных показателей функционирования производственного объекта, основанная на поэтапном применении соответствующих уровней интегрированной модели логистического складского комплекса.

3. Создан инструментальный комплекс «Пакет моделирования складских процессов» (WMP), реализующий предложенную методику с использованием высокопроизводительных вычислительных систем и обеспечивающий тем самым высокую эффективность проведения расчётов.

4. Предложена новая методика планирования и проведения вычислительных экспериментов по имитационному моделированию логистических складских комплексов с использованием моделей на языке GPSS в PBC.

5. Разработаны инструментальные средства автоматизации предложенной методики планирования и проведения вычислительных экспериментов по имитационному моделированию логистических складских комплексов, обеспечивающие по сравнению с известными дополнительные функциональные возможности, в том числе подготовку и проведение как полного, так и частичного факторного анализа с требуемым числом факторов и их уровней на основе многовариантных расчётов в PBC.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Башарина О. Ю. Моделирование складской логистики: разработка и комплексирование в Orlando Tools / О. Ю. Башарина, С. А. Горский // Программные продукты и системы. – 2012. – № 1 (97). – С. 89–91.

2. Башарина О. Ю. Методика анализа, оценки и прогнозирования динамики основных показателей функционирования складского логистического комплекса / О. Ю. Башарина, С. И. Носков // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11. – Ч. 6. – С. 1103–1107.

3. Башарина О. Ю. Решение задач складской логистики на основе применения методологии системного анализа / О. Ю. Башарина, С. И. Носков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 1 (41). – С. 70–75.

4. Методика и инструментальные средства автоматизации проведения вычислительных экспериментов по имитационному моделированию сложных систем / О. Ю. Башарина, В. И. Дмитриев, А. С. Корсуков, С. И. Носков, А. Г. Феоктистов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/115-12162> (дата обращения: 21.02.2014).

5. Моделирование логистических складских комплексов с использованием вычислительной техники / В. И. Дмитриев, О. Ю. Башарина, А. Г. Феоктистов, А. В. Ларина // Экономика и управление. – 2010. – № 6 (56). – С. 88–92.

Публикации по теме диссертации в других научных изданиях:

6. Башарина О. Ю. Моделирование складской логистики в распределённой вычислительной среде / О. Ю. Башарина // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – Иркутск : ИрГУПС, 2012. – Вып. 10. – С. 79–84.

7. Башарина О. Ю. Аналитическая модель логистического складского комплекса / О. Ю. Башарина // Моделирование. Теория, методы и средства : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2010. – С. 33–37.

8. Башарина О. Ю. Моделирование уровней обслуживания погрузочно-разгрузочных работ складского комплекса для разнородных грузов / О. Ю. Башарина // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Иркутск : ИрГУПС, 2013. – Т. 1. – С. 355–358.

9. Башарина О. Ю. Задача исследования и оптимизации функционирования логистических складских комплексов / О. Ю. Башарина // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы V междунар. науч.-практ. конф. – Иркутск : ИрГУПС, 2014. – Т. 1. – С. 435–440.

10. Башарина О. Ю. Прогнозирование динамики показателей функционирования складского комплекса на основе имитационного моделирования / О. Ю. Башарина // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – СПб. : Информ. издат. учеб.-науч. центр «Стратегия», 2013. – Т. 1. – С. 126–132.

11. Башарина О. Ю. Методы и инструментальные средства автоматизации имитационного моделирования сложных систем / О. Ю. Башарина, А. С. Корсуков, А. Г. Феоктистов // Инновационное развитие современной науки : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : РИЦ БашГУ, 2014. – Ч. 3. – С. 28–35.

12. Инструментальная система для автоматизации построения имитационных моделей / О. Ю. Башарина, В. И. Дмитриев, А. В. Ларина, А. Г. Феоктистов // Моделирование. Теория, методы и средства : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск : Лик, 2008. – Ч. 1. – С. 38–39.

13. Башарина О. Ю. Метод отображения качественных характеристик логистических операций в числовые / О. Ю. Башарина // Вестник Международного института экономики и лингвистики ИГУ. Сер.: Товароведение и экспертиза товаров. – Иркутск : ИГУ, 2011. – № 2. – С. 63–65.

14. Башарина О. Ю. Технология моделирования логистических складских комплексов в распределённой вычислительной среде / О. Ю. Башарина // Материалы VII Восточно-Азиатского экономического и культурного форума. – Иркутск : ИГУ, 2011. – С. 83–87.

15. Моделирование торгово-складского комплекса в распределённой вычислительной среде / О. Ю. Башарина, А. В. Ларина, Н. Г. Суханова, А. Г. Феокистов // Моделирование. Теория, методы и средства : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2006. – Ч. 3. – С. 28–32.

16. Башарина О. Ю. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности функционирования логистического складского комплекса / О. Ю. Башарина // Ляпуновские чтения : материалы конф. – Иркутск : РИО ИДСТУ СО РАН, 2011. – С. 8.

17. Башарина О. Ю. Моделирование современных логистических складских комплексов с использованием высокопроизводительных / О. Ю. Башарина // Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях : тез. докл. IV Всерос. конф. – Иркутск : РИО ИДСТУ СО РАН, 2014. – С. 6.