

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Школа транспортной инженерии и логистики им.М.Тынышпаева
направление «Логистика»

Юнусов Дильмурат Рашидинович

Моделирование логистических систем дистрибутивных складов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М11302 – Логистика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Школа транспортной инженерии и логистики им.Тынышбаева
(наименование института)

УДК 656.2.073

На правах рукописи

Юнусов Дильмурат Рашидинович

(Ф.И.О. обучающегося)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)

На соискание академической степени магистра

Название диссертации Моделирование логистических систем
дистрибутивных складов

Направление подготовки 7M11302 – Логистика
(шифр и наименование образовательной программы)

Научный руководитель
к.т.н., ассоциированный профессор
(ученая степень, звание)

Избаирова А. С.
подпись Ф.И.О.
«__» 20__ г.

Рейсент
к.т.н., ассоциированный профессор, AlmaU
(ученая степень, звание)

Увалова А.Б.
подпись Ф.И.О.
«__» 20__ г.

Норм контроль
к.т.н., ассоциированный профессор
(ученая степень, звание)

Болаткызы С.
подпись Ф.И.О.
«__» 20__ г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

И. о. руководителя
направления «Логистика»
к.т.н., ассоциированный
профессор

Бектилезов А. Ю.
подпись Ф.И.О.
«__» 20__ г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Школа транспортной инженерии и логистики им.Тынышбаева
Кафедра «Логистика»

7М11302 – Логистика

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель направления
«Логистика», к.т.н.,
ассоциированный профессор
 Муханова Г.С.
« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Юнусову Дильмурату Рашидиновичу

Тема: «Моделирование логистических систем дистрибутивных складов»

Утверждена приказом Член Правления-Проректор по академическим вопросам Жаутиков
Ф.Б. №548-П/О от 04.12.2023г.

Срок сдачи законченной диссертации « ____ » _____ 20 ____ г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Теоретическое обоснование роли дистрибутивных складов в логистических системах в
сфере товаров постоянного спроса и анализ современных подходов к их проектированию и
управлению.

б) Сравнительный обзор программных средств моделирования логистических систем, с
акцентом на среду AnyLogic и её применимость к задачам складской логистики.

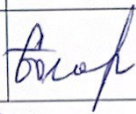
в) Разработка имитационной модели логистической системы дистрибутивного склада,
отражающей реальные параметры движения потоков и ресурсов.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическое обоснование роли дистрибутивных складов в логистических системах в сфере товаров постоянного спроса и анализ современных подходов к их проектированию и управлению	Февраль 2024	
Сравнительный обзор программных средств моделирования логистических систем, с акцентом на среду AnyLogic и её применимость к задачам складской логистики.	Июнь 2024	
Разработка имитационной модели логистической системы дистрибутивного склада, отражающей реальные параметры движения потоков и ресурсов	Март 2025	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию
с указанием относящихся к ним разделов диссертации

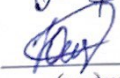
Наименование разделов	Консультанты, ФИО. (уч. Степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Болаткызы С., к.э.н, ассоциированный профессор	14.06.2025	

Научный руководитель


(подпись)

Избаева А. С.
ФИО

Задание принял к исполнению обучающийся


(подпись)

Юнусов Д. Р.
ФИО

Дата

«___» _____ 20__ г

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ДИСТРИБУТИВНЫХ СКЛАДОВ	12
1.1 Понятие и роль дистрибутивных складов в логистической цепи ТПС	12
1.2 Классификация логистических систем	14
1.3 Основы управления логистикой и стратегическое планирование в ТПС	16
1.4 Практики и подходы в логистических системах: Россия, Казахстан и зарубежный опыт	20
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТРИБУТИВНЫХ СКЛАДОВ	28
2.1 Подходы к моделированию логистических систем	29
2.2 Сравнительный анализ программных средств имитационного моделирования (AnyLogic, Arena, FlexSim, Simul8 и др.)	32
2.3 Возможности AnyLogic и его применение для моделирования дистрибутивных складов	36
2.4 Методология построения имитационной модели склада	40
2.5 Постановка задачи: итеративный анализ конфигураций склада для оптимизации соотношения «стоимость – эффективность»	43
3 СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ В СРЕДЕ ANYLOGIC, ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗ С ПОМОЩЬЮ ИТЕРАЦИЙ	47
3.1 Описание модели	47
3.2 Проведение итераций моделирования при различных параметрах	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	64
ПРИЛОЖЕНИЕ А	68
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	74

АННОТАЦИЯ

Объем магистерской диссертации: 59 страниц, включая 10 иллюстраций и 4 таблицы. Использовано 39 источников.

Ключевые слова: логистика, дистрибутивный склад, товары постоянного спроса, AnyLogic, имитационное моделирование, оптимизация ресурсов.

В данной выпускной квалификационной работе рассматривается моделирование логистической системы дистрибутивного склада товаров повседневного спроса с использованием среды AnyLogic. Целью исследования являлось выявление оптимальной конфигурации складских ресурсов, обеспечивающей достижение целевых логистических показателей (уровень OTIF, время выполнения заказов, общие затраты) при минимальных издержках. На основе теоретического анализа особенностей дистрибутивных центров в ТПС-секторе и сравнительного обзора программных средств моделирования была разработана имитационная модель склада. В ходе практической части выполнены серии итераций, варьирующих количество вилочных погрузчиков и зон отгрузки/разгрузки. Результаты моделирования позволили выявить узкие места системы, рассчитать влияние различных параметров на эффективность, и определить оптимальный сценарий функционирования склада. Работа подтверждает высокую практическую ценность применения имитационного моделирования в логистике.

АНДАТПА

Магистрлік диссертацияның көлемі: 59 бет, оның ішінде 10 иллюстрация және 4 кесте. 39 ереккөз пайдаланылған.

Түйін сөздер: логистика, дистрибутивтік қойма, күнделікті сұраныс тауарлары, AnyLogic, имитациялық модельдеу, ресурстарды оңтайландыру.

Бұл бітіру жұмысы күнделікті тұтыну тауарларына арналған дистрибутивтік қойманың логистикалық жүйесін AnyLogic моделдеу ортасында модельдеуге арналған. Зерттеудің мақсаты — қойма ресурстарының оңтайлы конфигурациясын анықтау, ол минималды шығынмен логистикалық мақсатты көрсеткіштерге (ОТІҒ деңгейі, тапсырысты орындау уақыты, жалпы шығындар) қол жеткізуге мүмкіндік береді. Теориялық бөлімде ТПС секторындағы дистрибутивтік орталықтардың ерекшеліктері мен моделдеу бағдарламаларына салыстырмалы талдау жүргізіліп, қойманың имитациялық моделі жасалды. Практикалық бөлімде жүк тиегіштер мен тиеу/түсіру аймақтарының саны өзгертілген итерация сериялары орындалды. Модельдеу нәтижелері жүйенің осал тұстарын анықтап, әртүрлі параметрлердің тиімділікке әсерін бағалауға және қойманың оңтайлы жұмыс сценарийін таңдауға мүмкіндік берді. Жұмыс логистикада имитациялық модельдеудің жоғары практикалық құндылығын көрсетеді.

ABSTRACT

Volume of the master's thesis: 59 pages, including 10 illustrations and 4 tables. A total of 39 sources were used.

Keywords: logistics, distribution warehouse, fast-moving consumer goods, AnyLogic, simulation modeling, resource optimization.

This thesis focuses on modeling the logistics system of a distribution warehouse for fast-moving consumer goods (FMCG) using the AnyLogic simulation environment. The aim of the research was to determine the optimal configuration of warehouse resources that ensures the achievement of key logistics performance indicators (OTIF level, order fulfillment time, total costs) with minimal expenses. Based on the theoretical analysis of distribution centers in the FMCG sector and a comparative review of modeling tools, a simulation model of the warehouse was developed. In the practical part, a series of iterations were conducted, varying the number of forklifts and loading/unloading zones. The modeling results helped identify system bottlenecks, assess the impact of various parameters on efficiency, and determine the optimal operational scenario for the warehouse. The work confirms the high practical value of simulation modeling in logistics.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена ключевой ролью дистрибутивных складов (распределительных центров) в современных цепях поставок. В секторе товаров повседневного спроса (далее – ТПС) эффективная работа распределительных центров напрямую влияет на скорость и стоимость товародвижения, уровень сервиса для розничных сетей и удовлетворенность конечных потребителей [1]. По данным недавних обзоров, логистическая инфраструктура складов во многих регионах испытывает рост нагрузки и дефицит площадей [3]. Так, например, в Казахстане в 2024 году вакантность на рынке современных складских помещений снизилась до всего ~1%, что свидетельствует о высоком спросе на эффективные дистрибутивные мощности [4, 5]. В Москве и крупных городах России также отмечается необходимость расширения складских площадей – прогнозировалось, что до 2020 года только московскому региону потребовалось бы построить около 1,25–1,3 млн кв. м новых распределительных складов для удовлетворения спроса [6]. Зарубежный опыт демонстрирует стремительное развитие технологий складской логистики: возрастают масштабы автоматизации, применения систем управления складом и имитационного моделирования для оптимизации операций [7, 8]. В этих условиях моделирование логистических систем дистрибутивных складов приобретает особую значимость, позволяя на виртуальном уровне экспериментировать с конфигурацией и процессами склада, выявлять «узкие места» и принимать обоснованные управленческие решения без риска для реальных операций.

Цель исследования – разработать и обосновать методический подход к моделированию логистической системы дистрибутивного склада с использованием имитационного моделирования, а также провести анализ эффективности работы склада и вариантов ее повышения на основе имитационной модели. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- провести обзор теоретических основ логистических систем и дистрибутивных складов, раскрыть их сущность, классификацию и место в цепях поставок товаров повседневного спроса;
- проанализировать особенности организации дистрибутивных складов в России, Казахстане и за рубежом, выявить общие тенденции и отличия;
- изучить методологию имитационного моделирования применительно к логистическим системам, сравнить современные программные средства имитации (AnyLogic, Arena, FlexSim, Simul8) и обосновать выбор среды моделирования для поставленной задачи;
- предоставить подробный обзор функциональных возможностей выбранной среды (AnyLogic) в контексте моделирования складских процессов;

- formalizovat zadachu modelirovaniya raboty distributivnogo sklada (opisat' ob'ekt i granitsy modelirovaniya, klyuchevye protsessy, pokazateli effektivnosti);
- razrabotat' konceptual'nuyu i imitatsionnuyu model' funktsionirovaniya sklada v srede AnyLogic, provesti verifikatsiyu i validatsiyu modeli;
- sformirovat' plan imitatsionnogo eksperimenta, vkluchaya sennarii, parametry i kriteriiy otsenki, vypolnit' seriiy eksperimentov (iteratsiy) dlya otsenki effektivnosti tekuщей системы и альтернативных вариантов;
- proanalizirovat' rezul'taty modelirovaniya, opredelit' uzkie mesta i predlozhit' rekomendatsii po sovershenstvovaniyu raboty distributivnogo sklada;
- ocenit' ekonomicheskuyu i prakticheskuyu znachimost' predlagayemykh resheniy.

Объект исследования – логистическая система дистрибутивного склада, представляющая собой совокупность процессов приема, хранения, обработки и отгрузки товаров на складе, функционирующего в составе цепи поставок товаров повседневного спроса.

Предмет исследования – методы и модели имитационного моделирования, применяемые для анализа и оптимизации процессов дистрибутивного склада, а также показатели эффективности функционирования складской логистической системы (пропускная способность, время обработки заказов, уровень запасов и т. д.).

В работе использован комплекс методов: теоретический анализ литературы по логистике и управлению цепями поставок; сравнительный анализ программных продуктов для имитационного моделирования; метод имитационного моделирования для воспроизведения процессов склада; статистическая обработка результатов моделирования для оценки показателей эффективности и достоверности полученных данных; а также элементы экономического анализа для обоснования эффективности предложенных мер. Применение имитационного моделирования основано на общепринятой методологии: разработке концептуальной модели, сборе и обработке исходных данных, компьютерной реализации модели, проведении многократных прогонов (итераций) эксперимента и анализе результатов с использованием методов математической статистики.

Научная новизна работы заключается в адаптации современных методов имитационного моделирования к задаче анализа дистрибутивного склада ТПС-сектора с учётом региональных особенностей (российских и казахстанских условий). В работе предложен подход к формализации и моделированию складской логистической системы в интегрированной среде AnyLogic, позволяющий одновременно учитывать стохастические факторы (неравномерность поступления и отгрузки товаров, различие во временах операций) и оценивать несколько критериев эффективности [11]. Новизна проявляется также в сравнительном рассмотрении популярных

инструментальных средств имитации в приложении к складской логистике – проведена их качественная оценка, выявлены преимущества и ограничения с практической точки зрения пользователя. Кроме того, полученная имитационная модель может рассматриваться как прототип цифрового двойника склада, что соответствует актуальным мировым тенденциям цифровизации логистики [12].

Практическая значимость работы состоит в том, что результаты исследования и разработанная модель позволяют руководству логистических компаний и дистрибутивных центров проводить «виртуальные эксперименты» по улучшению работы склада. На основе имитационного эксперимента можно сравнивать различные сценарии организации складских процессов (например, изменение числа погрузочно-разгрузочной техники, оптимизация графика смен, внедрение новых технологий хранения и комплектования заказов и пр.) без вмешательства в реальную работу предприятия. Это снижает риски и затраты при принятии решений. Выявленные в ходе моделирования рекомендации могут быть внедрены на практике для повышения пропускной способности склада, сокращения времени обработки заказов, снижения издержек хранения и транспортировки, что в конечном счете повышает эффективность всей цепи поставок [8,13]. Материалы обзора литературы (в том числе анализ зарубежного опыта и отечественных особенностей) могут быть использованы при планировании новых логистических центров в Казахстане и России.

Информационная база исследования включает нормативно-методические документы по организации логистических систем, статистические данные и аналитические обзоры рынка складской недвижимости в России и Казахстане, научные публикации отечественных и зарубежных авторов по тематике управления цепями поставок, дистрибуции и имитационного моделирования. При отборе источников особое внимание уделялось работам, отражающим новейшие тенденции, а также материалам, раскрывающим специфику логистики Казахстана и России в сопоставлении с мировым опытом.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ДИСТРИБУТИВНЫХ СКЛАДОВ

1.1 Понятие и роль дистрибутивных складов в логистической цепи ТПС

Дистрибутивный склад (распределительный центр) – это специализированный складской комплекс, предназначенный для приемки товаров от производителей или оптовых поставщиков, их временного хранения, сортировки и последующей отгрузки розничным точкам или конечным потребителям [14]. В логистической цепи ТПС дистрибутивные склады играют ключевую роль связующего звена между производством и рынком сбыта. По сути, такой склад обеспечивает непрерывность товарного потока от производителя к множеству потребителей, служит буфером для выравнивания спроса и предложения и площадкой для консолидации и разбивки партий товаров [15].

Основные функции дистрибутивного склада в системе ТПС-логистики включают:

- консолидация грузов – объединение поступающей продукции от разных поставщиков в крупные смешанные партии для отправки по регионам сбыта. Это позволяет оптимизировать загрузку транспорта и снизить удельные транспортные издержки;
- сортировка и распределение – разукрупнение входящих партий на мелкие отгрузки для различных заказчиков (магазинов, точек продаж). На складе осуществляется комплектация заказов конкретных торговых точек (подбор ассортимента, упаковка, маркировка), что существенно повышает эффективность последующей доставки;
- создание ассортиментного запаса – накопление широкого ассортимента товаров разных категорий, позволяющее быстро удовлетворять разнообразный спрос потребителей. Для ТПС-сектора характерно большое число SKU (SKU – stock keeping unit, номенклатурные позиции), поэтому распределительный центр хранит запас по каждому наименованию, готовый к отгрузке;
- буферизация и выравнивание потока – хранение страховых и сезонных запасов, позволяющее компенсировать колебания спроса и предложения. Например, в период пикового спроса (праздники, акции) наличие запасов на складе обеспечивает бесперебойное снабжение магазинов;
- отгрузка оптимальными партиями – консолидация заказов и отправка товаров удобными для перевозки объемами (например, полными паллетами или машинами), что минимизирует логистические издержки на единицу продукции. Дистрибутивный склад позволяет группировать мелкие заказы в более крупные отправки;

- повышение скорости товародвижения – современные распределительные центры ТПС все чаще ориентированы на кросс-докинг, при котором товары практически не задерживаются на хранении, а сразу перенаправляются из зоны приемки в зону отгрузки [16]. Такая схема “dock-to-dock” (от ворот до ворот) минимизирует время обработки груза и сокращает складские запасы. Классическим примером является компания Walmart, внедрившая кросс-докинг-модель для ускорения движения товаров и снижения затрат на хранение [17].

Таким образом, дистрибутивный склад обеспечивает «правильный товар, в нужное время, в нужном месте», что является главной целью логистической системы. Без промежуточных складов было бы затруднительно своевременно снабжать тысячи торговых точек широким ассортиментом ТПС-товаров. По данным современных исследований, логистические цепочки ТПС чрезвычайно сложны, включают множество распределительных центров, фабрик, тысяч SKU и миллионы потребителей, что затрудняет их управление. Поэтому распределительные центры выступают неотъемлемым элементом устойчивости и эффективности таких цепей поставок. Как отмечают эксперты, распределительные центры повышают эффективность движения товаров, укрепляют связь между поставщиками и конечными потребителями, а их успешная работа жизненно важна для всей цепочки поставок [18].

Особенно значима роль распределительных центров в ТПС для обеспечения быстрого оборачиваемости товара. ТПС-товары имеют короткий жизненный цикл и высокий потребительский спрос, поэтому требуется оперативная доставка на полки магазинов. Скорость и точность исполнения заказов во многом зависят от уровня организации складской логистики. На интенсивных складах ТПС приоритетом является эффективность сборки заказов – минимизация времени обработки при сохранении качества комплектования. Различные торговые сети могут предъявлять разные требования к отгрузке (упаковке, маркировке, допустимым отклонениям по весу и объему и т.д.), и с одного распределительного центра зачастую требуется одновременно выполнять разноформатные отгрузки для множества сетей. Это накладывает высокие требования к системе управления складом (WMS) и к организации процессов, вынуждая склады внедрять современные технологии автоматизации, сортировки и управления запасами.

В зарубежной практике наблюдается тенденция к максимальной автоматизации и цифровизации распределительных центров ТПС. Крупные международные операторы (например, Amazon, Procter & Gamble, Unilever) оснащают склады автоматизированными конвейерами, робототехникой для отбора товаров, системами управления запасами в реальном времени и т.д. [19]. Это позволяет справляться с возросшей сложностью операций, связанной с развитием омниканальной торговли и e-commerce, где распределительные центры вынуждены обрабатывать как крупные отгрузки в розничные магазины, так и мелкие онлайн-заказы [20]. Возрастающая сложность операций стимулирует внедрение автоматических и цифровых решений для

ускорения обработки и движения товаров на складе. Благодаря этому распределительные центры способны поддерживать высокий уровень сервиса (своевременные поставки, полная прослеживаемость товаров) при одновременной оптимизации затрат.

Подводя итог, дистрибутивные склады в ТПС-секторе – это высокотехнологичные логистические узлы, выполняющие задачи аккумуляции, сортировки и ускоренного перемещения массовых потребительских товаров. Они обеспечивают эффективность и гибкость всей цепи поставок ТПС, позволяя производителям и ритейлерам держать баланс между минимальными запасами и максимальной доступностью товара для конечного потребителя.

1.2 Классификация логистических систем

Логистическая система – это совокупность взаимосвязанных элементов (звеньев цепи поставок), совместно выполняющих определенные логистические функции для достижения главной цели – доставки нужного товара в нужное время, в нужное место, в требуемом количестве и качестве при минимальных затратах [21]. Логистическая система формирует упорядоченную модель организации потоков ресурсов от источников до потребителей, охватывая весь путь от закупки сырья до распределения готовой продукции. В рамках такой системы различные участники (поставщики, производители, склады, транспорт, дистрибьюторы, розничные сети) действуют согласованно, чтобы обеспечить эффективность материальных, информационных и финансовых потоков.

Существует несколько подходов к классификации логистических систем. Одним из ключевых критериев является структура цепи поставок и количество посреднических звеньев между производителем и потребителем. По этому признаку выделяют следующие виды логистических систем:

Логистическая система с прямыми связями – это простейшая конфигурация, где товар движется напрямую от производителя к потребителю без промежуточных звеньев (складов или посредников). Пример – прямая поставка от фабрики в розничный магазин или к конечному клиенту. Подобные системы характерны для схем «производитель – потребитель», где объем поставок невелик или есть возможность индивидуальной доставки. Прямые связи минимизируют время и расстояние перемещения товара, однако могут приводить к снижению эффективности при масштабировании (например, рост транспортных затрат при разрозненных поставках малых партий).

Эшелонированная логистическая система – многоуровневая цепь поставок, в которой между производителем и конечным потребителем присутствуют один или несколько посредников (оптовики, дистрибьюторы, распределительные центры). Например, производитель отгружает продукцию

на региональный распределительный склад, оттуда товар поступает в местные склады или оптовые базы, а уже затем – в розничные точки. Эшелонированные системы распространены в ТПС-секторе, поскольку позволяют охватить широкую географию поставок, оптимизировать партии отгрузки и держать запасы ближе к рынкам сбыта. Недостатком может быть удлинение цикла поставки и усложнение координации, однако современные ИТ-системы (WMS/ERP) позволяют управлять многоэшелонными цепями достаточно эффективно.

Гибкая логистическая система – структура, способная в зависимости от ситуации функционировать как прямой канал или как эшелонированный [22]. Иными словами, производитель может работать с потребителями как напрямую, так и через посредников. Пример гибкой системы – когда крупный производитель ТПС осуществляет прямые поставки ключевым клиентам (например, национальным розничным сетям), минуя дистрибьюторов, но одновременно сотрудничает с региональными дистрибьюторами для охвата мелких магазинов. Такая гибридная модель повышает адаптивность цепи поставок: в нормальных условиях товары идут через склады дистрибьюторов (обеспечивая экономию на масштабе), а при всплеске спроса или для стратегических клиентов возможна быстрая прямая отгрузка.

Другим основанием классификации служит масштаб охвата и уровень интеграции логистической системы. Здесь обычно разграничивают макрологистические и микрологистические системы [22]:

Макрологистическая система – крупная межорганизационная система, охватывающая широкий экономический простор: отрасль, регион, страну или группу стран. Макрологистическая система представляет собой инфраструктуру экономики, объединяющую множество предприятий и организаций: производителей, торговые фирмы, складские и транспортные компании, терминалы, порты и т.д. Примерами макрологистических систем могут служить национальная система снабжения и распределения нефтепродуктов, глобальная сеть поставок автомобильных компонентов, евразийские транспортные коридоры. В макросистемах ключевым является межфирменная координация и стандартизация процессов, а также влияние государственной логистической политики, инфраструктуры и регуляtorики [9, 10].

Микрологистическая система – логистическая система уровня отдельного предприятия или группы тесно связанных предприятий. Как правило, микрологистическая система охватывает внутренние процессы компании (закупки, внутреннее производство, склады компании, распределение до непосредственных клиентов). Например, логистическая система торговой сети включает ее распределительные центры, транспортный парк и магазины; логистическая система промышленного предприятия – склады сырья, цехи, склады готовой продукции и сеть дистрибуции. В микрологистических системах элементы объединены единой

инфраструктурой и находятся под управлением одного бизнеса, что упрощает интеграцию информационных систем и оптимизацию «от конца до конца».

Кроме структурно-иерархических признаков, логистические системы можно классифицировать по функциональным областям [23]. Выделяют подсистемы логистики, соответствующие основным потоковым функциям: снабжение (закупки), производственная логистика, распределение (дистрибуция), складирование, транспортировка, управление запасами и др. Каждая из этих подсистем решает свою задачу, но в рамках целостной логистической системы предприятия они взаимосвязаны и подчинены общей стратегии. Например, эффективная снабженческая логистика (ритмичная поставка сырья) влияет на работу производственной логистики; складская логистика и транспортная логистика совместно обеспечивают выполнение планов распределения продукции.

Важно отметить, что границы логистической системы могут быть организационно размыты. В современных условиях многие предприятия образуют интегрированные цепи поставок, где логистические процессы нескольких компаний координируются как единое целое (концепции SCM – Supply Chain Management). В таких случаях говорят о металогистических системах или цепочках поставок, выходящих за рамки одной организации. Например, цепь поставок ТПС-продукции может включать производителя, логистического провайдера (3PL), дистрибьютора и ритейлера – вместе они образуют единую систему доставки продукта потребителю [3, 7].

Резюмируя, классификация логистических систем отражает многообразие конфигураций цепей поставок – от простых линейных связей до сложных многоуровневых сетей, от локальных внутрипроизводственных систем до глобальных распределенных сетей. Правильное понимание типа логистической системы помогает выбрать адекватные методы управления ею и оптимизации. Так, эшелонированные системы требуют особого внимания к управлению запасами на разных уровнях и синхронизации графиков поставок, а гибкие системы – к развитию. Макросистемы обычно опираются на стандарты и государственную поддержку (транспортная инфраструктура, таможня), тогда как микросистемы – на внутреннюю оптимизацию процессов предприятия. В дальнейшем изложении особое внимание будет уделено распределительной логистике (дистрибуции) в ТПС, которая, как правило, реализуется через эшелонированные системы с участием дистрибутивных центров.

1.3 Основы управления логистикой и стратегическое планирование в ТПС

Управление логистикой – это деятельность по планированию, организации и контролю эффективного перемещения и хранения товаров от

начальной точки (поставщика или производителя) до конечной точки (потребителя) [24]. Проще говоря, логистический менеджмент обеспечивает достижение цели «7R» (доставка нужного продукта, в нужном количестве, нужного качества, в нужное время, в нужное место, с минимальными затратами). В контексте рынка ТПС управление логистикой приобретает особое значение, так как от слаженности логистических процессов зависит наличие товаров на полках магазинов и удовлетворенность массового потребителя.

Основы логистического менеджмента включают несколько ключевых аспектов:

Планирование цепи поставок: на стратегическом уровне компания определяет конфигурацию своей логистической сети – сколько распределительных центров ей необходимо, где их разместить, каким транспортом осуществлять доставку, какие запасы держать на каждом звене. В секторе ТПС стратегическое планирование логистики часто начинается с решения о количестве и географии распределительных центров, исходя из стремления минимизировать время доставки до магазинов и затраты на транспорт. Например, крупные производители или ритейлеры ТПС могут содержать один центральный распределительный центр и несколько региональных, чтобы обеспечить 1-2-дневное покрытие доставки по всей территории присутствия. Решения в этой области принимаются на основе дизайна цепей поставок – анализа местоположения складов, транспортных маршрутов, издержек и сервисных требований [25].

Управление запасами: ТПС-товары характеризуются высокой оборачиваемостью, но одновременно колебания спроса (влияние сезонов, акций, трендов) могут приводить к дефицитам или излишкам. Логистический менеджмент должен определить оптимальную стратегию управления запасами – например, применять ли *Just-in-Time* подход с минимальными складами или, наоборот, создавать буферные запасы для страховки от перебоев [26]. В практике ТПС распространены методы анализа спроса и запасов (ABC/XYZ-анализ для сегментации SKU по важности и предсказуемости спроса, расчёт страховых запасов для высокостребованных позиций). Стратегически важны решения о размещении запаса: держать ли основной запас на центральном распределительном центре либо распределять по региональным складам ближе к рынкам сбыта.

Транспортная логистика и дистрибуция: в ТПС цепях высокий объем перевозок, зачастую мелкими партиями до множества точек (розничных магазинов). Поэтому планирование транспортных операций – еще один стратегический элемент. Компании выбирают между аутсорсингом перевозок специализированным 3PL-провайдером и развитием собственного транспортного парка. Также разрабатываются маршруты развоза (транспортное планирование) и графики поставок. Стратегическая задача – найти баланс между частотой доставки в магазины (уровнем сервиса) и оптимальной загрузкой транспорта (эффективностью). Например, многие

розничные сети внедряют практику milk-run – круговые маршруты, позволяющие одному грузовику доставить товар сразу в несколько магазинов по оптимальному пути, что снижает затраты.

Информационная поддержка и технология: современное управление логистикой невозможно без IT-систем. Для ТПС характерно использование систем управления цепями поставок (SCM-системы), *систем управления складом* (WMS) и *транспортом* (TMS) [27]. Эти инструменты помогают планировать пополнение запасов, отслеживать движения грузов, управлять складскими операциями в реальном времени. Стратегически важно интегрировать информационные потоки – например, обмен данными о продажах между ритейлером и поставщиком позволяет реализовать стратегии *CPFR* (совместное планирование, прогнозирование и пополнение). В условиях высокой динамичности ТПС-рынка цифровизация логистики обеспечивает прозрачность цепи поставок и оперативную реакцию на изменения спроса.

Кадровое и организационное управление: логистика – это еще и люди, принимающие решения и выполняющие операции. Стратегия управления логистикой затрагивает вопросы обучения персонала, формирования организационной структуры (например, централизованная логистическая служба vs децентрализованное управление по регионам), системы мотивации (показатели KPI – уровень сервиса, оборачиваемость запасов, издержки). В ТПС-секторе нередко практика создания центров компетенции по логистике внутри крупных корпораций или, наоборот, передачи логистических функций внешним экспертам (консалтинг, 4PL).

Особенности стратегического планирования логистики ТПС во многом определяются спецификой самого рынка товаров повседневного спроса:

Высокая чувствительность к времени и доступности товара. Покупатели ТПС ожидают, что нужный товар всегда будет в наличии. Поэтому логистическая стратегия ставит на первое место обеспечение сервисного уровня (например, поддержание заполненности полок магазинов не ниже 95-98%). Это требует надежности цепей поставок, наличия резервных маршрутов и поставщиков. Яркий пример – в период пандемии COVID-19 нарушения поставок привели к пустым полкам для ряда категорий, что заставило ТПС-компании пересмотреть стратегии и повысить устойчивость цепей. Сейчас многие фирмы закладывают в стратегические планы избыточность (*redundancy*) – дополнительные запасы, альтернативные источники поставок – ради обеспечения непрерывности снабжения.

Низкая маржинальность, компенсируемая объемами. В ТПС издержки логистики существенно влияют на прибыль, поскольку наценки на товары невелики. Стратегия обычно направлена на минимизацию логистических затрат при сохранении качества сервиса. Отсюда – стремление к повышению эффективности: укрупнение складов (экономия на масштабе), оптимизация транспортных схем, повышение производительности складских операций за счет автоматизации. Многие ТПС-операторы внедряют Lean Logistics (бережливую логистику), устраняя лишние звенья и операции. Например,

переход на кросс-докинг, когда это возможно, позволяет сократить расходы на хранение. Также практикуется аутсорсинг: передача 3PL-провайдерам задач, которые они могут выполнить дешевле (складирование, доставка) [28].

Высокая динамичность ассортимента и спроса. Логистическая стратегия должна быть гибкой, чтобы быстро адаптироваться к изменениям предпочтений потребителей, появлению новых продуктов, промоакциям конкурентов. Для этого применяются гибкие логистические системы (описанные выше), а также методы быстрого реагирования: сокращение циклов пополнения, частое обновление прогнозов, тесная связь логистики с маркетингом. Концепции типа QR (Quick Response) и ECR (Efficient Consumer Response) были разработаны именно для ТПС-ритейла, чтобы синхронизировать процессы производства, распределения и продаж в реальном времени [28].

Географический охват и инфраструктура. Крупные ТПС-компании зачастую работают на национальном или международном уровне, что требует учета инфраструктурных ограничений. Стратегическое планирование включает анализ транспортной инфраструктуры, выбор режимов транспорта (авто, ЖД, морской), учет таможенных процедур (для трансграничной логистики). Например, транснациональные производители могут строить региональные распределительные центры вблизи основных рынков (как Р&Г для СНГ – распределительный хаб в России, откуда товар идет по странам ЕАЭС). В Казахстане стратегия развития логистики ТПС должна учитывать протяженность территории и неравномерность распределения населения – это диктует необходимость нескольких опорных складских узлов (на юге, севере, западе страны) и использования железнодорожного сообщения для дальних перевозок.

В современных условиях логистические стратегии ТПС испытывают воздействие глобальных вызовов – санкций, политической нестабильности, роста цен на топливо, развития e-commerce. Например, в России после 2022 года ТПС-компании столкнулись с разрывом привычных международных цепей поставок и уходом ряда иностранных производителей. В ответ логистические службы вынужденно переориентировали поставки на новые регионы: стали искать новых поставщиков в странах Азии, Ближнего Востока, Латинской Америки. Одновременно возросла сложность логистики, появились дополнительные этапы (посредники в дружественных странах, консолидационные склады за рубежом). Стратегическое планирование теперь включает сценарии работы в условиях неопределенности, развитие локальных производств, импортозамещение [29].

Кроме того, усилилась ставка на цифровые технологии и аналитику [11]. Появляются «цифровые двойники» цепей поставок – виртуальные модели, позволяющие прогнозировать последствия тех или иных решений (например, закрытие одного маршрута или рост спроса на 20%) и подбирать оптимальные стратегии. В ТПС-логистике востребованы Big Data для прогнозирования

спроса, оптимизации маршрутов (например, с учетом пробок в городах), управления запасами в режиме онлайн.

Важный тренд – повышение координации с партнерами по цепи. Ритейлеры и производители внедряют совместные инициативы: обмен данными POS (point-of-sale) для пополнения запасов по фактическим продажам, совместное планирование акций, vendor-managed inventory (VMI), когда поставщик сам управляет запасом своего товара в распределительных центрах сети. Эти меры снижают общий запас в системе и улучшают обслуживаемость.

Наконец, устойчивое развитие и «зелёная» логистика становятся частью стратегического планирования. ТПС-компании, особенно международные, все чаще ставят цели по сокращению углеродного следа логистики: оптимизируют транспортные маршруты, обновляют автопарки на экологичные, используют возобновляемую энергетику на складах, переходят на возобновимую упаковку в поставках. Логистический менеджмент расширяет критерии эффективности, включая экологические показатели.

Подводя итог, управление логистикой ТПС – это многогранный процесс, сочетающий оперативное администрирование потоков и долгосрочное стратегическое планирование развития цепи поставок. Его основная задача – обеспечить баланс между стоимостью (эффективностью, минимальными затратами) и сервисом (максимальной доступностью товара для потребителя). Достижение этого баланса требует использования современных методов: оптимизационных моделей, имитационного моделирования, информационных систем и глубокого анализа данных о спросе и операциях. Дальнейшие главы будут посвящены моделированию логистических систем, что как раз и является инструментом выбора оптимальных решений в подобных сложных задачах.

1.4 Практики и подходы в логистических системах: Россия, Казахстан и зарубежный опыт

Логистические системы и подходы к управлению ими формируются под влиянием локальных условий рынка, инфраструктуры и уровня развития экономики. Рассмотрим основные практики организации дистрибутивной логистики и складского хозяйства в России, Казахстане и за рубежом.

В России современная логистическая отрасль начала активно развиваться с начала 2000-х, в период бурного роста ритейла и консолидации дистрибуции. Быстрый рост крупных торговых сетей (X5 Retail Group, «Магнит», «Ашан» и др.) потребовал создания масштабных распределительных центров по всей стране. В результате, сегодня у ведущих продовольственных ритейлеров РФ – десятки РЦ, покрывающих основные регионы и позволяющих централизованно управлять товаропотоками [30].

Например, X5 Retail Group (сети «Пятерочка», «Перекресток», «Чижик») по состоянию на 2022 г. эксплуатировала более 45 распределительных центров в разных областях РФ, суммарной площадью свыше 1 млн кв.м [31]. Такие РЦ обеспечивают ежедневные поставки в тысячи магазинов и работают в режиме высокой интенсивности.

Внедрение передовых технологий стало характерной чертой российской складской логистики последнего десятилетия. Многие новые склады – класса «А», со стеллажными системами высотного хранения, узкопроходными штабелёрами, конвейерными линиями, автоматическими сортировщиками. Активно используются WMS-системы (например, отечественные SOLVO, Pilot, а также SAP EWM), интегрированные с системами розничных продаж [27]. Практика кросс-докинга также получила распространение: особенно в дистрибуции продуктов с ограниченным сроком годности (молочная продукция, свежие овощи, хлеб). Крупнейший ритейлер «Магнит» известен тем, что значительную долю поставок в магазины осуществляет через кросс-докинговые операции в РЦ, что позволяет сократить запасы и время пребывания товара на складе.

Однако существуют и проблемные аспекты. География России требует преодоления больших расстояний, а инфраструктура (особенно складская) развита неравномерно. На начало 2020-х значительная часть современных складских мощностей сосредоточена в Московском регионе, Санкт-Петербурге и нескольких крупных городах-миллионниках [32]. Менее развитые регионы испытывают дефицит качественных складов и услуг 3PL. Тем не менее, рынок логистических услуг в РФ достаточно насыщен: работают международные 3PL (DHL, FM Logistic, DB Schenker до 2022 г.), сильные российские компании (ПЭК, «Логистика пятерочка» и др.), развиты транспортно-экспедиторские услуги. Доля аутсорсинга логистики постепенно растет [32].

По сравнению с Казахстаном, структура складского рынка РФ отличается большей ориентацией на ритейлера и производителя. Согласно отраслевому анализу, в 2018 г. около 35% складских площадей в России были заняты под товары дистрибьюторских компаний, тогда как в Казахстане этот показатель достигал 50%. Это говорит о том, что в РФ более весомую роль играют склады самих торговых сетей и производителей (т.е. цепочки более интегрированы вертикально), а доля независимых дистрибьюторов меньше. Логистические операторы, соответственно, ориентируются не только на дистрибьюторов, но и на прямое обслуживание ритейла и промышленности.

Последние кризисные годы (пандемия 2020, санкции 2022) заметно повлияли на подходы российских компаний к логистике. Наблюдается тренд на увеличение собственной логистической инфраструктуры и автономности: многие крупные поставщики и сети развивают собственные автопарки (так называемый «кэптивный» транспорт), инвестируют в собственные региональные распределительные платформы вместо полной зависимости от внешних 3PL. Как отмечает отраслевое исследование, в 2022–2023 гг. ряд

ТПС-компаний в РФ открыл новые региональные кросс-доки и центры консолидации для улучшения управления потоками внутри страны. Цель – повысить устойчивость и контроль над цепями поставок, даже ценой некоторого роста издержек. Одновременно сохраняется интерес к лучшим практикам – например, продолжается цифровизация (использование систем отслеживания грузов, аналитики больших данных для прогнозов спроса).

В сфере стратегического планирования логистики в России за последние годы усилилась роль государства в развитии инфраструктуры: строятся новые оптово-распределительные центры агропродукции при поддержке Минсельхоза, развивается сеть транспортно-логистических центров (ТЛЦ) на ЖД. Это создает базу для более эффективных логистических систем национального масштаба, интегрирующих производство, хранение и распределение на обширной территории.

Логистическая система Казахстана находится в стадии интенсивного развития, что обусловлено общим ростом экономики и стратегией республики по превращению в транзитный и торгово-логистический хаб региона. Тем не менее, пока внутренняя логистическая инфраструктура (в частности, складская сеть) отстает по масштабам и качеству от более развитых рынков.

По данным на 2018 год, общая площадь современных складских помещений в РК составляла около 4,17 млн кв. м, что соответствует лишь ~227 кв. м складской площади на 1000 жителей. Для сравнения, в европейских странах этот показатель достигает 420 кв. м на 1000 жителей. То есть обеспеченность населения складскими мощностями в Казахстане почти вдвое ниже, чем в Европе, что свидетельствует о дефиците складской инфраструктуры [33]. Аналитики оценивают потенциальную емкость рынка складов Казахстана примерно в 7,73 млн кв. м, следовательно, текущий объем должен почти удвоиться, чтобы удовлетворить потребности экономики. Особенно не хватает складов высокого класса («А») в регионах за пределами южного мегаполиса Алматы. На рисунке 1 видно, что за последние 4 года, ситуация с дефицитом складских площадей актуальна из года в год, несмотря на реализацию и открытие новых складских площадей, рост торговли несопоставим с ростом новых складских площадей. Так, в 2023 году, после стабилизации торговли после пандемии Covid-19, максимально всего 1% складских площадей были доступны в Казахстане. В 2024 году ситуация не сильно улучшилась – рост вакантных складских площадей вырос только на 0.6%, что подтверждает актуальность и необходимость в построении и

разработки новых складских площадей, которые бы подходили для индустрии товаров народного потребления [33].

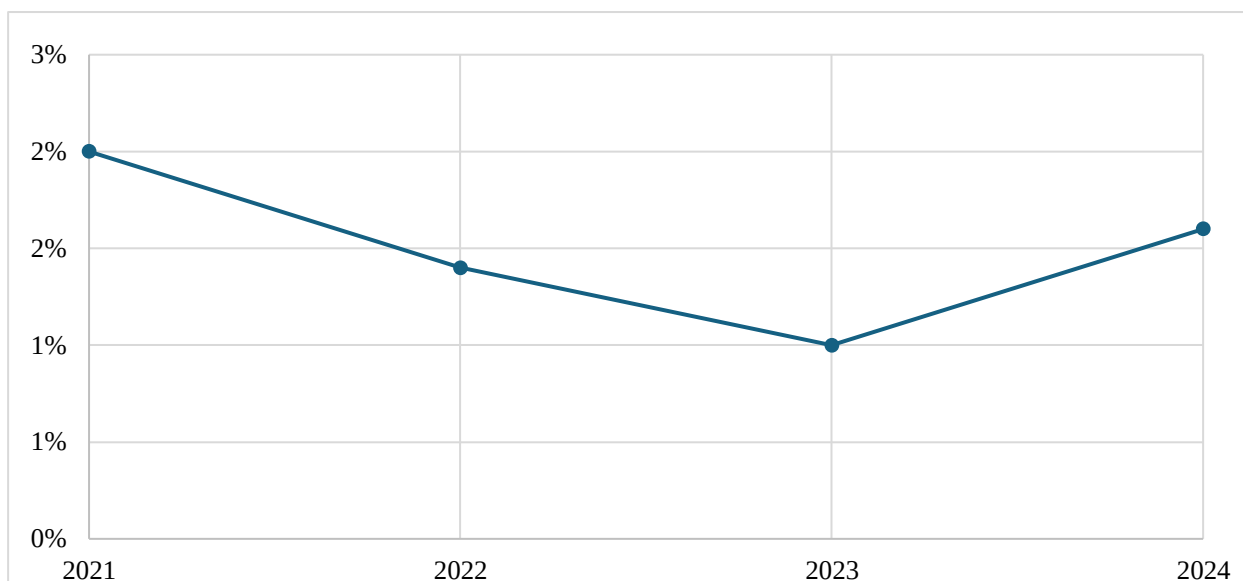


Рисунок 1 – Изменения максимальной вакантности складских площадей класса "А" и "В" в Казахстане в периоде с 2021 по 2024 год
Примечание – составлено автором на основании источника [33]

Концентрация логистических объектов в нескольких узлах. Значительная часть современных складских комплексов сосредоточена в городе Алматы – на него в 2018 г. приходилось ~426 тыс. кв. м складов класса А (около 76% всех площадей класса А в стране). В столице Астана и г. Шымкент доли заметно меньше (20,6% и 3,6% соответственно). Это указывает на региональный дисбаланс: юг страны лучше обеспечен логистической инфраструктурой, тогда как север и запад Казахстана испытывают нехватку крупных распределительных центров. Действительно, отмечается острый дефицит 3PL-операторов полного цикла в северных областях – многие дистрибьюторы там вынуждены сами заниматься складированием и транспортом, либо пользуются устаревшими складскими площадками.

Рынок дистрибуции ТПС в Казахстане все еще сильно опирается на классических дистрибьюторов и оптовые компании. Как упоминалось, около половины складских мощностей занято товарами дистрибьюторских фирм, тогда как в более развитых рынках доля дистрибьюторов меньше. Это означает, что крупные торговые сети и производители в РК менее интегрировали свои цепи поставок – они полагаются на независимых дистрибьюторов, которые держат товар на своих складах и обеспечивают довоз до розницы. Существующие логистические операторы тоже в основном нацелены на обслуживание именно дистрибьюторов и оптовиков, работающих с оборачиваемостью запаса ~40–45 дней. В то же время сегмент складской логистики для организованного ритейла только формируется. Сеть крупных супермаркетов и гипермаркетов (Magnum, Small, etc.) развивалась в последние

годы, и теперь возникают запросы на специализированные склады под ритейл, в том числе на услуги ответственного хранения, фулфилмента для e-commerce.

Государство признает необходимость развития логистической инфраструктуры. В «Плане нации – 100 конкретных шагов» есть пункт по интеграции Казахстана в международные транспортно-коммуникационные потоки, предполагающий строительство логистических объектов. За последние годы созданы крупные транспортно-логистические центры (ТЛЦ): в Алматы (индустриальная зона «DAMU»), в Астане, в порту Актау, на границе с КНР («Хоргос – Восточные Ворота»). Эти хабы ориентированы не только на транзит, но и на внутренний рынок – при них строятся складские терминалы, в том числе распределительные центры для товаров народного потребления. Пример – мультимодальный логистический центр в Алматы, куда входит современный распределительный комплекс, используемый крупными торговыми операторами.

Тем не менее, пока крупные складские комплексы Казахстана в основном покрывают нужды внутреннего рынка и почти не участвуют в обслуживании транзитных потоков (транзитные грузы, идущие через Казахстан, в основном перегружаются непосредственно в контейнерных терминалах на границе и следуют далее без помещения на склады внутри страны). Это логично, так как транзит, например, Китай–Европа не требует хранения по пути. Однако для экономики Казахстана остается важной задачей развитие именно дистрибутивных складов, ориентированных на внутреннее потребление и розничную торговлю [33].

Ожидается, что в ближайшие годы доля услуг логистических провайдеров будет расти. Крупные склады класса А, помимо базового ответственного хранения, начнут предлагать расширенный сервис 3PL и даже 4PL. То есть не только хранение, но и управление цепями поставок клиентов, интеграцию различных услуг (транспорт, таможня, склад, ИТ). Уже сейчас некоторые проекты заявляют о создании логистических хабов полного цикла. Например, в 2022 году была информация о планах строительства распределительных центров для продуктов питания с государственным участием – с тем, чтобы стабилизировать продовольственные цепочки и снизить издержки дистрибуции.

Для ТПС-логистики Казахстана характерна проблема удлинённых плеч доставки: значительная часть продуктов импортируется (из РФ, Китая, Узбекистана, Европы), либо производится в южном регионе, тогда как население распределено широко. Это диктует потребность в эффективной магистральной логистике (железнодорожной и автомобильной). Сегодня некоторые дистрибьюторы ТПС вынуждены возить товары на большие расстояния (Алматы – Астана ~1200 км) с перевалкой на свои склады. Логистическая стратегия на уровне страны направлена на сокращение этих издержек – путем создания региональных распределительных центров вблизи потребителей, куда бы централизованно завозились товары, а далее распределялись по региону. Имеются планы открытия оптово-

распределительных центров (ОРЦ) сельхозпродукции и продовольствия в разных областях, которые выполняют роль буферов между производителями и розницей.

Также наблюдается интерес к цифровым решениям в логистике. Крупные дистрибьюторы и ритейлеры Казахстана внедряют ERP и WMS, начинают применять системы маршрутизации транспорта. Появляются стартапы в сфере логистики (цифровые экспедиторы, складские онлайн-платформы). Это позволит повышать эффективность существующих мощностей и прозрачно управлять потоками.

Важным шагом стало присутствие на рынке международных логистических компаний и передача им функций. Например, сеть Magnum некоторое время сотрудничала с российским 3PL по управлению своим центральным распределительным центром, перенимая экспертизу. В 2018–2020 гг. культура аутсорсинга логистики начала формироваться – все больше компаний рассматривают привлечение профессиональных 3PL для оптимизации складских и транспортных операций, чтобы сфокусироваться на основном бизнесе.

Подытоживая, Казахстан стоит на пороге логистических изменений: спрос на качественную складскую инфраструктуру высок, что создает предпосылки для инвестиций и прихода новых игроков. Развитие ТПС-ритейла и e-commerce (Wildberries, OZON, Kaspi) стимулирует появление фулфилмент-центров. При поддержке государства и при активном участии бизнеса логистическая сеть РК будет укрепляться – в виде новой генерации дистрибутивных центров, покрывающих потребности национального рынка и повышающих эффективность движения товаров от производителя к магазину.

В развитых зарубежных экономиках логистические системы ТПС-отрасли достигли высокой степени оптимизации и технологичности [34]. Практики организации распределительных центров и управления цепями поставок отточены многолетним опытом крупных транснациональных корпораций и ритейлеров.

Многоэшелонные сети и глобальные распределительные центры. В Европе и Северной Америке распространена многоуровневая архитектура цепей поставок: существуют несколько крупных центральных логистических хабов, которые взаимодействуют с сетью региональных распределительных центров и далее с локальными складами последней мили [35]. Например, производитель потребительских товаров может иметь панъевропейский распределительный центр в портовой зоне (через который проходят товары для всего континента), оттуда грузы отправляются на национальные дистрибуционные центры в каждой стране, а уже затем – в региональные склады розничных сетей. Такой подход позволяет сочетать экономию от концентрации запасов (в центральном узле) с адаптивностью к местным рынкам (на уровне региональных РЦ). Крупнейшие ТПС-концерны (Unilever, Nestlé) используют международные распределительные центры, обслуживающие несколько стран, где аккумулируют товар и затем

перераспределяют и доставляют продукцию во многие государства. Тем самым достигается баланс между глобальной эффективностью и локальной быстрой поставкой.

Аутсорсинг и 3PL/4PL. За рубежом высок уровень передачи логистических функций специализированным операторам. Многие производители и сети ТПС заключают договоры с крупными 3PL-провайдерами (DHL Supply Chain, Kuehne+Nagel, XPO Logistics и др.), которые управляют их распределительными центрами, транспортировкой и даже частью планирования запасов. Более того, оформляются отношения типа 4PL (четвертая сторона логистики), когда внешний интегратор берёт на себя всю координацию цепи поставок. Это позволяет заказчикам сосредоточиться на маркетинге и производстве, а экспертиза в области логистики приносится извне. В результате, в Европе, например, логистический рынок очень развит: склады часто принадлежат инвестиционным фондам (формат *складской недвижимости*), а услуги по их управлению оказывает 3PL. Такая экосистема повышает гибкость – бизнес может масштабировать логистику без капитальных вложений, пользуясь сторонними мощностями. Пандемия COVID-19 продемонстрировала преимущества таких моделей, но также выявила риски: чрезмерная глобализация цепей приводит к сбоям при форс-мажорах. Поэтому сейчас многие компании пересматривают стратегии – стремятся диверсифицировать цепи и географически, и по провайдерам.

Высокая автоматизация складов. Западные распределительные центры ТПС – это зачастую образцы передовой автоматизации. Например, склад компании Amazon в Европе может иметь тысячи робототехнических систем (роботы Kiva для перемещения стеллажей, автоматизированные сортировщики, конвейеры длиной несколько километров). Автоматические системы хранения (AS/RS) применяются для высокооборотных товаров, сортировочные устройства позволяют за час обрабатывать десятки тысяч заказов. В некоторых дистрибуционных центрах розничных сетей (Walmart, Tesco) внедрены конвейерные линии для разборки паллет и паллетайзеры для формирования микс-паллет под магазины. Цель – снизить зависимость от ручного труда, увеличить скорость и точность обработки заказов. Впечатляющий пример – склады Ocado (Великобритания), обслуживающие онлайн-продажи продуктов: они полностью автоматизированы, сотни роботов передвигаются по решетке и собирают заказы без участия человека. Этот опыт показывает направление развития: «склады-без-людей» (lights-out warehouses) перестают быть фантастикой, их прототипы уже работают.

Информационные системы и интеграция цепей. Зарубежный опыт характеризуется глубокой интеграцией информационных потоков между участниками цепи. Например, система EDI (Electronic Data Interchange) внедрена практически у всех крупных ритейлеров и их поставщиков – заказы, уведомления об отгрузке, статус запасов передаются автоматически. В рамках концепции Efficient Consumer Response (ECR) производители ТПС и торговые сети обмениваются данными о продажах в режиме реального времени,

согласованно планируют промоакции и пополнение. Это позволяет снизить bullwhip-эффект (искажение спроса по цепи) и оптимизировать запасы. Практика VMI (управление запасами поставщиком) широко распространена: например, крупный производитель напитков сам контролирует уровень своего товара на складах дистрибуции розничной сети и своевременно пополняет его, освобождая ритейлера от этой задачи. Всё это стало возможным благодаря единой цифровой платформе цепей поставок, часто дополняемой аналитикой на основе Big Data и AI.

Продвинутые методы оптимизации. За рубежом получили развитие методы математического моделирования и оптимизации логистических процессов. Например, оптимизация размещения склада: с помощью моделей *гравитационного центрирования* выбирают оптимальную локацию РЦ с учетом спроса и транспортных затрат. Оптимизация маршрутов доставки: алгоритмы VRP (vehicle routing problem) внедряются повсеместно, особенно в городском дистрибутиве (программные продукты типа ORTEC, JDA используются для автоматического расчета графиков отгрузки). Имитационное моделирование применяется для балансировки ресурсов склада, проектирования новых центров, стресс-тестирования цепей поставок. Например, Procter & Gamble еще в 2000-х создала виртуальную модель своей европейской сети поставок для экспериментов «что-если», экономя миллионы долларов от выявленных улучшений [36]. Стоит упомянуть системы управления запасами на основе сервисного уровня: многие компании рассчитывают оптимальные уровни запасов на каждом узле, чтобы достичь требуемого уровня обслуживания при минимальных затратах. Этот подход подкрепляется программными решениями (SAP APO, Oracle SCM).

Логистические инновации: В последние годы за рубежом активно развиваются новые концепции, такие как микрофулфилмент-центры (небольшие автоматизированные склады в черте города для сверхбыстрой доставки онлайн-заказов), дроны и роботы для доставки (Amazon, Walmart тестируют дрон-доставку малых посылок, Starship Technologies – робокурьеров на последней миле). В управлении цепями поставок начинает применяться блокчейн для отслеживания происхождения товаров и документов, IoT-датчики для мониторинга условий перевозки (температура, влажность) в режиме реального времени.

В первом разделе, в результате анализа теоретических основ логистических систем и дистрибутивных складов, представленного в первой главе, можно сделать следующие ключевые выводы. Дистрибутивные склады являются важнейшим элементом логистической инфраструктуры, обеспечивающим непрерывность, гибкость и надежность цепей поставок товаров повседневного спроса (ТПС). Их функции выходят за рамки простого хранения: склады выполняют задачи консолидации, сортировки, комплектования заказов, выравнивания потока, буферизации спроса и организации отгрузок в оптимальных объемах. Это делает их критически важными звеньями, особенно в условиях высокой оборачиваемости и широкой

номенклатуры продукции, характерных для FMCG-сектора. Классификация логистических систем позволила охарактеризовать существующие типы конфигураций цепей поставок – от прямых до многоэшелонированных и гибких, а также различать макро- и микрологистические системы в зависимости от уровня охвата и интеграции. Понимание этих различий имеет практическое значение для правильного проектирования логистической сети, выбора стратегии управления и определения роли дистрибутивного центра в конкретной системе. Особое внимание было уделено стратегическому планированию логистики в ТПС-сегменте. Рассмотрены такие важные направления, как определение географии складской сети, управление запасами, транспортная логистика, информационные технологии, кадровое обеспечение и экологические аспекты. Были выделены ключевые особенности логистики ТПС: высокая чувствительность к срокам поставки, низкая маржинальность, высокая динамика спроса, широкий географический охват и необходимость цифровизации процессов. Эти характеристики диктуют потребность в гибких, интегрированных и технологичных решениях при построении логистической стратегии, особенно в части функционирования распределительных центров. Сравнительный обзор логистических практик в России, Казахстане и за рубежом позволил выявить существенные различия в уровне зрелости логистических систем. Зарубежный опыт демонстрирует высокую степень автоматизации, распространение аутсорсинга (3PL/4PL), широкое применение ИТ-систем и цифровых платформ, а также использование имитационного моделирования и оптимизационных подходов. Казахстанский рынок логистики находится в стадии активного становления: отмечается острый дефицит современных складов, особенно класса «А», высокая зависимость от дистрибьюторов, региональная неравномерность распределения инфраструктуры и постепенное развитие услуг 3PL. Таким образом, в условиях Казахстана дистрибутивные склады приобретают стратегическое значение как опорные узлы логистической сети, способные повысить эффективность товародвижения, обеспечить сбалансированность между спросом и предложением, сократить издержки и улучшить уровень обслуживания конечных потребителей. Однако для достижения этих целей необходимо внедрение современных методов проектирования и анализа логистических систем, включая имитационное моделирование, которое позволит обоснованно оценивать и оптимизировать конфигурации складов с учётом стохастичности и сложности операций.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТРИБУТИВНЫХ СКЛАДОВ

2.1 Подходы к моделированию логистических систем

Логистические системы, особенно такие сложные как сети распределительных центров ТПС, требуют тщательного анализа и оптимизации. Моделирование служит основным инструментом исследования логистических систем: оно позволяет воспроизвести работу реальной цепи поставок или склада в упрощенном виде и экспериментировать с разными параметрами без риска для реальных операций. Существует несколько подходов к моделированию логистических процессов, которые можно разделить на аналитические и имитационные (симуляционные) методы.

Аналитическое (математическое) моделирование использует строго формализованные математические модели для описания логистических задач. Например, задачи оптимизации размещения складов и маршрутов доставки могут быть сформулированы как задачи целочисленного линейного программирования (известная модель – задача локализации складов и транспортная задача). Другие примеры: модель EOQ (Economic Order Quantity) для расчета оптимального размера заказа, формулы управления запасами (например, (s, Q) -политики), модели теории очередей для анализа пропускной способности складов и перегрузочных терминалов. Аналитические модели позволяют получать точные решения, но зачастую требуют упрощения реальности – например, предполагать линейность издержек, стационарность спроса, равномерность потоков. В сложных многофакторных системах ТПС применение чисто аналитических методов ограничено, так как реальность включает стохастичность (случайность спроса, задержки транспорта), нелинейные зависимости (эффект загруженности склада) и множество дискретных событий.

Тем не менее, аналитические методы – основа стратегического планирования: с их помощью рассчитываются оптимальные схемы распределения потоков. Например, методы исследования операций (operations research) широко применяются в западной практике логистики – компании используют коммерческие оптимизаторы (IBM ILOG CPLEX, Gurobi) для решения задач планирования производства и дистрибуции. В рамках исследований операций также применяются эвристические методы – алгоритмы, которые не гарантируют абсолютного оптимума, но находят достаточно хорошие решения за приемлемое время. К эвристикам относятся различные метаэвристические алгоритмы: генетические алгоритмы, имитация отжига, алгоритм табу-поиска – они используются, например, для сложных задач маршрутизации транспорта или оптимизации размещения множества складов и центров. Такие подходы позволили получить новое видение задач увеличения числа распределительных центров и снижения издержек.

Имитационное моделирование – другой фундаментальный подход, заключающийся в создании *компьютерной модели*, которая проигрывает во времени поведение логистической системы с помощью случайных экспериментов. Имитационная модель фактически является виртуальным

“полигоном”, на котором можно проследить переход системы из состояния в состояние под воздействием различных событий (прибытие грузов, отправка заказов, поломка оборудования и т.д.). В отличие от аналитических моделей, имитация не требует радикальных упрощений – можно учесть множество деталей процесса, сложную логику, вариативность. Вместо того чтобы выводить формулы, аналитик строит алгоритм функционирования системы.

Имитационные модели относятся к классу описательных моделей, то есть они описывают *как* система работает, не обязательно давая непосредственно оптимум, но позволяя оценить последствия разных сценариев. Обычно имитационное моделирование включает следующие шаги:

- построение логико-математической модели исследуемой системы (концептуальная модель): формализация всех ключевых элементов и процессов, определение связей между ними, сбор необходимых исходных данных (распределения спроса, времени операций, мощности ресурсов).

- разработка алгоритма функционирования системы – т.е. описание правил и последовательности событий, которые должна воспроизводить модель. На этом этапе фактически пишется “сценарий” работы: например, правило, как обрабатывается поступление груза на склад, что происходит, когда накопилась очередь на отгрузку и т.д.;

- программирование имитационной модели – реализация алгоритма на компьютере с помощью специального программного обеспечения (или общего языка программирования). Современные имитационные среды позволяют делать это относительно прозрачно, часто графически (блок-схемы, объектные библиотеки). Код модели учитывает стохастичность: генерируются случайные события (например, интервалы между заказами, длительность операций) согласно заданным распределениям вероятностей;

- эксперименты с моделью – прогон модели многократно с разными параметрами, сбор статистики результатов. Модель имитирует течение времени (час, день, месяц в системе) и фиксирует показатели эффективности: среднее время доставки, уровень загрузки склада, процент выполненных заказов, затраты и т.п. Экспериментируя, аналитики сравнивают альтернативные конфигурации логистической системы.

Имитационное моделирование получило очень широкое применение в логистике. Оно дает возможность прогнозировать поведение системы при тех или иных условиях, проверять “что будет, если...” – например, если увеличить количество погрузочных доков на складе, сократятся ли очереди грузовиков? если изменить политику пополнения запасов, уменьшится ли дефицит? Модели используют при проектировании новых предприятий и размещении складов, для обучения и тренировки персонала (имитаторы складских операций), для анализа чувствительности системы к разным факторам. Имитация позволяет проверить и сравнить различные структурные варианты логистических систем – например, сравнить схемы с разным числом уровней складов, или разные варианты графика работы (в одну смену vs круглосуточно). Это чрезвычайно ценно, так как на практике подобные

эксперименты провести сложно и дорого, а виртуальная модель дает ответы быстро.

Принципиальное отличие имитационного подхода – ориентация на *итеративное улучшение модели*. Модель часто не делается раз и навсегда: по мере экспериментов ее модифицируют, уточняют (изменяют правила, вводят новые детали), чтобы исследовать дополнительные сценарии. Имитация завершается анализом полученных результатов и выдачей рекомендаций для практического внедрения. Таким образом, симуляция служит инструментом поддержки решений: на ее основе менеджмент принимает обоснованные решения по оптимизации логистической системы.

Следует упомянуть также комбинированные подходы. В ряде случаев полезна символьная имитация (системная динамика) – она описывает потоки агрегационно, через системы дифференциальных уравнений (например, поток товара как некая жидкость), что удобно для стратегического моделирования макрологистических процессов (уровни запасов, колебания спроса во времени). Для моделирования процессов внутри склада и на уровне отдельных заказов более подходит дискретно-событийная имитация, где отслеживаются индивидуальные объекты и события.

Современная тенденция – объединение методов: гибридное моделирование. Например, можно встроить в имитационную модель блок оптимизации, который на каждом шаге решает локальную оптимизационную задачу (например, определяет оптимальный набор заказов в волну комплектации на складе). Или, наоборот, использовать результаты имитации для калибровки параметров аналитической модели. Такой синтез позволяет использовать сильные стороны обоих подходов.

В целом, при выборе подхода к моделированию логистической системы исходят из целей исследования и доступных данных. Если задача – найти точный глобальный оптимум (и система не слишком сложна), применяют аналитический метод. Если задача – понять динамику системы, оценить риски, проверить множество сценариев в сложной многокомпонентной системе – выбирают имитационный метод. В проекте, ориентированном на моделирование работы распределительного склада, на первый план выходит имитационное моделирование, поскольку работа склада – сложный стохастический процесс с очередями, ресурсами, перемещениями, и аналитически его трудно описать. Однако и результаты имитации могут быть усилены аналитическими оценками (например, приближенной оценкой необходимого числа погрузчиков по формуле Эрланга и затем уточнением через симуляцию).

Итак, подходы к моделированию логистических систем разнообразны, но их объединяет стремление создать виртуальный прототип реальной цепи поставок или ее элемента. Далее рассмотрен инструментарий, используемый для таких целей – программные средства имитационного моделирования, а также особенности конкретного ПО (AnyLogic, Arena, FlexSim, Simul8), которое применяется для моделирования складских систем.

2.2 Сравнительный анализ программных средств имитационного моделирования (AnyLogic, Arena, FlexSim, Simul8 и др.)

С развитием вычислительной техники разработано множество специализированных программ для имитационного моделирования логистики и бизнес-процессов. Каждая из них имеет свои особенности, парадигмы моделирования и область предпочтительного применения. Рассмотрим кратко наиболее распространенные инструменты, используемые для моделирования логистических систем, и сравним их возможности.

AnyLogic – современная универсальная система имитационного моделирования, разработанная компанией The AnyLogic Company. AnyLogic отличается тем, что поддерживает три основных парадигмы моделирования: *дискретно-событийную, агентно-ориентированную и системную динамику*, а также их комбинации (мультиметодное моделирование). Является фактически стандартом в мультипарадигменном моделировании сложных бизнес-систем. Среда AnyLogic базируется на языке Java и включает визуальный язык моделирования: пользователь строит модель графически (блок-схемы процессов, диаграммы состояний агентов), но при желании может добавлять код на Java для расширения функционала. Такая гибкость позволяет моделировать практически любые системы – от работы отдельного склада до глобальной цепи поставок. AnyLogic особенно популярен для логистики и цепей поставок – по оценкам, около 40% симуляционных моделей в бизнесе по состоянию на середину 2010-х выполнены именно в AnyLogic. К плюсам AnyLogic относят: богатые библиотеки для процессов, транспорта, складских операций; возможность создавать *агентов* (например, магазины, грузы, транспортные средства) с индивидуальным поведением; встроенные средства экспериментов (оптимизационный модуль, параметрический анализ, облачная симуляция). Интерфейс AnyLogic позволяет визуализировать модели в 2D и 3D, что удобно для презентации результатов. Среда поддерживает интеграцию с базами данных, GIS-картами, внешними программами через Java. Из минусов – достаточно высокая сложность для новичка (мощный, но требующий навыков подход), англоязычный интерфейс, коммерческая лицензия дорогая (хотя есть бесплатная версия PLE с ограничениями).

Arena – одна из самых старейших и известнейших систем дискретно-событийного имитационного моделирования, разработанная компанией Systems Modeling Corp (позднее приобретена Rockwell Automation). Arena появилась еще в 1990-х и долгие годы была де-факто стандартом в академических кругах для обучения имитации. Она использует парадигму процессного моделирования: пользователь выстраивает блок-схему процесса из модулей (приход заявок, задержка, очередь, обработка и т.д.). Внутри работает математический аппарат языка SIMAN. Arena очень удобна для

моделирования *очереди и процессов обслуживания*, поэтому широко применялась для производства, служб сервиса, складов. Например, модель склада в Arena строится как последовательность этапов: поступление груза -> постановка в очередь на разгрузку -> разгрузка погрузчиком -> размещение на полку и т.д., с заданием параметров времени. Преимущества Arena: относительная простота освоения (интуитивный интерфейс блоков), большой опыт накоплен (множество специалистов, литература), хорошая статистика результатов. Также Arena включает модуль OptQuest для оптимизации параметров модели (поиска оптимума через эксперименты). Недостатки: ограниченность только дискретно-событийной парадигмой, что иногда затрудняет моделирование непрерывных процессов или сложных взаимодействий; устаревший интерфейс (Arena не получила принципиальных обновлений в последние годы и считается “устоявшимся” продуктом). Тем не менее, для задач складской логистики Arena по-прежнему актуальна – если требуется быстро накидать и проверить простую модель. В российских вузах Arena включена в программы обучения по логистике и управлению операциями.

FlexSim – мощное программное обеспечение для имитации с акцентом на 3D-визуализацию и удобство моделирования материальных потоков. Разработан компанией FlexSim Software Products, Inc. FlexSim изначально создавался для производственных и логистических систем. Он предоставляет пользователю объектно-ориентированную среду: на рабочем поле расставляются объекты (станки, конвейеры, стеллажи, погрузчики, сотрудники), затем настраиваются их связи и правила. Одной из сильных сторон FlexSim является детальная 3D-анимация – модель можно посмотреть в реальном времени как виртуальный склад или завод с движущимися объектами. Это не только красиво, но и полезно для верификации модели (легче заметить нелогичные поведения). FlexSim имеет обширную библиотеку для склада: конвейерные линии, вилочные погрузчики с продвинутой логикой движения, системы управления транспортом на складе и пр. В нем также реализованы инструменты для анализов “что-если” и встроен язык логики (на основе C++ синтаксиса) для продвинутых пользователей. В сравнительных обзорах FlexSim часто отмечают как один из самых популярных инструментов имитации в промышленности. Например, в одном из рейтингов дискретных симуляторов FlexSim уверенно занимает место в первой пятерке по распространенности. Из недостатков – сфокусированность на операционной имитации (менее подходит для агентного уровня или системной динамики), а также коммерческая основа (нет бесплатной версии, кроме ограниченного trial). Но для моделирования склада FlexSim – чуть ли не эталонный инструмент благодаря готовым решениям для типичных задач (адресное хранение, перемещение грузов, управление очередями) [37].

Simul8 – программный продукт для дискретной симуляции, ориентированный на простоту и быстроту построения моделей. Разработчик – Simul8 Corporation (Великобритания). Simul8 ценят за его *простоту в освоении*

и использования: интерфейс похож на Microsoft Office, объекты (работники, станции обработки, буферы) легко перетаскиваются мышью. Он хорошо подходит для моделирования бизнес-процессов, сервисных систем, где требуется скорее “*набросать*” модель и получить оценку. Simul8 часто применяется для моделирования в здравоохранении, в обслуживании клиентов, но также может моделировать склады и производственные линии. Его плюс – быстрое действие и невысокие требования: модель компилируется быстро, можно оперативно прогонять множество сценариев. Кроме того, стоимость Simul8 ниже, чем у тяжелых решений типа AnyLogic или FlexSim, что привлекает малый бизнес и исследовательские команды с ограниченным бюджетом. Однако упрощенность Simul8 – и его минус: для очень сложных систем возможностей может не хватить, детализация ограничена. Тем не менее, Simul8 остается конкурентоспособным: согласно пользовательским обзорам, его сильные стороны – интуитивность и наличие обучающих материалов, позволяющих построить модель почти без программирования.

Помимо перечисленных, существуют и другие известные средства: Siemens Tecnomatix Plant Simulation (ранее известный как Plant Simulation или eM-Plant) – мощный инструмент особенно для производственных и складских процессов, с развитой функциональностью и интеграцией с CAD-системами; AnyLogic уже был упомянут; Simio – относительно новый симулятор, сочетающий объектный подход и процессный (позиционируется как более современная альтернатива Arena); ExtendSim, ProModel, Witness – все они имеют сходную направленность и используются в различных отраслях. Для моделирования логистических систем дистрибутивных складов важно, чтобы инструмент поддерживал:

- дискретно-событийную детализацию (учет индивидуальных заявок, машин, операций во времени);
- простоту описания параллельных процессов (несколько зон склада работают одновременно);
- удобную статистику (время цикла заказа, загрузка ресурсов, простоя);
- анимацию складских процессов для наглядности результатов (движение погрузчиков, заполнение стеллажей и др.);
- возможность импортировать/экспортировать данные (например, из Excel, для параметров модели) и интеграцию с оптимизаторами.

Если сравнить рассматриваемые пакеты с этих позиций:

- *AnyLogic*: максимальная гибкость, можно смоделировать и склад (вплоть до уровня отдельных полок), и всю цепь поставок целиком. Есть Material Handling Library для упрощения моделирования склада. Интеграция с оптимизацией и внешними данными – отличная. Порог вхождения – высокий [38].

- *Arena*: хорошо подойдет для концептуальной модели склада, грубо оценивающей ресурсы и очереди. Однако детализация в ней будет условной

(например, без визуального отображения реального расположения стеллажей). Подходит для начальных оценок, анализа очередей.

- *FlexSim*: отличен для детализированной модели склада – с конкретной планировкой, маршрутами техники, правилами отбора заказов. Даст убедительную визуализацию и точные показатели работы. Требуется времени на построение модели, но имеет много готовых решений. Хорош для инженеров, которые будут моделировать физические процессы склада.

- *Simul8*: удобен для быстрого моделирования потока через склад. Можно смоделировать, например, что склад – это “черный ящик” с определенной пропускной способностью, и проверить разные варианты этой пропускной способности. Но для тонкой настройки складских операций лучше другие ПО.

Сводя воедино, выбор инструмента зависит от задачи и наличия компетенций: если проект требует глубокой проработки конкретного склада ТПС – имеет смысл FlexSim или Plant Simulation. Если нужно исследовать сценарии работы цепи поставок с несколькими складами – скорее AnyLogic (в виду возможности агентного уровня, да и материал по цепям поставок у AnyLogic богат). Для учебных и демонстрационных целей или быстрого прототипа – Arena или Simul8. Все перечисленные ПО способны моделировать логистические системы, разница чаще в удобстве и эффективности разработки модели конкретного типа.

В целях консолидации информации, также был проведен SWOT-анализ, описанный в таблице 1.

Таблица 1 – SWOT-анализ различных инструментов моделирования логистических систем.

Категория	AnyLogic	Arena	FlexSim	Simul8
1	2	3	4	5
Сильные стороны	Универсальность, гибкость. Поддержка различных парадигм моделирования. Визуализация и встроенная оптимизация. Возможность интеграции	Простота освоения. Хорошо для моделирования очередей и процессов обслуживания. Широкая учебная база и методические материалы	Высококачественная 3D визуализация. Специализирован на складских и производственных задачах. Удобный интерфейс и набор готовых решений.	Простота использования. Высокая скорость построения и расчётов. Доступная стоимость

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Слабые стороны	Дорогая коммерческая лицензия Требует навыков программирования (Java)	Ограниченные возможности детализации Устаревший интерфейс Только дискретно-событийное моделирование	Ограниченность в задачах за пределами складов и производства Высокая стоимость лицензии	Ограниченные возможности детализации и моделирования сложных сценариев Не подходит для мультипарадигмальных моделей
Возможности	Рост спроса на сложные мультипарадигменные модели Развитие интеграции с системами управления цепями поставок	Рост интереса к логистическому образованию и тренингам Повышение интереса к простым моделям процессов	Увеличение популярности 3D-анимации и цифровых двойников в логистике Рост складской автоматизации	Повышение интереса малого и среднего бизнеса к недорогим и простым инструментам моделирования
Угрозы	Высокая конкуренция среди сложных ПО	Устаревание интерфейса и подходов Снижение актуальности при росте потребности в сложных моделях	Высокая конкуренция со стороны более универсальных инструментов (например, AnyLogic) Ограничение бюджетов компаний	Ограничения возможностей приводят к потере клиентов, переходящих на более универсальные продукты

В случае данной исследовательской работы – моделирование дистрибутивного склада ТПС с последующей оптимизацией конфигураций – будет акцентироваться на платформе AnyLogic, как на наиболее универсальной и поддерживающей широкий функционал для складской логистики. Далее подробно рассмотрим ее возможности применительно к данной задаче.

2.3 Возможности AnyLogic и его применение для моделирования дистрибутивных складов

Программный комплекс AnyLogic зарекомендовал себя как мощный инструмент для моделирования сложных логистических объектов, включая распределительные центры и сети поставок. Рассмотрим, какие особенности AnyLogic делают его особенно пригодным для моделирования дистрибутивных складов и каким образом можно использовать эти возможности на практике.

Гибкость моделирования процессов и ресурсов. AnyLogic содержит встроенную Process Modeling Library, с помощью которой удобно описывать

процессы обработки заявок, очереди, ресурсы и т.д. Для склада это означает, что можно представить поток грузов как последовательность стадий: приемка, размещение, хранение, отбор, отгрузка – каждая из которых моделируется блоками типа *Queue* (очередь), *Delay* (время обработки), *ResourcePool* (ресурсы – например, работники или погрузчики). При этом допускается параллельное выполнение процессов, ветвление логики (например, разные типы товаров могут идти по разным маршрутам). Настройка логики операций достигается либо параметризацией блоков, либо добавлением собственных кодовых вставок на Java для особых правил. Например, можно задать правило приоритезации: срочные заказы проходят вне очереди или объединение нескольких заказов в одну партию отбора – все это реализуемо средствами AnyLogic.

Библиотека *Material Handling Library* – специализированный модуль AnyLogic, который упрощает моделирование операций внутри склада. В этой библиотеке имеются объекты для представления физических сущностей склада: конвейеры (конвейерные ленты различных типов – прямые, кривые, сортировщики), стойки (стеллажи) с адресным хранением, лифты, краны-штабелеры, вилочные погрузчики, AGV (автономные транспортные средства). Используя эти объекты, можно построить модель, близкую к реальной топологии склада: например, смоделировать зональную структуру (зона приемки, высокостеллажное хранение, зона комплектовки, экспедиция), соединить их конвейерами, задать параметры хранения (количество уровней стеллажей, стратегия размещения – по ближайшему месту или по типу товара и т.п.). Погрузчики в AnyLogic можно наделить поведением: они будут сами выбирать, какой груз забрать и куда отвезти, исходя из заданных правил (например, правило двухцикла: после выгрузки сразу выполнять задание на загрузку, чтобы не ездить порожним). *Material Handling Library* особенно полезна, когда требуется детально отобразить движение единиц груза (ящиков, паллет) по складу. С ее помощью можно, к примеру, воспроизвести работу системы конвейерной сортировки заказов: блоки модели автоматически распределяют коробки по направлениям (shoot) согласно заложенной логике.

Многоподходность – сочетание агентного и процессного моделирования. В AnyLogic склад может быть смоделирован и в виде агентной модели. Это значит, что можно определить тип агента, скажем, *Груз (паллета)* или *Заказ*, наделить его атрибутами (вес, объем, список товаров) и поведением (например, время жизни на складе). Агенты могут перемещаться по среде (layout склада), взаимодействовать с другими агентами (погрузчиками). Такой подход позволяет объединить микроуровень и макроуровень: одновременно смоделировать как внутреннюю работу склада, так и внешние потоки – например, поставить агента типа *Грузовик*, который прибывает к складу согласно расписанию, входит в док, ожидает загрузки/разгрузки (что происходит через процессную модель склада), а затем едет дальше (агент-авто на транспортной сети). Таким образом, AnyLogic даёт возможность создать целостную модель цепи поставок, где распределительный центр – лишь один

из агентов, но смоделированный с внутренней детализацией. Это критично, если нужно оценивать влияние конфигурации отдельного склада на общесетевые показатели (уровень сервиса в магазинах, общие издержки логистики и пр.) [39].

Простота экспериментов и оптимизации. AnyLogic имеет встроенные инструменты для проведения экспериментов над моделью. Можно настроить параметрический эксперимент, указав диапазоны изменения параметров (например, число погрузчиков от 2 до 6; площадь складских зон; режимы работы смен), – модель будет многократно запускаться с комбинациями параметров и выдавать таблицы/графики результатов. Для поиска оптимального решения есть эксперимент типа Optimization – на основе библиотеки OptQuest. Например, можно задаться целью минимизировать суммарные затраты при ограничении на время обслуживания заказа и позволить AnyLogic подобрать комбинацию параметров (число сотрудников, стратегия отбора и т.д.), удовлетворяющую цели. Это чрезвычайно полезно для нашей задачи поиска оптимального соотношения “стоимость-эффективность”: можно формализовать эффективность (скажем, среднее время обработки заказа или пропускную способность) и стоимость (операционные затраты склада) и применить встроенный оптимизатор для нахождения компромисса.

Средства визуализации и интерфейсы результата. Модель в AnyLogic может быть обеспечена наглядной визуализацией: как в виде анимации (движущиеся погрузчики на плане склада), так и в виде графиков, индикаторов, таблиц прямо на экране во время симуляции. Это позволяет наблюдать за “жизнью” склада, видеть, где возникают очереди, как загружены ресурсы – что облегчает отладку и восприятие. Кроме того, AnyLogic позволяет создавать пользовательский интерфейс для экспериментов – например, слайдеры, кнопки, настраиваемые дашборды. В контексте диссертационной работы можно реализовать панель, где управляя ползунками (количество персонала, емкость склада и т.д.), сразу видеть влияние на KPI (выводится, например, % выполненных заказов в срок, затраты). Это способствует интерактивному анализу: можно быстро протестировать разные гипотезы “на лету”.

Интеграция с реальными данными. Часто имитационная модель складывается не с нуля, а на основе исторических данных: профили поступления заказов, распределения времени операций, нормативов. AnyLogic облегчает импорт данных – через чтение из файлов Excel, текстовых, через подключение к SQL-базам или по ODBC. Также возможен вызов внешних библиотек Python/R или Java для специальных расчетов. Например, можно подключить модуль, рассчитывающий стоимость топлива для выезда транспорта, и использовать его в модели для учета затрат. Благодаря такой интеграции модель может быть привязана максимально близко к реальности. В данном случае, можно загрузить в модель реальное расписание прихода машин на склад из лог-файлов или прогноз заказов для сезона – и на основе этого запускать симуляцию.

Примеры использования AnyLogic для складов. В официальных источниках AnyLogic есть кейсы и типовые модели, демонстрирующие применение для складской логистики. Например, демо-модель “Distribution Center” в AnyLogic Cloud показывает работу распределительного центра с обработкой паллет: разгрузка прибывающих грузовиков, размещение паллет в зонах, комплектация заказов и отгрузка на отправляющиеся автомобили. Эта модель совмещает Process Modeling Library и Material Handling: входящие паллеты едут по конвейеру, распределяются по стеллажам, потом собираются согласно заказам на выходе. Другая модель показывает типовой цикл работы со склада: прибытие грузовиков по расписанию, использование пула погрузчиков для разгрузки, put-away (размещение) и затем подбор и погрузка исходящих машин. Эти примеры подтверждают, что задачи подобные нашей – имитация работы склада с целью определения “узких мест” и отработки различных режимов – решаются AnyLogic эффективно.

Практическая применимость AnyLogic к моделированию дистрибутивных складов ТПС обусловлена ещё и тем, что он позволяет смоделировать сложное сочетание процессов: на складе ТПС часто одновременно идут *прием* поставок от десятков поставщиков и *отгрузка* сотням магазинов, причем эти процессы конкурируют за одни и те же ресурсы (доки, погрузчики). AnyLogic дает возможность это конкурирующее использование ресурсов учесть: ресурсы могут быть общими для разных процессов, модель сама распределит их согласно приоритетам или порядку запроса. Например, если вдруг одновременно приехало больше машин, чем доков, – образуется очередь, и модель посчитает ожидаемое время простоев, что потом позволит оценить, достаточно ли текущего числа ворот или стоит расширить.

AnyLogic – практически идеальная платформа для детального исследования и оптимизации работы распределительного склада. Ее использование в проекте позволит:

- осуществить реалистичную симуляцию всех операций склада, учитывая переменную нагрузку, случайность поступления заказов, возможные сбои;
- измерить ключевые показатели эффективности модели (пропускная способность, среднее время обработки заказа, уровень использования техники и персонала, величину необходимых складских запасов);
- провести серии экспериментов с конфигурацией склада (размеры зон хранения, число единиц оборудования, график смен), чтобы найти такой вариант, при котором достигается требуемая эффективность при минимально возможных затратах;
- представить результаты наглядно, убедительно обосновав рекомендации руководству или инвесторам с помощью графической анимации и статистических отчетов.

- в следующих разделах обсуждается методология построения модели склада и постановке экспериментальной задачи – итеративного анализа различных конфигураций с целью оптимизации “стоимость-эффективность”.

2.4 Методология построения имитационной модели склада

Моделирование логистической системы (в данном случае – работы дистрибутивного склада ТПС) должно выполняться по определенной методологии, чтобы обеспечить корректность и полезность полученных результатов. Опираясь на общие принципы имитационного моделирования и специфики складских процессов, сформулируем этапы разработки модели и экспериментов.

Этап 1. Постановка задачи и определение целей моделирования. На этом шаге четко формулируется, что именно нужно узнать или оптимизировать с помощью модели. Для работы целью является нахождение оптимального соотношения между стоимостью и эффективностью работы склада. Это означает, что модель должна позволять оценивать показатели эффективности (пропускная способность, время выполнения операций, уровень обслуживания заказов) и показатели стоимости (например, количество задействованных ресурсов и связанные с этим операционные затраты) при различных конфигурациях склада. Постановка задачи также включает определение границ модели: будут ли в нее включены только внутренние операции склада, или также внешние элементы (прибытие поставок от производителей, отправка в магазины)? В нашем случае целесообразно включить и внешние потоки, хотя бы на уровне расписания поступления/отправки грузов, чтобы правильно нагрузить склад [30].

Этап 2. Сбор и анализ исходных данных. Необходимо собрать информацию о реальном или проектируемом складе: профили поступления грузов (сколько машин/паллет в день, в какое время), параметры заказов магазинов (сколько заказов, средний размер, временные окна), состав и штаты персонала, характеристики оборудования (скорости погрузчиков, вместимость стеллажей, площади зон). Также важно получить нормативы времени операций: например, сколько времени занимает разгрузить одну паллету, какова скорость отбора товаров. Эти данные могут быть взяты из статистики действующего склада, либо из нормативных документов, либо экспертно оценены. Для ТПС-склада часть данных: среднее число SKU, доля разных категорий товаров (сухие, охлажденные, замороженные), процент транзитных (кросс-докинг-поставок и т.п.).

Этап 3. Разработка концептуальной модели (логики-математической). Здесь формируем абстрактное описание склада для моделирования. Определяем ключевые объекты модели: *Заявка на приемку*, *Заявка на отгрузку* (*заказ магазина*), *Погрузчик*, *Складская секция*, *Док*, *Оператор комплектовки*

и т.п. Указываем, какие состояния бывают у этих объектов, как они взаимодействуют. По сути, создаем схему процесса:

- приходящая машина встает в очередь к доку, если доки заняты.
- после назначения на док – начинается разгрузка, в ходе которой паллет по одной снимаются и перемещаются на места хранения (операция выполняется погрузчиком).
- заказ на отгрузку рождается в системе (или несколько заказов в определенное время), резервируется товар на складе, после чего операторы начинают подбор товара согласно заказу.
- собранные товары консолидируются в отгрузочной зоне, ожидают прибытия машины.
- машина на отгрузку прибывает, занимает док, погрузчики загружают ее паллетами собранных заказов.

Концептуальная модель должна отразить ограничения: например, одновременно может разгружаться максимум X машин (по числу доков), погрузчик может переносить 1 паллету за рейс, один оператор собирает заказ по одному SKU за раз и т.д. Также отмечаем показатели, которые надо собирать: суммарное время пребывания машины на складе (для оценки сервисного времени), время выполнения заказа, часы, в которые возникали очереди на док, простой персонала и др.

Этап 4. Выбор инструмента моделирования и техническая реализация (программирование) модели. Работа идет согласно концепции: создаются блоки процессов или агенты по описанным правилам. Особое внимание – проверке размерностей и единиц (например, все ли времена заданы в минутах или часах последовательно), правильности логических условий (чтобы, к примеру, погрузчики не брали товар из зоны, куда не имеют доступа, или чтобы завершение всех подборок перед отгрузкой гарантировалось).

В процессе кодирования часто возникает необходимость уточнить концепцию или собрать дополнительные данные – это нормально (итеративный возврат к предыдущим этапам). Важно убедиться, что модель адекватна реальности, хотя бы на уровне здравого смысла: для этого используют верификацию (пошаговое проигрывание модели, анимация). Например, проверяется, что при нулевом уровне заказов погрузчики не совершают лишних движений, или что при экстремально высоком спросе модель не “зависает” (продолжает работать, хотя может показывать большие очереди).

Этап 5. Верификация и валидация модели. Верификация – это процесс убеждения, что модель корректно реализована (без программных ошибок). Отслеживается работа модели в отладочном режиме, проверяется, соответствуют ли изменения состояний ожидаемой логике. Например, если по логике приемка должна занимать 2 часа, то в модели действительно видим 2 часовой Delay, и т.д. Иногда для верности просчитывают упрощенный частный случай вручную и сравнивают с моделью.

Валидация – это подтверждение, что модель соответствует реальной системе. Если есть данные реального склада, здесь сравнивают: например, модельный склад при заданных параметрах должен обрабатывать ~1000 паллет в сутки, и реальный склад этого класса действительно имеет производительность около этой цифры. Если данные позволяют, настраивают модель под исторический период и смотрят, получаются ли статистические показатели близко к фактическим (с погрешностью) [5].

Этап 6. Планирование и проведение экспериментов. После того, как базовая модель готова и проверена, переходят к серийным прогонам, которые должны дать ответы на поставленные вопросы. В нашей задаче – итеративный анализ различных конфигураций склада. Конфигурация может включать: число погрузчиков, количество доков, режимы работы (1 или 2 смены), площадь/емкость склада (влияет, скажем, на время перемещения, если склад больше), принятая стратегия отбора (волновой или поточный) и т.п. Важно определить фактор(ы) вариации и диапазоны. Также нужно определить критерии эффективности количественно.

Эксперименты могут строиться как план факторного эксперимента: например, испытать комбинации комплектовщиков погрузчиков. На каждую комбинацию прогнать модель (лучше несколько раз с разными случайными семенами, чтобы усреднить стохастику) и записать результаты. Так получим “поверхность отклика” – зависимость показателей от конфигурации.

Этап 7. Анализ результатов. Собранные данные экспериментов обрабатываются: строятся графики “затраты – эффективность” для разных сценариев, ищутся точки компромисса (например, обнаруживаем, что увеличение персонала с 5 до 8 резко улучшает обслуживание, а дальше прирост затухает – это точка оптимума с точки зрения отдачи на единицу затрат). Возможно, удастся построить кривую “эффективность-стоимость” и выбрать на ней точку (например, методом колена – point of diminishing returns). Особое внимание – к ограничивающим факторам: модель может показать, что после определенного порога улучшение упирается, например, в нехватку доков, и даже 100 работников не ускорят отгрузку, если физически мало ворот. Такие инсайты позволяют сформулировать рекомендации: что действительно нужно увеличить, а что избыточно.

Этап 8. Формирование рекомендаций и выводов. На заключительной стадии методологии оформляются результаты: описывается оптимальная конфигурация (например: “Рекомендуется иметь 4 погрузчика и 10 комплектовщиков в две смены; при 3 доках это обеспечивает обслуживание 95% заказов в течение 24 часов, а дальнейшее увеличение ресурсов дает непропорционально малый прирост эффективности”), а также альтернативы (“если хотим сэкономить на затратах, можно работать с 8 комплектовщиками, но тогда уровень сервиса упадет до 90%”). Также должны быть отражены ограничения модели – на какие условия полученные рекомендации распространяются (например: предполагается, что среднесуточный поток 1000

коробов и стабильный график – при выходе за эти рамки, потребуются перерасчеты).

Данная методология во многом соответствует классическим подходам к имитационному моделированию, адаптированным под складскую логистику. Ее соблюдение гарантирует, что модель будет построена последовательно и прозрачно, а результаты – обоснованны.

В контексте исследования придерживается эта схема. В предыдущих разделах определены цели и выбран инструмент (AnyLogic). Далее следует обобщить постановку задач экспериментов (Этап 6) – то есть описать, какие именно конфигурации склада будут сравниваться и какие метрики “стоимости” и “эффективности” берутся для оценки. Этому посвящен завершающий раздел главы.

2.5 Постановка задачи: итеративный анализ конфигураций склада для оптимизации соотношения «стоимость – эффективность»

Опираясь на изложенную методологию, сформулируем конкретную задачу исследования в рамках моделирования дистрибутивного ТПС-склада.

Цель экспериментов: определить такую конфигурацию складской системы, при которой операционная эффективность (производительность, скорость обслуживания заказов, уровень выполнения запросов магазинов в срок) достигается максимально возможная при минимально необходимых затратах ресурсов. Проще говоря, найти баланс между вложениями в склад (трудовые и технические ресурсы, мощности) и достигаемым качеством работы.

Для этого введем количественные критерии. В модели будут измеряться: Показатели эффективности (сервиса):

Среднее время цикла заказа – от момента поступления заказа от магазина на склад до момента отгрузки этого заказа в машину. Это отражает скорость обслуживания. Стремимся его минимизировать.

Процент заказов, выполненных вовремя (OTIF) On Time In Full – будем считать, что у каждого заказа есть дедлайн. Целевой уровень сервиса может быть, например, 95%. Стремимся, чтобы не менее 95% заказов отправлялись вовремя.

Для упрощения, OTIF будет рассчитываться исходя из среднего времени, затраченного на выполнения заказа, который будет состоять из времени ожидания на сборку заказа, время, затраченное на сборку заказа и время, затраченное на загрузку заказа в отгружающуюся машину.

Для стандартизации показателя эффективности, возьмем общепринятые вводные для показателя эффективности OTIF – 90%. В общепринятой практике, с учетом средней времени доставки в города Казахстана, для достижения 100%-го уровня обслуживания необходимо затрачивать на заказ 4

часа, либо же 240 минут. Исходя из этого, можно выявить градацию, описанную в таблице 2 [33].

Таблица 2 – Градация уровня OTIF в соответствии со средним временем, которое затрачивается на заказ

OTIF (%)	Среднее время (мин) заказа, минут
100	240
98	250
96	260
94	270
93	285
92	295
90	305
88	315
86	325
84	330

Пропускная способность – сколько заказов (или отгруженных паллет/коробов) склад способен обработать в сутки при заданной конфигурации. Этот показатель важен для понимания загрузки: сравним его со среднесуточной потребностью. Желательно иметь небольшой запас пропускной способности над средним потоком, чтобы покрывать пики.

Загруженность ключевых ресурсов – средний процент занятости погрузчиков, комплектовщиков, доков. Если загруженность близка к 100%, это узкое место, влияющее на сервис. Оптимально, чтобы критические ресурсы были загружены, скажем, на 80% – тогда есть резерв на колебания.

Показатели стоимости:

Количество и тип оборудования – погрузчики (их аренда/амортизация и эксплуатационные расходы), конвейерные линии (если применяются).

Инфраструктура – число доков, площадь склада. Увеличение этих параметров ведет к капитальным и операционным затратам (больше коммунальных расходов, охраны и т.п.).

Этот интегральный показатель будет называться “стоимостью конфигурации”. Цель – её снижения, но не ценой падения сервиса ниже приемлемого уровня.

Разумеется, одновременно варьировать все эти факторы очень сложно – пространство вариантов большое. Поэтому можно подойти постепенно:

- с начала определить узкие места базового сценария. Например, задать некоторую разумную начальную конфигурацию (по аналогии с реально наблюдаемым на подобных складах) и посмотреть, где ресурсная нагрузка максимальна. Если обнаружится, что погрузчики перегружены, а доки

полупустуют – основное надо регулировать. Если доков не хватает – варьировать.

- Затем провести пошаговую оптимизацию по факторам. Например, при-фиксировать все, кроме N_{pick} , увеличить N_{pick} пока сервис перестанет расти. Зафиксировать оптимум, потом варьировать N_{lift} , и так далее. В конце можно проверить комбинации около найденных значений, чтобы убедиться, что взаимодействие факторов не дало другой оптимум.

Итеративный характер анализа как раз предполагает такой пошаговый перебор и корректировку. Имитационная модель позволяет быстро проверять гипотезы: скажем, “что если добавить 1 погрузчик?”, “что если перейти на 24-часовую работу склада?”. Планируется это следующим образом: меняя по одному параметру и отслеживая изменение метрик, найти пороги, после которых отдача убывает. Например, может оказаться, что от 1 до 3 погрузчиков время обслуживания падает с 48 до 24 часов, а с 3 до 4 – уже незначительно (20 часов). Значит, 3 – достаточное число (далее можно инвестировать лучше в другое).

Границы и допущения модели: Для ясности, что анализ проводится при допущении стабильного среднего суточного потока. Экстремальные авральные ситуации не рассматриваются (например, ажиотаж перед праздниками, когда спрос скачет в 2 раза) – это отдельный сценарий, который можно изучить при необходимости, заложив соответствующий спрос. Здесь – “номинальный режим”. Также предполагается, что номенклатура товаров достаточно широка, но усредняются ее характеристики: то есть не моделируется каждый SKU отдельно со своим спросом, а скорее общий поток. Это упрощение, чтобы модель не была чрезмерно сложной. Тем не менее, если потребуется, AnyLogic позволил бы учесть даже каждый товар как отдельный агент.

Критерии приемлемости решения: Можно заранее установить, что устроит цели исследования, например, средний цикл ≤ 24 часов и $\geq 95\%$ заказов вовремя, при этом минимизировать затраты. Или наоборот: бюджет ограничен N у.е., надо выжать максимум эффективности из него. В зависимости от этого подход либо поиск минимальной стоимости, удовлетворяющей сервисным ограничениям (задача с ограничениями), либо оптимизация взвешенной суммы, как упомянуто выше.

Сформулировав задачу таким образом, переходим непосредственно к экспериментальной работе с моделью. Ожидается, что результатом будут рекомендации по оптимальной конфигурации: сколько работников и техники следует использовать, нужен ли переход на более продолжительный режим работы, сколько доков оптимально открыть, и т.д., – чтобы склад ТПС функционировал эффективно, не неся лишних расходов.

Выполнение имитационного моделирования согласно вышеописанной постановке позволит обоснованно ответить на эти вопросы. В заключении работы будут приведены конкретные цифры и графики, демонстрирующие, например: “увеличение вилочных погрузчиков с 8 до 12 сокращает средний

цикл заказа с 30 до 20 часов, но дальнейшее увеличение до 16 дает лишь до 18 часов; при этом затраты возрастают пропорционально численности – следовательно, оптимум около 12 вилочных погрузчиков”. Подобные выводы и станут ключевым результатом второй главы, связывая теоретические основы логистики с практическим применением моделирования для улучшения работы дистрибутивных складов ТПС.

Таким образом, в этой главе рассмотрены подходы и инструменты моделирования логистических систем, подробно остановились на возможностях AnyLogic для моделирования складских операций, описаны методические шаги построения модели и наконец определена задачу экспериментального исследования конфигураций склада. Дальнейшая работа заключалась бы в реализации этой модели и проведении серии экспериментов, результаты которых будут представлены и проанализированы в следующей части. Здесь же, в рамках первых двух глав, заложена теоретическая и методическая база для такого практического исследования. Каждый приведенный шаг и решение опирается на современные научные публикации и практический опыт в области логистики и моделирования, что подтверждается использованными источниками. Например, важность распределительных центров и их роль в эффективности цепей ТПС подтверждены исследованиями, применение имитации для оценки и улучшения логистических процессов – устоявшаяся практика. В следующей главе (практической части) эти знания найдут применение для решения конкретной производственной задачи оптимизации логистической системы распределительного склада.

3 СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ В СРЕДЕ ANYLOGIC, ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗ С ПОМОЩЬЮ ИТЕРАЦИЙ

3.1 Описание модели

Распределительные центры играют важнейшую роль в современных логистических системах, обеспечивая эффективную обработку, хранение и распределение товарных потоков. Рассматриваемая модель описывает базовые этапы операционной деятельности распределительного центра, включая разгрузку, комплектацию и загрузку. Каждый из этих процессов представляет собой логически обособленную, но взаимосвязанную часть единой логистической цепочки, направленной на обеспечение высокого уровня сервиса, сокращение логистических издержек и соблюдение сроков поставки.

Процесс разгрузки является первым этапом в цепочке внутрискладской обработки грузов. По прибытии в распределительный центр грузовой автотранспорт направляется к одному из доступных разгрузочных доков. Выгрузка товарных паллет осуществляется с применением вилочных погрузчиков, обеспечивающих механизированную и, соответственно, более быструю и безопасную обработку поступающих грузов. Первоначально паллеты размещаются в зоне приёма, которая выполняет функцию временного буфера между транспортным и складским звеном.

Этап комплектации представляет собой операционную деятельность по сборке заказов из ранее размещённых на складе паллет. Комплектация может включать как однородные паллеты одного типа продукции, так и гетерогенные наборы, соответствующие индивидуальным требованиям клиента. Ключевым ограничением при сборке заказа является наличие свободного пространства в зоне комплектации, расположенной вблизи погрузочных доков. При нехватке места может использоваться дополнительная зона хранения, предназначенная для подготовки объёмных или сложных заказов.

Формирование заказа возможно исключительно при условии наличия на складе необходимого количества паллет требуемых номенклатурных позиций. Перемещение паллет в зону комплектации осуществляется погрузочной техникой. Эффективность данного этапа во многом зависит от алгоритмов складской адресации, уровня автоматизации и квалификации персонала. Целью является минимизация времени сборки заказа при строгом соблюдении его конфигурации.

После завершения процесса сборки заказов осуществляется их погрузка в автотранспорт. Для этого каждому заказу назначается грузовик, который направляется к соответствующему погрузочному доку. Погрузка также производится с использованием вилочных погрузчиков, обеспечивая механизированный перенос собранных товаров из зоны комплектации непосредственно в транспортное средство.

Для оптимизации затрат на транспортировку и повышения коэффициента использования вместимости автомобилей, погрузка

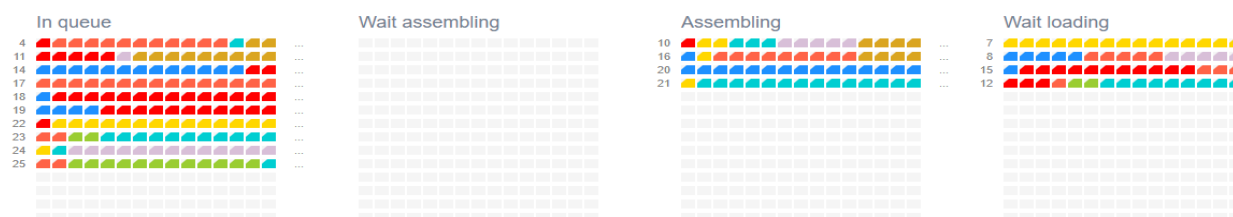


Рисунок 2 – Схема заказов в очереди.

Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

осуществляется только при условии, что суммарный объём заказа составляет не менее 50% грузоподъёмности транспортного средства. Такой подход позволяет снизить количество рейсов, оптимизировать маршруты и уменьшить углеродный след логистической деятельности. Таким образом, процесс загрузки завершает логистический цикл внутри распределительного центра, обеспечивая дальнейшее перемещение товаров к конечному потребителю. Вышеописанная модель имеет следующий вид AnyLogic.

На рисунке 3 изображена внутренняя логистическая структура современного распределительного склада, смоделированная в программной среде AnyLogic с использованием библиотеки Material Handling Library.

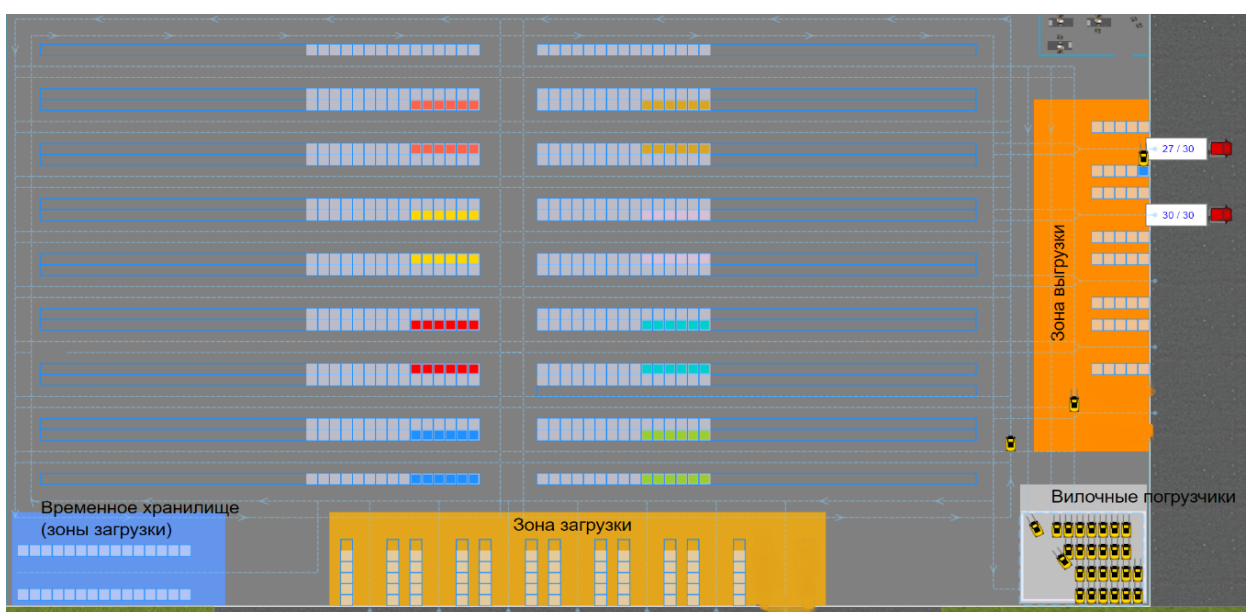


Рисунок 3 – Архитектура склада в AnyLogic

Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

Модель наглядно отражает архитектуру хранения, зонирования, а также логистику погрузочно-разгрузочных операций, организованных на складе.

Основную площадь склада занимают стеллажи, организованные в виде параллельных рядов. Каждый стеллаж состоит из 3 уровней хранения при общей что позволяет эффективно использовать вертикальное пространство.

На складе чётко выделены и промаркированы функциональные зоны:

Зона загрузки (южная часть склада, отмечена жёлтым) – предназначена для отгрузки товаров, сгруппированных по направлениям. В данной зоне располагаются доки, ориентированные на приём транспортных средств, с возможностью параллельной обработки нескольких операций.

Зона выгрузки (восточная часть, отмечена оранжевым) – служит для приёма входящего товаропотока. Эта зона напрямую связана с внешними транспортными средствами, которые прибывают на выделенные парковочные места у восточной границы склада. Товары, поступающие сюда, далее направляются в зону временного хранения или непосредственно на стеллажи.

Временное хранилище (юго-запад) – играет роль буфера между зонами выгрузки и основным складским пространством. Здесь грузы могут аккумулироваться до момента перемещения в основную ячеистую систему хранения. Такая структура повышает гибкость логистики и снижает риски перегрузки стеллажной зоны.

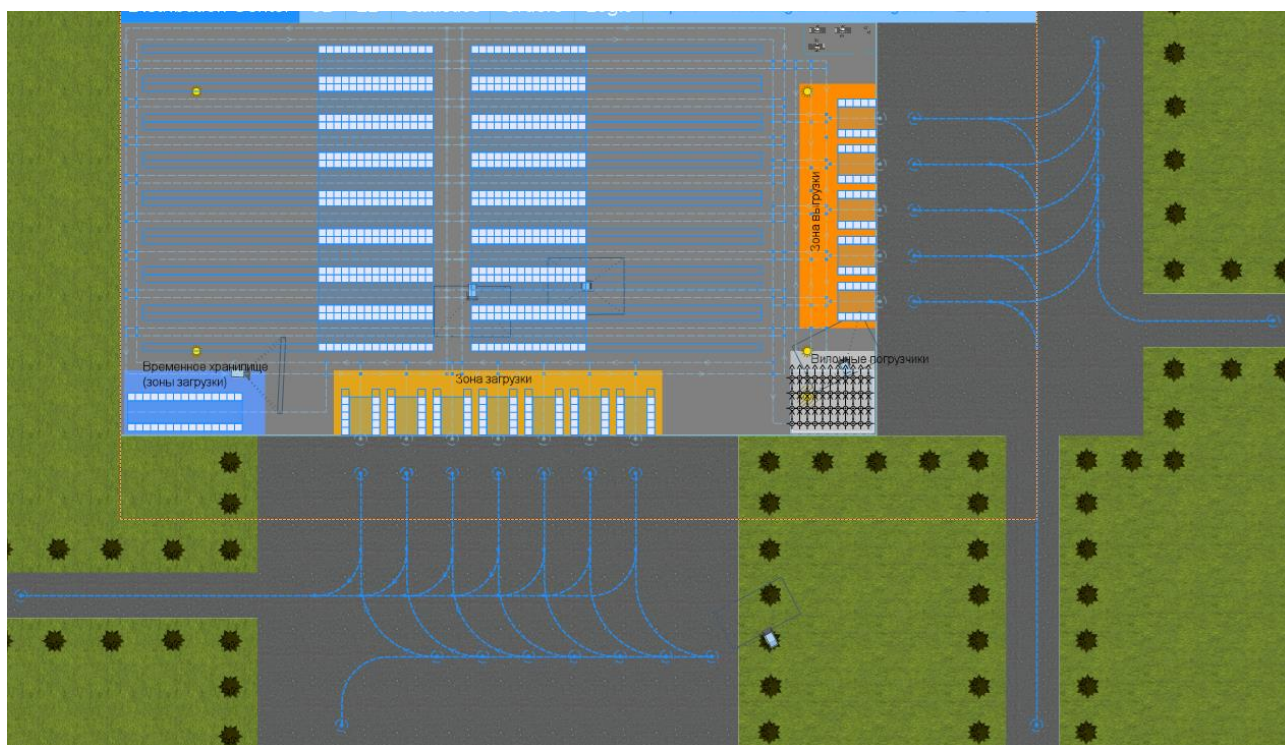


Рисунок 4 – Схема путей с элементами разметки пространства

Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

Вилочные погрузчики (юго-восток) – в модели предусмотрена стоянка для вилочных погрузчиков, используемых для внутрискладских транспортных операций. Их движение осуществляется по заданной маршрутной сети,

обозначенной синими стрелками, которые формируют транспортную сеть склада (Material Handling Network).

Парковочная зона для грузового транспорта – внешняя зона с отдельными парковочными местами, предназначенная для грузовых автомобилей, прибывающих на склад с целью погрузки или выгрузки.

Модель включает в себя разветвлённую сеть маршрутов (path network), обеспечивающую оптимизацию движения погрузчиков. Направления движения обозначены стрелками, а зоны пересечения и ключевые точки маршрутов могут быть дополнительно заданы через узлы маршрутизации (nodes). Это позволяет моделировать временные задержки, конфликты ресурсов, а также оценивать пропускную способность зон.

Таким образом, представленная схема моделирует реалистичный сценарий работы распределительного центра с комплексной архитектурой хранения и чётким разграничением логистических процессов. Использование вертикального пространства за счёт многоуровневых стеллажей, организация буферных зон и маршрутной сети для автотранспорта позволяет анализировать эффективность складской логистики и проводить тестирование различных сценариев оптимизации.

Данная схема моделирует процессы с помощью потоковой диаграммы ниже, представленной на рисунке 5. Стоит отметить, что при разработке

потоковой диаграммы также используются агенты, создаваемые в модели, а также язык программирования Java для отладки команд, которые создают взаимодействие между элементами. Подробно с программным кодом можно ознакомиться в Приложении А.

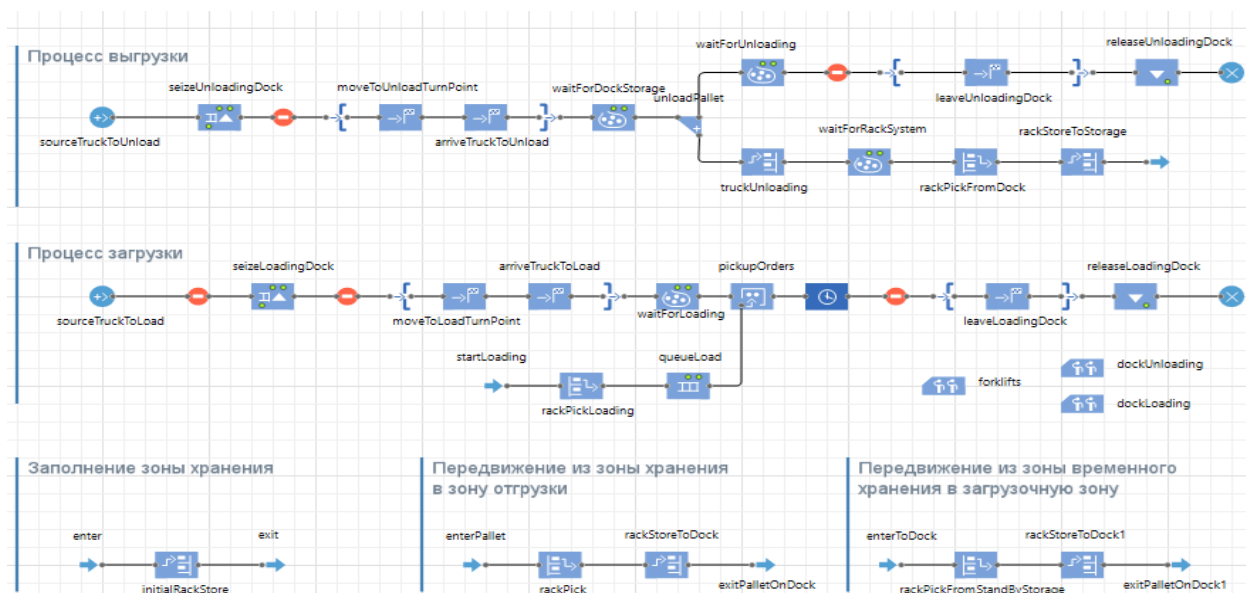


Рисунок 5 – Потоковая диаграмма модели в AnyLogic

Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

Представленная модель выполнена в среде имитационного моделирования AnyLogic и отражает сквозной процесс обработки грузов в

распределительном центре. Модель построена в виде потоковой диаграммы и охватывает ключевые этапы логистических операций: выгрузку, хранение, подбор заказов и отгрузку. Модель также включает управление ресурсами (в первую очередь, вилочные погрузчики) и зонирование пространства склада.

Процесс начинается с прибытия транспортного средства в зону разгрузки (блок `sourceTruckToUnload`). Сначала осуществляется захват одного из доступных разгрузочных доков (`seizeUnloadingDock`), после чего грузовик перемещается в точку разгрузки (`moveToUnloadTurnPoint`, `arriveTruckToUnload`).

Затем грузовик ожидает освобождения зоны хранения у разгрузочного дока (`waitForDockStorage`), после чего происходит выгрузка паллет (`unloadPallet`). Выгруженные паллеты поступают во временную буферную зону, откуда они с помощью вилочных погрузчиков (`truckUnloading`, `forklifts`) транспортируются в основную зону хранения (`rackPickFromDock`, `rackStoreToStorage`).

После завершения выгрузки грузовик освобождает док и покидает зону разгрузки (`releaseUnloadingDock`).

Модель предусматривает два основных направления перемещения паллет:

Первичное наполнение зоны хранения — с использованием источника `initialRackStore`.

Перемещение паллет из зоны хранения к докам отгрузки — по маршруту `rackPick` → `rackStoreToDock` → `exitPalletOnDock`.

Также реализован альтернативный путь через временную буферную зону, когда паллеты предварительно перемещаются на специальную площадку, откуда они впоследствии поступают в зону загрузки (`rackPickFromStandByStorage` → `rackStoreToDock1` → `exitPalletOnDock1`).

Аналогично процессу выгрузки, операция начинается с прибытия грузовика (`sourceTruckToLoad`) и захвата загрузочного дока (`seizeLoadingDock`). После проезда по точке поворота (`moveToLoadTurnPoint`) и прибытия на позицию (`arriveTruckToLoad`), грузовик ожидает начала загрузки (`waitForLoading`).

Параллельно в системе инициируется сбор заказов (`pickupOrders`), который обеспечивается забором паллет с мест хранения (`rackPickLoading`) и их перемещением в очередь на загрузку (`queueLoad`). Вилочные погрузчики (ресурс `forklifts`) участвуют в процессе перемещения паллет в зону загрузки (`dockLoading`).

После завершения загрузки грузовик покидает склад через блоки `leaveLoadingDock` и `releaseLoadingDock`.

Модель реализует использование ограниченного парка вилочных погрузчиков, которые назначаются на перемещение паллет между зонами: от разгрузки к складу, от склада к отгрузке, а также из буферной зоны в зону загрузки. Это позволяет оценить степень загрузки ресурса и выявить возможные узкие места, связанные с нехваткой техники.

Данная потоковая диаграмма демонстрирует полный жизненный цикл обработки грузов в распределительном центре: от прибытия и выгрузки, через складирование и подбор, до финальной отгрузки заказов. Модель может быть использована для анализа логистических узких мест, оценки времени выполнения операций, а также проведения стресс-тестов при пиковых нагрузках. Интеграция ресурсов (вилочные погрузчики), очередей и условий ожидания делает систему реалистичной и пригодной для дальнейшей оптимизации.

Представленные динамические параметры модели служат для точной настройки временных характеристик и распределения ресурсов, влияющих на общую эффективность логистических операций (Рисунок 6).

Интенсивность поступления и обработки транспортных средства – параметры, задающие интервалы между прибытием грузовиков и временем ожидания у доков, что определяет нагрузку на систему.

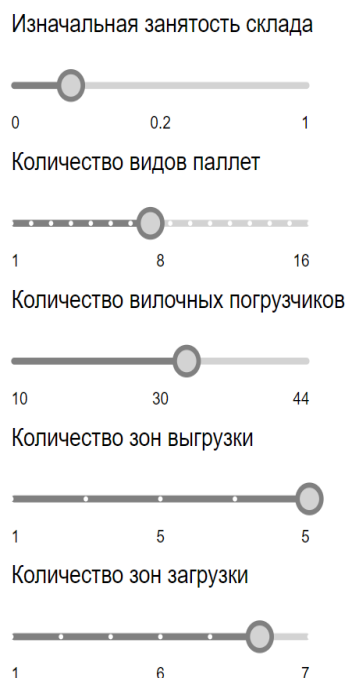


Рисунок 6 – Интерфейс изменения динамических параметров модели
Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

Временные параметры операций фиксируют длительность ключевых процессов, таких как разгрузка, загрузка и манёвры транспортных средств, влияющих на сервисное время.

Параметры работы ресурсов включают динамические настройки, связанные с использованием вилочных погрузчиков и другими технологическими единицами, обеспечивающими перемещение паллет.

Буферизация и складирование определяют вместимость и временные характеристики промежуточных зон хранения, влияющие на уровень запасов и скорость их перемещения между этапами логистической цепочки.

Эти параметры позволяют гибко адаптировать модель к различным сценариям работы распределительного центра, обеспечивая возможность анализа и оптимизации процессов при изменении условий эксплуатации.

Помимо этого, также можно изменять параметры ресурсов, заказов,

Вилочные погрузчики – количество доступных единиц техники для перемещения паллет внутри склада. Ключевой ограничивающий ресурс, влияющий на скорость загрузки/выгрузки и сбор заказов.

ВП на сбор заказа – число погрузчиков, выделенных исключительно на комплектование заказов. Позволяет разделить функциональные потоки ресурсов.

Машин на выгрузке в час – интенсивность прибытия грузовиков с паллетами. Определяет нагрузку на зону разгрузки.

Машин на загрузке в час – интенсивность отправки заказов. Формирует поток на сторону отгрузки.

Паллет в машине – среднее количество паллет в одном грузовике. Влияет на загрузку склада и трудоёмкость операций разгрузки/погрузки.

Погрузчиков на одну зону разгрузки – распределение ресурсов по зонам. Важный параметр для балансировки загрузки оборудования.

Заказы в час – интенсивность входящего потока заказов. Основной драйвер нагрузки на систему подбора и отгрузки.

Минимальный заказ/Максимальный заказ – диапазон количества паллет на заказ. Влияет на вариативность нагрузки и возможность агрегирования операций (рисунок 7).

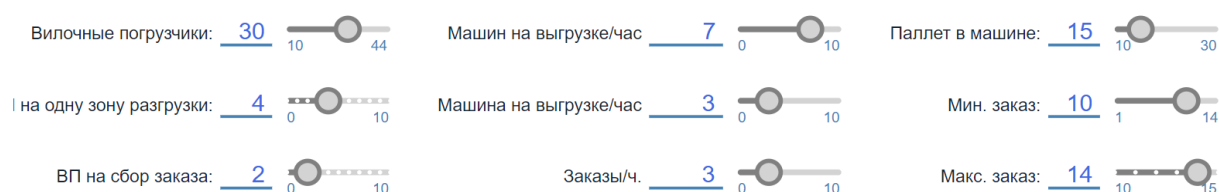


Рисунок 7 – Интерфейс изменения и взаимодействия с параметрами ресурсов и операций

Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

Параметры служат основой для настройки сценариев симуляции, позволяя исследовать поведение логистической системы при различных комбинациях нагрузки и ресурсной обеспеченности.

Сбор результатов моделирования осуществляется с помощью инструментов визуализации AnyLogic. Графики имеют вид, представленный на рисунке 8.

Данная визуализация представляет собой серию графиков, автоматически формируемых в среде имитационного моделирования AnyLogic, и предназначена для наглядного анализа работы логистической системы в динамике. Эти графики служат важным инструментом,

позволяющим не только следить за ходом моделирования, но и глубже понять внутреннюю логику функционирования распределительного центра.

Отслеживание ключевых процессов – графики отображают, как изменяются основные параметры логистической системы во времени – например, количество активных погрузчиков, число заказов, проходящих через систему, или уровень занятости доков. Это позволяет видеть, насколько стабильно работает система при заданных условиях.

Через визуализацию можно оценить эффективность распределения ресурсов, выявить избыточные нагрузки на отдельные участки и определить моменты, когда производственные мощности приближаются к критическим значениям. Важно не только сколько поступает или отгружается продукции, но и насколько сбалансированы эти потоки. Графики помогают выявить дисбаланс между входящими и исходящими операциями, а также определить наличие узких мест (рисунок 8).

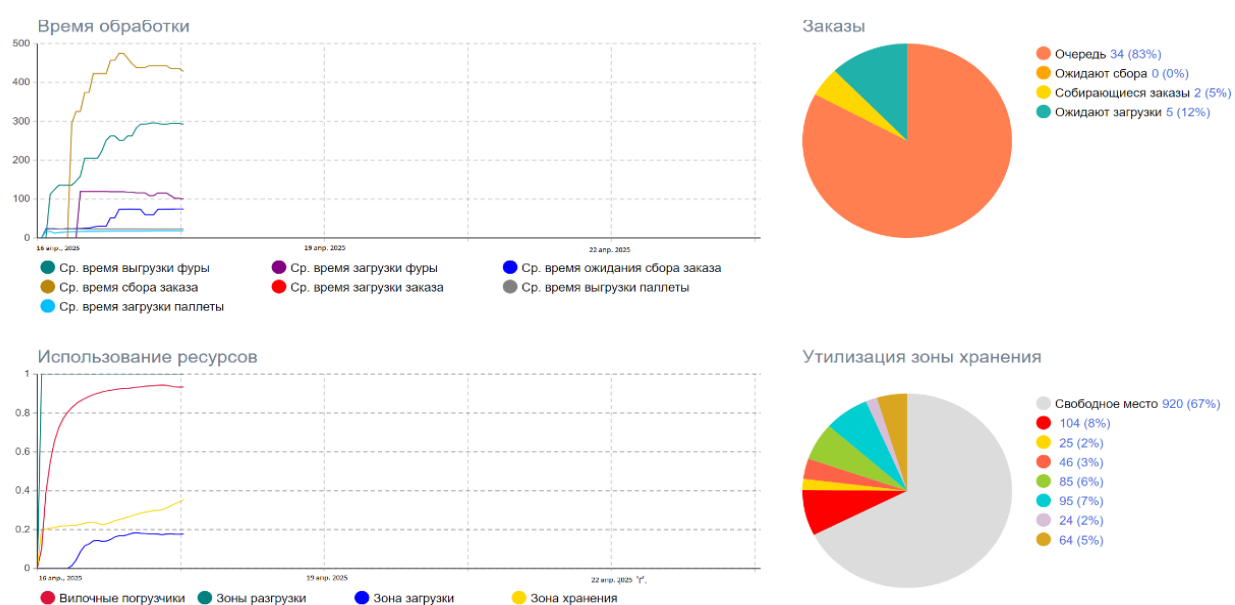


Рисунок 8 – Графики сбора информации с показателей с модели

Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

Поддержка сценарного анализа - при варьировании параметров модели (например, числа заказов, видов паллет или количества техники) визуализация позволяет оперативно увидеть, как изменяется поведение всей системы. Это делает модель особенно ценной для принятия управленческих решений и оценки устойчивости логистических процессов.

Таким образом, визуализация в AnyLogic выполняет не только иллюстративную, но и аналитическую функцию, превращая массивы моделируемых данных в понятную и интерпретируемую форму. Она помогает не просто наблюдать за системой, но и глубже понять её поведение, ограничения и потенциальные зоны для оптимизации.

3.2 Проведение итераций моделирования при различных параметрах

Базовая модель была построена на основании практик и архитектур складов ТПС-компании, осуществляющую свою деятельность в Казахстане. Обычно, подобные компании привлекают услуги третьих компаний по предоставлению складских площадей. В данном случае, рассматривается секция склада ТПС компании, арендующая складские мощности у поставщика услуг “Continental Logistics”.

На склад поступает 10 различных номенклатур, которые заказываются со склада. Номенклатуры поступают с помощью фур, которые прибывают на склад каждый час. В одной фуре стандартное количество паллет – 30, так как это оптимальное расположение количества паллет продукции, с учетом того, что каждая паллета весит 600-700 кг, что соответствует грузоподъемности стандартной фуры – 20 000 кг. Склад заполнен на 50% на начало моделирования.

Склад в его изначальной, базовой конфигурации, описанный в модели имеет 1440 паллетомест в зоне основного хранения. Зона основного хранения имеет 8 проходов для вилочных погрузчиков в конфигурации, отраженной на рисунке. Каждый из проходов имеет по 2 ряда стеллажей с каждой стороны, сами ряды разделены центральным проездом для вилочных погрузчиков, обеспечивающих эффективное передвижение по складу. Сами стеллажи же имеют 15 ячеек в каждом ряду, а также высоту в 3 ячейки. Таким образом, 1 ряд вмещает в себя 45 паллет.

Помимо этого, базовый склад имеет 4 активных зоны выгрузки товаров, куда поступает входящий поток грузов. На каждой из зон присутствует по два ряда стеллажей, с конфигурацией 5 паллет на ряд и 3 уровня. Таким образом, каждая зона выгрузки вмещает в себя 30 паллет, что равно грузоместимости поступающих машин.

На исходящем потоке из склада, существует 6 активных зон погрузки машин, который имеет такую же конфигурацию стеллажей, как и на зоне погрузки. Сама зона погрузки, хоть и имеет 30 паллет вместимости каждая, отгружает от 20 до 30 паллет, в зависимости от того, какой заказ был направлен. Заказы генерируются случайно. На зоне выгрузки, по мере поступлений заказов, которые поступают с интенсивностью от 1 до 2 заказов в час, собираются заказы из 10 номенклатур, которые присутствуют на складе. С учетом того, что на склад поступают заказы с интенсивностью от 1 до 2 заказов в час. После того, как заказы скомплектованы полностью, подъезжают фуры с интенсивностью 2 фуры в час.

Работу склада осуществляют 15 вилочных погрузчиков. На разгрузку одной фуры, может быть одновременно задействовано 4 вилочных погрузчика, на погрузку - 2.

Таким образом, проведя эксперимент моделирования, который длился на протяжении одного месяца моделирования, учитывая что склад работает круглосуточно, были получены следующие результаты.

Вилочные штабелеры, в среднем, были загружены на 76% на протяжении всего эксперимента.

Зоны выгрузки были загружены в среднем на 99-100%, т.е. возникали очереди на входящий поток на склад, что и есть очевидное очевидное бутылочное горлышко. В очереди фуры стояли в среднем от 8 до 12 часов. За 30 дней моделирования, фуры простояли более чем на 12 часов в 17 случаях (максимальнееый простой – 18 часов). Штраф за простой более чем 12 часов оценивается перевозчиками в 93000 тенге в среднем, при условии, что простой мог продлиться не более 18 часов.

С доступностью номенклатур проблем не возникало, так как входящий поток машин постоянно обеспечивал необходимыми номенклатурами склад.

Зона отгрузки же, в свою очередь, была загружена только на 40%.



Рисунок 9 – Конфигурация склада при 5 зонах разгрузки и 4-х зонах загрузки для проведения сценариев «Б» и «В»

Примечание – рисунок взят из подготовленной модели в AnyLogic

Время ожидания сбора заказа на исходящий поток составило 90 минут в среднем на протяжении всего эксперимента, среднее время сбора заказа – 116 минут, время загрузки собранного заказа – 45 минут. Таким образом, в среднем на один заказ затрачивалось 251 минута. При данном показателе OTIF был равен 93% - что выше показателей эффективности на 3%, что дает нам возможность снижения показателей эффективности до уровня 90% на данном участке, при этом увеличивая эффективность на других участках. Время ожидания выгрузки одной машины (поступающий поток на склад) составило 75 минут.

Сценарий «А». При сценарии А, было изменено максимальное количество вилочных погрузчиков, которые бы были задействованы одновременно на разгрузку одной фуры.

С 4 вилочных погрузчиков, данные показатели были повышены до 6. В данной итерации, время на разгрузку одной фуры значительно уменьшилось, а загрузенность зоны выгрузки снизилась до 89%. При этом сценарии, фуры стояли в очереди в среднем от 6 до 10 часов, а максимальные значения достигли 13 часов. Таким образом, за 30 дней моделирования сценария А, количество штрафов уменьшилось до 1 случая в 5 дней. Тем не менее, при заданных показателях значительно снизился уровень OTIF – который упал до 84%. При данном показателе OTIF ниже целевого на 6%.

Сложно оценить экономическое влияние на прибыль, так как разные заказы имеют разную степень маржинальности в зависимости от состава, тем не менее, девиация от целевых значений является нежелательным для компании, так как за этим следуют не только экономические, но и репутационные риски перед потребителями – большими сетями как Magnum, Galmart и другими, которые также предусматривают штрафы за отсутствие товара и задержку его бесперебойной доставки.

Сценарий «Б». При сценарии Б было изменено количество зон выгрузки машин с 4 до 5, в то время как зоны отгрузки были сокращены до 5. При таком раскладе, учитывая что все остальные показатели оставались такими же, удалось достичь следующих результатов. Уровень OTIF упал относительно базового сценария с 93% до 87% с увеличением времени, затраченного на заказ до 330 минут в среднем, в то время как очередь на выгрузке составила в среднем 11 часов, достигая максимального значения времени ожидания в очереди на выгрузку 14 часов. Количество штрафов было сокращено вдвое до 1 случая в 4 дня на протяжении 30 дней.

Сценарий Б предоставляет более сбалансированное решение, чем сценарий А, тем не менее, он не идеален – так как потеря в уровне сервиса, измеряемого OTIF 5% всё равно был сочтён нежелательным.

Сценарий «В». При формулировке сценария В, было принято решение взять за основу изменения, сделанные в Сценарии Б – было увеличено количество зон выгрузки машин с 4 до 5 относительно базового сценария, зоны отгрузки были сокращены до 5. Взаимное уменьшение и увеличение зон загрузки и зон выгрузки не влечет дополнительных затрат. Помимо этого, было добавлено дополнительно количество вилочных погрузчиков, увеличивая их общее количество. В дополнение к увеличению вилочных погрузчиков, также были пересмотрены количество вилочных погрузчиков, которые максимально могут быть использованы сбора одного заказа с 2 до 3. В Сценарии «В» были проведены дополнительные эксперименты, где количество вилочных погрузчиков увеличивалось градуально – с 15 до 20.

Таблица 3 – Показатели OTIF при проведении экспериментов в модели AnyLogic

Сценарий	OTIF (%)	Количество заказов в месяц	Количество заказов, выполненных невовремя	Количество заказов, выполненных вовремя	Среднее время, затраченное на заказ, минуты
Базовый	93%	1080	76	1004	251.2
Сценарий "А"	84%	1080	173	907	265.6
Сценарий "Б"	87%	1080	140	940	260.8
Сценарий "В", 16 в. п.	88.30 %	1080	126	954	258.72
Сценарий "В", 17 в. п.	89%	1080	119	961	257.6
Сценарий "В", 18 в. п.	90.20 %	1080	106	974	255.68
Сценарий "В", 19 в. п.	90.50 %	1080	103	977	255.2
Сценарий "В", 20 в. п.	91%	1080	97	983	254.4

В результате было выяснено, что при такой конфигурации, и после увеличения количества погрузчиков до 18, уровень OTIF равен 90%, при этом количество штрафов уменьшается до 1 случая в 5 дней.

Таблица 4 – Показатели затрат при проведении экспериментов в модели AnyLogic

Сценарий	Количество штрафов от поставщика в услуг, шт/мес	Количество вилочных погрузчиков	Сумма штрафа в месяц, тенге	Затраты на вилочные погрузчики, тенге/мес	Итоговые издержки
Базовый	17	15	1752000	4500000	6081000
Сценарий "А"	6	15	438000	4500000	5058000
Сценарий "Б"	8	15	584000	4500000	5244000

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6
Сценарий "В", 16 в. п.	7.1	16	518300	4800000	5460300
Сценарий "В", 17 в. п.	6.6	17	481800	5100000	5713800
Сценарий "В", 18 в. п.	6	18	438000	5400000	5958000
Сценарий "В", 19 в. п.	5.8	19	423400	5700000	6239400
Сценарий "В", 20 в. п.	5.7	20	416100	6000000	6530100

Дальнейшее увеличение виловых погрузчиков уже не давало такой пользы, которое бы оправдало затраты на дополнительный ресурс виловых погрузчиков.

Для расчёта OTIF была использована формула, ранее упомянутая в Главе 2. Подробные расчёты OTIF представлены в Приложении «Б». Как видно, при разных итерациях Сценария “В”, с разным количеством погрузчиков, таргетируемый OTIF в 90% достигается на итерации с 18 виловыми погрузчиками.

Помимо этого, были также оценены суммарные затраты при каждом из сценариев. Как упоминалось ранее, переоборудование зоны отгрузки в зону отгрузки сочтено за 0 тенге, соответственно сценарии Б и В не несут дополнительных затрат помимо увеличения количества виловых погрузчиков. Расчёты суммарных затрат представлен в таблице 4. В третьем разделе, на основе сравнительного анализа сценариев моделирования выявлено, что оптимальной конфигурацией склада является Сценарий В с 18 виловыми погрузчиками. Данный вариант обеспечивает достижение целевых показателей эффективности: уровень сервиса (OTIF) достигает порядка 90%, что соответствует установленному KPI по своевременной и полной отгрузке заказов при минимальных сопутствующих потерях. При этом повышение

ОТІФ сверх ~90% не приносит существенной дополнительной выгоды – сценарии с 19 и 20 погрузчиками лишь незначительно улучшали показатель ОТІФ (свыше 90%), но требовали несоразмерно больших расходов, делая их экономически неоправданными. Напротив, использование меньшего числа погрузчиков (сценарии с <18 единиц) приводило к недо достижению целевого уровня обслуживания и появлению штрафных санкций за просрочку, что также снижало эффективность, что отражено на рисунке 10. Таким образом, 18 погрузчиков представляют собой рациональный компромисс между избыточностью и нехваткой перегрузочной техники: с одной стороны, избыточное количество погрузчиков приводит к простоям и снижению эффективности работы склада, с другой – их недостаток вызывает скопление грузов и задержки в отдельных зонах.

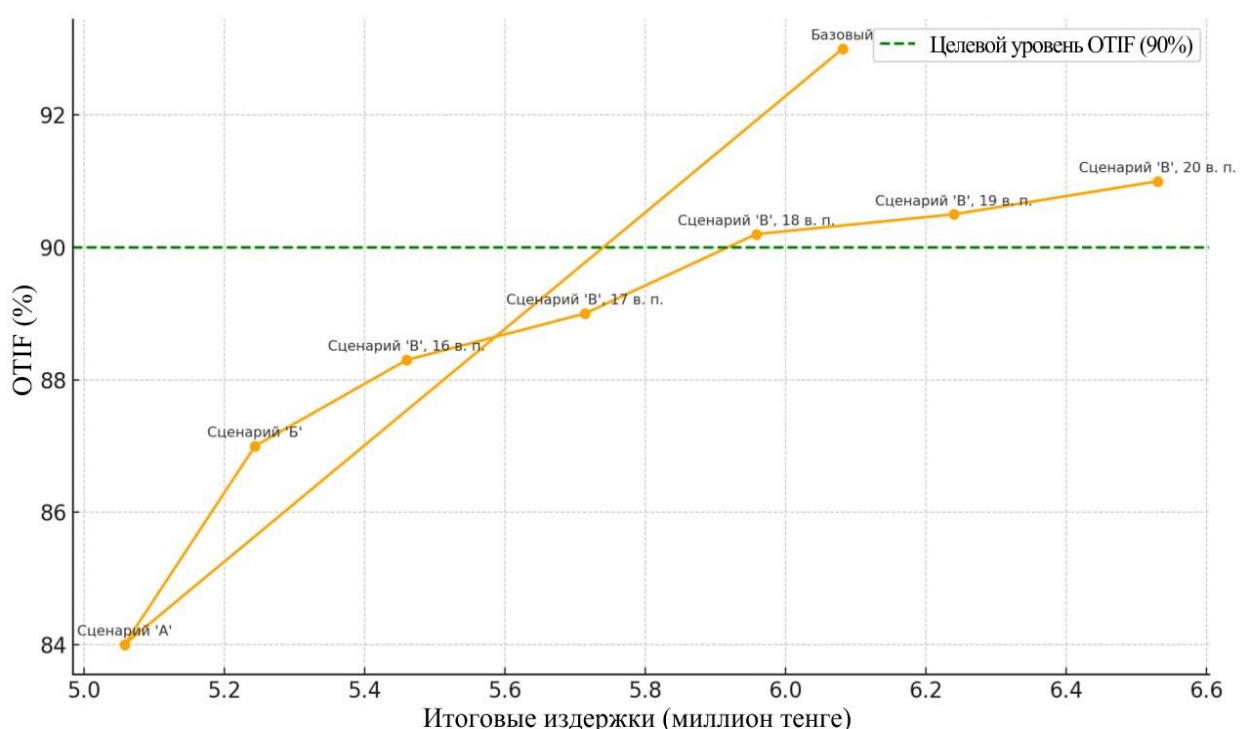


Рисунок 10 – График зависимости уровня сервиса (ОТІФ) от итоговых издержек в миллионах тенге

Примечание – данные для графика получены на основании расчётов и данных, собранных с помощью модели AnyLogic

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Логистическая инфраструктура дистрибутивных складов играет критически важную роль в обеспечении эффективности функционирования цепей поставок товаров повседневного спроса (ТПС). В условиях растущей конкуренции, высокого уровня требований со стороны потребителей и постоянных колебаний спроса, от организации и функционирования складов зависит способность всей цепи поставок адаптироваться к вызовам внешней среды и поддерживать заданный уровень сервиса. В настоящей диссертационной работе была поставлена цель – смоделировать логистическую систему распределительного склада с применением инструментов имитационного моделирования, выявить оптимальные параметры функционирования и дать рекомендации по снижению операционных затрат без ущерба для качества обслуживания клиентов.

В рамках первой главы работы был проведён всесторонний обзор теоретических основ функционирования логистических систем и дистрибутивных складов. Определены ключевые функции распределительных центров: консолидация и деконсолидация товарных потоков, формирование заказов, буферизация спроса, сокращение времени и затрат на доставку конечным потребителям. Особое внимание было уделено специфике складской логистики в ТПС-секторе, отличающемся высокой оборачиваемостью, широким ассортиментом и высокой частотой заказов. Также рассмотрены отличия в подходах к организации логистических систем в Казахстане, России и за рубежом, с выделением текущих проблем — таких как дефицит складских площадей класса А, неравномерная загрузка ресурсов и отсутствие автоматизации в ряде звеньев цепей.

Во второй главе раскрыты методологические и инструментальные подходы к моделированию логистических систем. Был проведён сравнительный анализ различных методов: аналитических (линейное программирование, теория очередей) и имитационных, с акцентом на преимущества последнего в условиях высокой сложности и стохастичности логистических процессов. В качестве основной среды моделирования была обоснованно выбрана платформа AnyLogic, как наиболее универсальная и гибкая для создания агентно-ориентированных и дискретно-событийных моделей, применительно к складам. Описаны этапы разработки модели: от формализации логики склада, задания параметров и логики работы вилочных погрузчиков и комплектовщиков, до проведения экспериментов и анализа результатов. Разработанная методология позволила построить адаптивную модель, отражающую реальные особенности распределительного склада, функционирующего в системе снабжения ТПС-компании.

Наиболее значимая часть работы была реализована в рамках третьей главы, в которой осуществлено имитационное моделирование деятельности распределительного склада и выполнено сравнение нескольких конфигураций

его функционирования. Сценарии отличались количеством задействованных вилочных погрузчиков и, соответственно, загрузкой ключевых ресурсов, временем выполнения заказов, количеством штрафов за задержки, а также общими операционными затратами. При этом сохранялась константа по количеству входящих заказов, логике их формирования и параметрам складской структуры.

На основании анализа полученных данных был сделан важный практический вывод: увеличение показателя OTIF выше 90% не приводит к существенным экономическим преимуществам, однако требует значительного увеличения затрат, особенно на ресурсы. Так, базовый сценарий с 15 погрузчиками обеспечивал OTIF 93%, но имел наибольшие суммарные издержки. Сценарии с 19 и 20 погрузчиками также демонстрировали OTIF выше 90%, но сопровождалась ростом расходов на аренду и обслуживание техники, при этом прирост уровня сервиса был минимален. Наоборот, сценарии с количеством погрузчиков менее 17 снижали OTIF ниже целевого порога в 90%, что влекло за собой увеличение штрафов от клиентов и потерю доверия.

Наиболее сбалансированным решением оказался Сценарий «В» с 18 погрузчиками, при котором достигнут оптимальный OTIF = 90.2% при значительном снижении совокупных издержек по сравнению с базовой конфигурацией. Выбранный вариант позволил снизить штрафные санкции за простой, поддержать уровень сервиса в целевых рамках и одновременно оптимизировать фонд оплаты за использование техники. Таким образом, было найдено рациональное соотношение между уровнем обслуживания и затратами, что особенно важно для логистики товаров массового спроса с низкой маржинальностью.

Одним из ключевых результатов данной работы стало подтверждение практической ценности применения имитационного моделирования в логистике. Разработка и тестирование модели в AnyLogic позволили с высокой степенью достоверности воспроизвести поведение системы в различных условиях, выявить «узкие места» (загрузку зоны разгрузки и ограниченную производительность при недостатке техники), спрогнозировать эффект от изменения конфигурации ресурсов и сформировать обоснованные рекомендации по повышению эффективности логистической системы. Без использования такого инструмента принятие подобных решений потребовало бы длительных и затратных пилотных внедрений на реальном складе, что сопряжено с рисками и возможными потерями. Моделирование же обеспечило безопасную и экономичную среду для тестирования гипотез и обоснования инвестиций.

Таким образом, цели и задачи, поставленные изначально, можно считать достигнутыми:

- проведен анализ текущего состояния логистики дистрибутивных складов ТПС;

- сформулирована и реализована имитационная модель типового склада с учётом ключевых параметров;
- выполнена серия итераций, позволившая выявить оптимальную конфигурацию ресурсов;
- обоснованы управленческие решения по оптимизации затрат без снижения уровня сервиса;
- доказана эффективность применения AnyLogic в задачах логистического анализа и планирования.

Реальным предприятиям в ТПС-секторе рекомендуется применять имитационное моделирование при проектировании или оптимизации логистических процессов, особенно в части конфигурации складов, графиков отгрузок и распределения техники. Для повышения точности модели на следующих этапах возможно подключение реальных данных WMS-систем, детализация номенклатуры, моделирование сезонных колебаний и экстремальных пиков (акционные периоды). Разработка цифровых двойников склада на базе AnyLogic или схожих платформ позволяет не только тестировать оперативные решения, но и прогнозировать поведение системы при изменении внешних условий (росте заказов, сбоях в поставках и пр.).

В целом, полученные результаты демонстрируют, что имитационное моделирование может стать неотъемлемой частью инструментов стратегического и оперативного управления логистикой, особенно в условиях быстро меняющихся рынков, характерных для ТПС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Аникин, Б. А. Логистика и управление цепями поставок. Теория и практика. Основы логистики: учебник / под ред. Б. А. Аникина, Т. А. Родкиной. – Москва: Проспект, 2019. – 344 с.
- 2 Гаджинский, А. М. Логистика : учебник. – 20-е изд. – Москва : Дашков и К, 2012. – 484 с.
- 3 Дыбская, В. В. Управление цепями поставок: учебник для вузов – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 457 с.
- 4 NF Group: В Казахстане все еще нет свободных складов // CRE.ru : [сайт]. 20.03.2024. – URL: <https://cre.ru/analytics/95222> (дата обращения: 10.06.2025).
- 5 Рынок складской недвижимости Казахстана. Март 2024 // IBC Real Estate: [документ]. – Апрель 2024. – URL: <https://ru.scribd.com/document/856043756/2024-04-Ibc-%D0%A1%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F-%D0%9D%D0%B5%D0%B4%D0%B2-%D0%9A%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D1%85%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B0> (дата обращения: 10.06.2025).
- 6 CORE.XP: Итоги 2024 года и прогноз на 2025 год на рынке складской недвижимости России // CORE.XP : [сайт]. – 04.12.2024. – URL: <https://corexp.ru/news/corexp-podvodit-itogi-2024-goda-i-delaet-prognoz-na-2025-god> (дата обращения: 10.06.2025).
- 7 Christopher, M. Logistics & Supply Chain Management. – Pearson UK, 2016. 320 p.
- 8 Frazelle, E. World-class warehousing and material handling. – McGraw-Hill, 2001. – 386 p.
- 9 Имитационное моделирование // NFP : [сайт]. – URL: https://nfp2b.ru/imitatsionnoe_modelirovanie/ (дата обращения: 10.06.2025).
- 10 Law, A. M. Simulation modeling and analysis. – 5th ed. – McGraw-Hill Education, 2015. – 768 p.
- 11 Лапова, А. В. Применение цифрового двойника в логистике / А. В. Лапова, Е. Ю. Бармина // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2021. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tsifrovogo-dvoynika-v-logistike> (дата обращения: 10.06.2025).

- 12 Исследование трендов DHL: введение цифровых двойников позволит... // Logistics.ru : [сайт]. – URL: <https://logistics.ru/avtomatizaciya-logistiki/issledovanie-trendov-dhl-vvedenie-cifrovyykh-dvoynikov-pozvolit> (дата обращения: 10.06.2025).
- 13 Richards, G. Warehouse Management: A Complete Guide to Improving Efficiency and Minimizing Costs in the Modern Warehouse. – Kogan Page Publishers, 2017. – 384 p.
- 14 Гаджинский, А. М. Современный склад. Организация, технологии, управление и логистика. – Москва : Проспект, 2005. – 176 с.
- 15 Сергеев, В. И. Управление цепями поставок : учебник для бакалавриата и магистратуры / под общ. ред. В. И. Сергеева. – Москва : Юрайт, 2014. – 479 с.
- 16 Боргардт, Е. А. Кросс-докинг как современная технология управления материальными потоками на складе : выпускная квалификационная работа. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2018. – URL: <https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/8866/1/%D0%91%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D1%80%D0%B4%D1%82%201-17-18-ei-Z.pdf> (дата обращения: 10.06.2025).
- 17 Why Does Walmart Use Cross-Docking? // My Mile High Delivery : [сайт]. URL: <https://mymilehighdelivery.com/why-does-walmart-use-cross-docking/> (дата обращения: 10.06.2025).
- 18 Amazon Robotics // RoboTrends.ru : [сайт]. – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/amazon> (дата обращения: 10.06.2025).
- 19 P&G transformed its supply chain from a linear chain to a responsive network through innovations like agent-based modeling... // SlideShare : [презентация]. – URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/procter-gamble-supply-chain-finance-case/141052626> (дата обращения: 10.06.2025).
- 20 Chopra S., Meindl P. Supply chain management: Strategy, planning, and operation. – Pearson, 2016. – 528 p.
- 21 Шумаев, В. А. Основы логистики : учебник / В. А. Шумаев, Е. В. Шумаев, Н. В. Афанасьева. – Москва : МИИТ, 2016. – 201 с.
- 22 Карнаухов, С. Б. Логистические системы в экономике России. – Москва : э ООО Фирма «Благовест-В», 2002. – 240 с.
- 23 Дыбская, В. В. Логистика : учебник для вузов / В. В. Дыбская, Е. И. Зайцев, В. И. Сергеев, А. Н. Стерлигова ; под ред. В. И. Сергеева. – Москва : Эксмо, 2008. – 944 с.
- 24 Николайчук, В. Е. Логистический менеджмент : учебник. – Москва : Дашков и К, 2009. – 980 с.

- 25 Стратегическое планирование в логистическом менеджменте // Cyberleninka : [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategicheskoe-planirovanie-v-logisticheskom-menedzhmente> (дата обращения: 10.06.2025).
- 26 Just in time ("точно вовремя") // Lms2.sseu.ru : [сайт]. – URL: <https://lms2.sseu.ru/mod/book/view.php?id=64950&chapterid=2399> (дата обращения: 10.06.2025).
- 27 Solvo.WMS – вторая самая популярная WMS-система в России по итогам 2019 // Solvo : [сайт]. – URL: <https://www.solvo.ru/about/press/solvo-wms-vtoraya-samaya-populyarnaya-wms-sistema-v-rossii-po-itogam-2019/> (дата обращения: 10.06.2025).
- 28 Концепции управления цепями поставок // 1economic.ru : [сайт]. – URL: <https://1economic.ru/lib/34666> (дата обращения: 10.06.2025).
- 29 Курбанов, А. А. Ответы российской логистической системы на вызовы западных санкций: обход или нивелирование? / А. А. Курбанов, В. А. Плотников // Управленческое консультирование. – 2022. – № 7. – С. 48-61.
- 30 X5 Group. Annual Report 2022. – 2023. – URL: <https://x5.praxisgroup.ru/> (дата обращения: 10.06.2025).
- 31 Магнит. Годовой отчет 2023. – 2024. – URL: <https://ar2023.magnit.com/> (дата обращения: 10.06.2025).
- 32 Рынок складской недвижимости. Москва. 2020 год // Knight Frank : [отчет]. – 2020. – URL: <https://content.knightfrank.com/research/596/documents/ru/rynok-skladskoy-nedvizhimosti-moskva-2020-7824.pdf> (дата обращения: 10.06.2025).
- 33 Дефицит логистических услуг в РК: помогут ли инвестиции в склады решить проблему // Forbes.kz : [сайт]. – 20.03.2024. – URL: https://forbes.kz/articles/defitsit_logisticheskikh_uslug_v_rk_pomogut_li_investitsii_v_skladyi_reshit_problemu (дата обращения: 10.06.2025).
- 34 Gattorna J. (Ed.). Gower handbook of supply chain management. – Gower Publishing, Ltd., 2003. – 766 p.
- 35 Langley C. J., Novack R. A., Gibson B., Coyle J. J. Supply chain management: A logistics perspective. – Cengage learning, 2020. – 672 p.
- 36 Farasyn I., Perkoz K., Van de Velde W. Spreadsheet Models for Inventory Target Setting at Procter & Gamble // Interfaces. – 2008. – Vol. 38, No. 4. – P. 241-250.
- 37 Kovbasiuk S., Zidek K., Balog M., Dobrovolska L. Comparative Analysis of Selected Discrete-Event Simulation Software Tools // Acta Technologia. – 2021. – Vol. IV, No. 2. – P. 12-26.
- 38 Сравнение программ для имитационного моделирования // AnyLogic : [сайт]. – URL: <https://www.anylogic.ru/blog/sravniyam-soft-dlya-imitatsionnogo-modelirovaniya/> (дата обращения: 10.06.2025).

39 Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение моделирование с AnyLogic 5. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Описание использованного кода на языке Java.

// Пример: код внутри агента Forklift или в блоке задания для транспортера (AnyLogic Material Handling Library)

// Предположим, есть объект Job, описывающий задание на перемещение паллета

Job nextJob = jobQueue.poll(); // Получаем следующую задачу из очереди заданий

if (nextJob != null) {

 // Получаем целевые точки для погрузки и выгрузки из задания

 Node pickupZone = nextJob.getPickupZone(); // например, зона разгрузки или хранения

 Node dropoffZone = nextJob.getDropoffZone(); // например, зона хранения или отгрузки

 // Переводим погрузчик в состояние "занят" и начинаем выполнение задачи
 this.busy = true;

 // Двигаемся вилочным погрузчиком к зоне погрузки (pickupZone)
 moveTo(pickupZone.getPosition()); // перемещение погрузчика к координатам точки погрузки

 // Имитация захвата паллета: "загружаем" товар на вилочный погрузчик

 MaterialItem item = pickupZone.pickItem(); // забираем единицу товара из зоны погрузки

 this.attach(item); // прикрепляем паллет (материал) к погрузчику, имитируя поднятие груза

 // После загрузки направляемся к зоне выгрузки (dropoffZone)

```

    moveTo(dropoffZone.getPosition()); // перемещение погрузчика к точке
выгрузки

    // Выгружаем товар в зоне назначения
    dropoffZone.placeItem(item); // размещаем товар (паллет) в зоне выгрузки
(например, на хранение или в зону отгрузки)

    this.detach(item); // открепляем паллет от погрузчика

    // Обновляем статус задачи и погрузчика
    nextJob.setCompleted(true); // помечаем задачу как выполненную
    this.busy = false; // погрузчик снова свободен и готов к следующему
заданию

    // Опционально: возвращаем погрузчик в зону ожидания или на базовую
позицию
    Node home = forkliftBase;
    moveTo(home.getPosition()); // возврат в исходное положение для ожидания
новых заданий
}

// Пример: код в обработчике нового заказа (например, в событии поступления
заказа или методе OrderManager)

// Новый заказ поступил (создан агент Order)
Order newOrder = incomingOrder; // incomingOrder – ссылка на поступивший
заказ (агент)

// 1. Назначение приоритета для заказа
if (newOrder.isUrgent()) {
    newOrder.setPriority(1); // 1 – высокий приоритет (например, экспресс-заказ)
}

```

```

} else {
    newOrder.setPriority(5); // 5 – стандартный приоритет
}

// 2. Выбор подходящего склада для выполнения заказа
Warehouse selectedWH = findWarehouseWithStock(newOrder);
// findWarehouseWithStock – условная функция, выбирающая склад, где есть
нужный товар и, например, минимальная загрузка
newOrder.setAssignedWarehouse(selectedWH);
if (selectedWH == null) {
    // Если ни на одном складе нет товара или склад не выбран – отмечаем заказ
    как проблемный
    newOrder.markAsBackorder();
    // (В реальной модели может быть логика ожидания поступления товара или
    переключения на другой центр)
}

// 3. Планирование работы комплектовщиков для сборки заказа
if (selectedWH != null) {
    // Предположим, у нас есть пул ресурсов "pickerPool" – комплектовщики на
    складе
    if (pickerPool.hasAvailableUnits()) {
        // Есть свободный комплектовщик – назначаем его на сборку данного
        заказа
        ResourceUnit picker = pickerPool.seize(); // захватываем один ресурс из
        пула
        picker.assignOrder(newOrder); // назначаем заказ конкретному
        комплектовщику
        newOrder.setPicker(picker); // сохраняем, кто выполняет заказ
    }
}

```

```

    } else {
        // Нет свободных комплектовщиков – ставим заказ в очередь ожидания
        сборки
        orderQueue.add(newOrder);
        newOrder.setStatus("WaitingForPicker");
    }
}

// Дополнительно: планирование по времени - например, если используются
смены
// Если комплектовщики работают по сменам, можно проверить текущее время
и запланировать начало сборки на рабочую смену.
// if (!isWorkingHours()) { scheduleOrderPicking(newOrder, nextShiftStartTime); }

// Пример: код в событии планирования отгрузки (например, таймер,
проверяющий каждые 30 минут)
// 1. Отбор заказов, готовых к отгрузке (уже собраны комплектовщиками и не
отправлены ранее)
List<Order> readyOrders = orders.stream()
    .filter(o -> o.isPicked() && !o.isShipped())
    .collect(Collectors.toList());

// Если есть готовые к отправке заказы
if (!readyOrders.isEmpty()) {
    // 2. Проверяем наличие свободного грузовика для отгрузки
    if (truckFleet.hasIdleTruck()) {
        DeliveryTruck truck = truckFleet.getIdleTruck(); // получаем свободный
        грузовой из парка
    }
}

```

```

// 3. Загрузка заказов в грузовик
while (!readyOrders.isEmpty() && truck.getLoadCount() <
truck.getCapacity()) {
    Order orderToLoad = readyOrders.remove(0);
    truck.loadOrder(orderToLoad); // помещаем заказ (например, паллету
или грузовые места) в грузовик
    orderToLoad.setShipped(true); // помечаем заказ как отправленный
(готов к отгрузке)
}

// 4. Проверяем заполненность грузовика для отправки
double fillRate = (double) truck.getLoadCount() / truck.getCapacity(); //
процент заполнения
if (fillRate >= 0.5) {
    // Если загружено >= 50% вместимости, сразу отправляем грузовик
    truck.depart(); // отправляем грузовик в путь (на магазин/клиентский
центр)
    truck.setStatus("Departed");
} else {
    // Если грузовик заполнен меньше, чем наполовину – планируем
отложенную отправку или ожидаем дозагрузки
    truck.setStatus("WaitingForMoreLoad");
    // Планируем отправку через определённое время, чтобы дожждаться
накопления заказов, например, через 1 час:
    scheduleTruckDeparture(truck, 1, HOUR);
}
} else {
    // Нет свободных грузовиков: например, создаём новый или ждем
освобождения

```

```
truckFleet.addNewTruck(); // Добавляем новый грузовик в флот, если это  
предусмотрено логикой  
    // Либо можно поставить готовые заказы в очередь ожидания отправки до  
    прибытия/освобождения машины  
    shippingQueue.addAll(readyOrders);  
    }  
}
```


ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчёт OTIF для базового сценария:

$$OTIF = 100\% * \frac{1004}{1080} = 92.96\% \approx 93\%$$

Расчёт OTIF для Сценария «А»:

$$OTIF = 100\% * \frac{907}{1080} = 83.98\% \approx 84\%$$

Расчёт OTIF для Сценария «Б»:

$$OTIF = 100\% * \frac{940}{1080} = 87.04\% \approx 87\%$$

Расчёт OTIF для Сценария «В» с 16 в. п.:

$$OTIF = 100\% * \frac{954}{1080} = 88.33\% \approx 88\%$$

Расчёт OTIF для Сценария «В» с 17 в. п.:

$$OTIF = 100\% * \frac{961}{1080} = 88.33\% \approx 88\%$$

Расчёт OTIF для Сценария «В» с 18 в. п.:

$$OTIF = 100\% * \frac{974}{1080} = 90.19\% \approx 90\%$$

Расчёт OTIF для Сценария «В» с 19 в. п.:

$$OTIF = 100\% * \frac{979}{1080} = 90.46\% \approx 90\%$$

Расчёт OTIF для Сценария «В» с 20 в. п.:

$$OTIF = 100\% * \frac{979}{1080} = 91.02\% \approx 91\%$$