

Глава 2.

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГРУЗОВЫХ
АВТОПЕРЕВОЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Панайотов Константин Константинович

к.т.н., доцент

Краснодонский факультет инженерии и менеджмента (филиал),

Луганский государственный университет

имени Владимира Даля

Панайотова Ангелина Николаевна

ст. преподаватель

Краснодонский факультет инженерии и менеджмента (филиал),

Луганский государственный университет

имени Владимира Даля

Аннотация: в статье рассматриваются актуальные проблемы оптимизации грузовых автоперевозок с использованием методов имитационного моделирования. Обоснована необходимость цифровизации логистических процессов в условиях усложнения транспортных потоков и роста требований к эффективности доставки. В качестве инструмента анализа и прогнозирования использована имитационная модель, построенная в среде AnyLogic, позволяющая моделировать реальные логистические процессы с учётом временных, ресурсных и организационных ограничений. В рамках исследования проведена оценка производительности логистической системы,

выявлены узкие места и предложены управленческие решения для повышения её устойчивости. Научная новизна заключается в разработке комплексного подхода к построению и применению симуляционных моделей грузовых автоперевозок с учётом неопределённости и адаптивного управления. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных результатов для цифровой трансформации логистических компаний, а также для принятия стратегических решений в сфере транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: имитационное моделирование, грузовые автоперевозки, логистические системы, оптимизация, цифровая логистика, AnyLogic, транспортные потоки, управление.

CURRENT ISSUES OF OPTIMIZATION OF FREIGHT TRANSPORTATION USING SIMULATION METHODS

Panayotov Konstantin Konstantinovich

Panayotova Angelina Nikolaevna

Abstract: the article addresses current challenges in optimizing freight road transportation through the use of simulation modeling methods. The necessity of digitalizing logistics processes is substantiated, particularly in the context of increasing complexity in transport flows and growing demands for delivery efficiency. A simulation model developed in the AnyLogic environment is employed as an analytical and forecasting tool, enabling the replication of real logistics operations under temporal, resource, and organizational constraints. The study evaluates system performance, identifies bottlenecks, and proposes management solutions to enhance resilience.

The scientific novelty of the research lies in the development of an integrated approach to simulation modeling of freight transportation, incorporating uncertainty and adaptive control. The practical significance is reflected in the applicability of the findings for the digital transformation of logistics enterprises and for strategic decision-making in the field of transport infrastructure.

Key words: simulation modeling, freight road transportation, logistics systems, optimization, digital logistics, AnyLogic, transport flows, management.

Современные логистические системы в условиях глобализации и цифровизации сталкиваются с необходимостью постоянной адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. Одним из ключевых направлений развития логистики является оптимизация грузовых автоперевозок, играющих критическую роль в функционировании цепей поставок и обеспечении бесперебойного движения товаропотоков. Проблема повышения эффективности перевозок требует не только улучшения технической базы, но и внедрения интеллектуальных инструментов анализа, прогноза и планирования логистических процессов.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной проблемы является *имитационное моделирование*, позволяющее воспроизводить поведение транспортно-логистических систем в условиях неопределённости, изменчивого спроса и ограниченных ресурсов. Применение имитационных моделей в управлении логистикой позволяет находить «узкие места» в транспортной инфраструктуре,

тестировать различные стратегии распределения потоков, прогнозировать поведение системы в критических ситуациях [2; 3; 6].

Актуальность исследования обусловлена ростом транспортной нагрузки на дорожную сеть, необходимостью сокращения издержек на перевозки и стремлением компаний к повышению конкурентоспособности за счёт оптимизации логистических цепей. Использование имитационного моделирования в данном контексте позволяет не только повысить обоснованность принимаемых управленческих решений, но и адаптировать логистические схемы под изменяющиеся условия внешней среды [7; 11].

Цель данной статьи — оценить возможности имитационного моделирования в качестве средства для оптимизации логистических процессов в сфере грузовых автоперевозок. Также в статье будут рассмотрены основные области его практического использования.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие *задачи*: исследовать теоретические основы имитационного моделирования в транспортной логистике; оценить преимущества и ограничения применения данного метода к грузовым автоперевозкам; проанализировать существующие примеры имитационных моделей в сфере логистики; определить направления оптимизации логистических процессов с использованием имитационного моделирования.

В ходе исследования для верификации модели были использованы следующие *методы*: сравнение с эмпирическими данными; анализ устойчивости модели при изменении входных параметров; визуальное наблюдение за работой агентов в среде моделирования.

Новизна настоящего исследования заключается в комплексном подходе к моделированию автотранспортных логистических систем с

учётом факторов неопределённости, цифровой трансформации и адаптивного управления. Предложенные решения могут быть применены как на уровне отдельных логистических компаний, так и в контексте государственного и регионального планирования транспортной инфраструктуры.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов при проектировании и совершенствовании логистических схем автоперевозок, моделировании ситуаций перегрузки и сбоев, оценке эффективности маршрутов и управлении ресурсами.

В настоящее время имитационные модели, основанные на принципах математического моделирования и теории систем, предоставляют возможность детального анализа динамических процессов, происходящих в логистических сетях, позволяя снизить затраты, улучшить клиентский сервис и минимизировать риски. Так, в условиях стремительного роста объёмов грузовых перевозок и усложнения логистических цепей, использование имитационного моделирования становится неотъемлемым элементом анализа и оптимизации логистических систем. Представленная в работе модель, построенная с применением современных симуляционных платформ, позволила детально проанализировать влияние ключевых параметров (объёмов заказов, времени обработки, доступности транспорта) на эффективность работы логистической сети.

Анализ литературных источников по теме исследования показал, что первостепенное значение для решения поставленных задач имеют исследования, направленные на разработку, адаптацию и внедрение

современных методов имитационного моделирования, применяемых в организации и управлении процессами грузовых автоперевозок.

Особую роль играют работы, в которых имитационное моделирование приобретает статус основополагающего инструмента в условиях динамичной рыночной конъюнктуры и ограниченности доступных ресурсов, где данный метод позволяет с высокой точностью прогнозировать и корректировать логистические операции, обеспечивая тем самым более эффективное использование материальных и человеческих ресурсов (А.С. Акопов, Л.А. Бекларян [1], С.А. Андронов, О.В. Ульвачева [2], А.В. Борщёв [3], Е.В. Буенок [4], Р.С. Картабаев, В. А. Еремин [9], Д. Ю. Каталевский, Т. Р. Гареев [10], Е. С. Карнаух, Ю.И. Захаров [8], Т.Ю. Масликова, С.Г. Редько [11], А.И. Мамаев, А.Н. Гуда, А.И. Хашев [17], Я.С. Панасюк [12], М.И. Рожков [13], К.Ф. Сергеева [14], А.В. Силантьев, С.Г. Холмовский, М.Б. Малецкая [18], В.В. Сильянов [15], С.А. Соболев [16], А.С. Дегтярёв, Г.В. Заходякин [7], Н.В. Власова, Л.Д. Богданова, А.А. Сулопаров [5], А.Н. Воронцов [6], В.Е. Черненко [19] и др.) При этом следует отметить, что исследования в этой области позволяют не только описывать текущие транспортные потоки, но и формировать сценарные прогнозы, оценивать эффективность различных стратегий управления, включая маршрутизацию, планирование загрузки, интеграцию с цифровыми платформами и использование альтернативных видов транспорта. Вышеуказанные авторы в своих работах освещают широкий спектр подходов и методологий в управлении транспортными системами. Данные исследования охватывают инновационные методы, включая гибридное моделирование, агентно-ориентированные системы, технологии обработки больших данных и цифровые двойники для

оптимизации логистики. Эти методы демонстрируют высокую эффективность и позволяют достигать значительных улучшений в производительности и качестве логистических операций.

Практическая значимость данных подходов определяется их способностью адекватно отражать динамику логистической среды, включая задержки, перебои в поставках, сезонные колебания и инфраструктурные особенности. Эти исследования формируют научную и методологическую основу для разработки эффективных, адаптивных и устойчивых моделей управления грузовыми автоперевозками, способных адекватно реагировать на вызовы современной логистики. В частности, интеграция этих методов в управленческие процессы способствует повышению уровня оптимизации транспортных потоков, минимизации издержек и обеспечению бесперебойности логистики в условиях высокой неопределенности и динамичности рынка.

Имитационное моделирование представляет собой метод исследования сложных систем путём построения их математических или программных моделей, отражающих логику функционирования объекта и его взаимодействие с внешней средой. В логистике этот метод используется для анализа и прогнозирования поведения логистических цепей, транспортных потоков, складских процессов и других составляющих системы поставок [3; 6].

Ключевым достоинством имитационного моделирования является возможность отображения динамики системы в условиях неопределённости и многовариантности развития событий. В отличие от аналитических моделей, которые предполагают строгую формализацию, имитационные позволяют учитывать случайные события, временные

задержки, колебания спроса и другие реальные факторы, оказывающие влияние на логистику [4; 10].

В транспортной логистике имитационное моделирование применяется для решения следующих задач: оценка пропускной способности транспортных узлов; выбор оптимальных маршрутов доставки; моделирование заторов и аварийных ситуаций; прогнозирование транспортных потоков; планирование загрузки и распределения ресурсов [2; 5; 12].

Наиболее распространёнными подходами к имитационному моделированию являются: *дискретно-событийное моделирование (DES)*, которое позволяет отслеживать состояние системы в дискретные моменты времени, а также широко применяется для анализа последовательности логистических операций; *агентное моделирование (ABM)* — моделирует поведение отдельных участников логистической системы (транспортные средства, диспетчеры, клиенты) и позволяет учитывать индивидуальные стратегии и адаптивность агентов [6; 13]; *системная динамика* — применяется для анализа потоков ресурсов и информации и широко используется при стратегическом планировании [17].

В качестве программных инструментов наиболее популярными являются AnyLogic, PTV Vissim, Arena, FlexSim, Simul8, каждый из которых имеет свои особенности и применяется в зависимости от задач исследования. Например, AnyLogic позволяет использовать гибридные модели, объединяя элементы дискретно-событийного, системно-динамического и агентного подходов [7; 10].

Значительный вклад в развитие методологии имитационного моделирования внесли такие исследователи, как А.В. Борщёв,

С.А. Андронов, Ю.И. Захаров, А.Н. Воронцов и др., рассматривающие как прикладные, так и теоретические аспекты построения моделей для транспортной инфраструктуры [2; 3; 6; 8].

В условиях современной глобализированной экономики имитационное моделирование, основанное на создании компьютерных моделей реальных систем, предоставляет специалистам возможность проведения комплексного анализа, позволяющего принимать стратегически обоснованные решения, минимизировать операционные издержки и значительно повышать эффективность процессов грузоперевозок, а также проводить детальный анализ сценариев, выявлять потенциальные узкие места и оптимизировать логистические цепи.

По мнению современных исследователей, сфера грузовых автоперевозок представляет собой одну из ключевых составляющих логистических систем, но в то же время эта система наиболее подвержена внешним и внутренним колебаниям. Учитывая сложность маршрутов, переменные объемы груза, пробки, погодные-климатические факторы и влияние человеческого фактора, традиционные методы логистического планирования оказываются недостаточно гибкими и точными. В этом контексте имитационное моделирование представляет собой высокоэффективный метод для анализа, оптимизации и прогнозирования процессов в системе грузоперевозок [5; 11; 13].

Следует отметить, что одной из главных задач, решаемых с помощью моделирования, является оптимизация логистических маршрутов. Так, имитационные модели позволяют учитывать не только расстояние между пунктами, но и динамическое изменение дорожной

ситуации, режимы работы инфраструктуры, графики доставки и ограничения по массе и объёму груза и т.п. [8; 9].

Примером эффективного применения является *агентное моделирование* транспортных потоков, при котором каждый грузовик рассматривается как независимый агент с заданным поведением и индивидуальными параметрами, что позволяет более реалистично симулировать поведение системы при нестандартных ситуациях, например, в условиях аварий или перераспределения трафика [6; 12].

Другим значимым направлением является *оценка эффективности функционирования транспортных узлов*. Посредством моделирования можно прогнозировать очереди, тестировать сценарии по изменению схем движения или организационных решений (например, изменение режима погрузки-разгрузки, расширение парковочных зон и т.п.) [2; 14].

В современных условиях особую актуальность приобретают вопросы цифровой логистики, в частности, связанные с *уберизацией* перевозок и платформенными решениями (*уберизация* — процесс замены традиционных посредников (людей или организаций) цифровыми платформами, позволяющими напрямую связывать поставщиков услуг с потребителями). Имитационные модели позволяют анализировать, как распределение заказов между независимыми перевозчиками влияет на загрузку дорог, уровень сервиса и временные издержки. При этом позволяют учитывать взаимодействие между различными видами транспорта, оценивать экологические последствия и тестировать внедрение экологически чистого автотранспорта (например, электрофургонов) [10; 16; 18].

Также важной областью применения выступает проектирование логистических сетей, в частности в автомобильной промышленности, где

моделирование позволяет просчитывать производственные и логистические цепочки, минимизировать время простоя и улучшить координацию между поставщиками и производственными площадками [13].

Таким образом, применение имитационного моделирования в грузовых автоперевозках охватывает широкий спектр задач — от маршрутного планирования до стратегического управления логистикой на уровне регионов и отраслей. Такой подход не только повышает эффективность транспортных операций, но и обеспечивает более высокую устойчивость и адаптивность логистических систем к внешним изменениям.

Для построения адекватной и практически значимой имитационной модели грузовых автоперевозок необходимо четко определить методологические основы, включая постановку исследовательской задачи, выбор подходящего типа моделирования и инструментальных средств.

Имитационное моделирование применяется для анализа сложных систем, поведение которых невозможно точно предсказать аналитическими методами [3; 7]. В сфере логистики и грузоперевозок наблюдается непрерывное возникновение задач, характеризующихся высокой степенью сложности и комплексности. Данные задачи требуют детального анализа и учета множества переменных факторов, среди которых следует выделить временные задержки, транспортные заторы, человеческий фактор, сезонные колебания спроса и различные случайные события. Эти факторы оказывают значительное влияние на эффективность логистических операций и могут существенно затруднить достижение оптимальных результатов. Так, временные задержки могут

быть вызваны различными причинами, включая погодные условия, технические неисправности транспортных средств и организационные проблемы. Транспортные заторы, в свою очередь, могут быть обусловлены как внешними факторами, так и внутренними процессами в транспортной системе. Особую значимость в логистических процессах имеет человеческий фактор: ошибки и недочеты, допущенные персоналом, могут привести к значительным потерям времени и ресурсов, а сезонные колебания спроса, обусловленные изменением потребностей рынка в зависимости от времени года, требуют гибкого подхода к планированию и управлению логистическими цепями.

Таким образом, эффективное управление логистическими процессами требует комплексного подхода, учитывающего все вышеперечисленные факторы, поскольку только при условии детального анализа и учета всех переменных можно обеспечить высокую степень надежности и эффективности логистических операций.

Следует сказать, что имитационное моделирование, представленное на рисунке 1, обладает рядом ключевых преимуществ, которые делают его незаменимым в контексте научных исследований и инженерных разработок по следующим параметрам.

Во-первых, имитационное моделирование позволяет систематически варьировать параметры модели с целью выявления их влияния на поведение исследуемой системы, что способствует идентификации оптимальных конфигураций системы и является критически важным для достижения максимальной эффективности и надежности.

Во-вторых, данный метод предоставляет возможность моделирования различных сценариев развития событий, что, в свою очередь, позволяет осуществлять прогнозирование и оценку

устойчивости системы к внутренним и внешним воздействиям, а также к изменениям условий эксплуатации. Это особенно актуально в условиях высокой степени неопределенности и динамичности современных систем.

В-третьих, имитационное моделирование способствует идентификации критических узловых точек и потенциальных областей для оптимизации, что позволяет минимизировать финансовые и временные затраты, связанные с проведением реальных экспериментов. Это особенно важно в условиях ограниченных ресурсов и необходимости быстрого принятия решений.



Рис. 1. Этапы имитационного моделирования

Таким образом, имитационное моделирование представляет собой высокоэффективный методологический инструмент, который значительно повышает качество и надежность сложных проектируемых систем. Этот подход позволяет не только проводить тщательный анализ и экспериментальное исследование данных систем, но и оптимизировать их параметры в условиях научно-технической среды. Применение имитационного моделирования способствует более глубокому пониманию функциональных характеристик и поведения сложных систем, а также выявлению потенциальных уязвимостей и возможностей для их улучшения. В результате, данный метод становится неотъемлемым компонентом современных научных исследований и инженерных разработок, обеспечивая высокий уровень достоверности и надежности получаемых результатов. Данный метод является неотъемлемой частью инжиниринговых и исследовательских процессов, способствуя достижению максимальной производительности и устойчивости систем при различных сценариях эксплуатации.

В рамках данного исследования для разработки и реализации модели была выбрана ранее упомянутая программная среда AnyLogic, которая интегрирует три мощных парадигмы моделирования: *дискретно-событийное, агентное и системную динамику*, что обеспечивает широкий спектр возможностей для анализа и визуализации сложных систем. Данный выбор обусловлен необходимостью комплексного подхода к исследованию, который позволяет учитывать как динамические, так и стохастические аспекты поведения системы [7].

Предлагаемая платформа представляет собой интегрированную систему для моделирования логистических сетей, охватывающую как макроскопический, так и микроскопический уровни анализа. Так,

на макроскопическом уровне осуществляется моделирование всей логистической системы, включая взаимодействие между различными узлами и потоками, в то время как на микроскопическом уровне детально исследуется поведение индивидуальных транспортных средств и их динамика. Выбор данной платформы обусловлен рядом значимых преимуществ, которые позволяют ей занимать лидирующие позиции в области анализа и визуализации транспортных потоков:

1. Комплексный анализ и визуализация транспортных систем: платформа предоставляет расширенные возможности для детального анализа и визуализации транспортных узлов и маршрутов. Это позволяет проводить всестороннее исследование динамики движения, выявлять узкие места и оптимизировать логистические процессы, что в конечном итоге способствует повышению эффективности транспортных систем.
2. Импортирование географических данных и картографических материалов: система поддерживает интеграцию с географическими информационными системами (ГИС), что обеспечивает использование актуальных картографических данных и пространственной информации для повышения точности моделирования.
3. Гибкость настройки логики поведения агентов: платформа предоставляет широкие возможности для модификации логики поведения агентов, включая транспортные средства и логистические узлы, что позволяет адаптировать модели к специфическим условиям и задачам.
4. Интеграция с внешними базами данных и управленческими системами: система обеспечивает интеграцию с внешними базами данных и корпоративными информационными системами, что позволяет эффективно использовать существующие данные и оптимизировать процессы принятия решений.

В процессе нашего исследования на предварительном этапе моделирования была построена *концептуальная модель логистической системы*, включающая: транспортные узлы (склады, распределительные центры, загрузочные площадки); подвижной состав с параметрами грузоподъемности, затрат, скорости и надежности; маршруты с атрибутивными характеристиками (длина, качество покрытия, уровень загруженности, наличие ограничений); типологию грузов и особенности обработки; временные окна доставки и задержки. При этом следует особо отметить тот факт, что для повышения реалистичности модель учитывает вероятностный характер событий: изменение погодных условий, случайные поломки техники, задержки на границах регионов, изменение трафика [6; 17].

В качестве ключевых индикаторов, призванных отразить эффективность функционирования логистической системы, были выбраны следующие метрические параметры: среднее время доставки, которое выступает в роли объективного показателя оперативности и надежности логистических процессов; расход топлива и логистические издержки, которые позволяют провести комплексную оценку экономической эффективности системы; уровень загрузки транспортных средств, характеризующий эксплуатационную эффективность и степень рациональности использования транспортных ресурсов; количество просроченных заказов, выступающий важным индикатором качества обслуживания клиентов и эффективности управления цепочками поставок; индекс удовлетворенности клиентов, моделируемый как функция отклонения от установленных временных параметров доставки.

Выше приведенные критерии формируют комплексную систему показателей, обеспечивающую всесторонний анализ технической,

экономической и потребительской эффективности логистической системы. Такой подход, основанный на интеграции различных метрик, критически важен для оценки устойчивости и адаптивности системы в условиях конкурентного рыночного окружения и динамичной внешней среды, что позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные риски и проблемы.

На уровне дискретных событий были реализованы логистические процессы (погрузка, выгрузка, транспортировка), в то время как агентный подход обеспечил моделирование поведения участников системы (водителей, диспетчеров, клиентов) [7]. В этом процессе каждая единица подвижного состава (грузовик) выступала как агент, обладающий параметрами (скорость, надежность, объем груза), а также правилами поведения: выбор маршрута, ожидание на складе, отклонение от графика. Склады и распределительные центры моделировались как узлы логистической сети, со своими ограничениями по пропускной способности и режимами работы. В модели также использовались условно-реальные данные, отражающие средние показатели региональной транспортной сети и логистических операций в средней по плотности инфраструктуре, а именно: количество транспортных единиц – 100; среднее расстояние маршрута – 250 км; пропускная способность – от 15 до 30 операций в день; доля срочных заказов – 25%; частота отказов транспорта – 0,5% на 100 км. Данные были структурированы и импортированы из CSV-файлов, что обеспечило гибкость в адаптации модели под различные сценарии и регионы [4; 13].

Для анализа устойчивости логистической системы были сформулированы и реализованы следующие варианты сценариев:

- *базовый сценарий* – текущая модель функционирования без изменений;
- *сценарий 1*: увеличение доли срочных заказов до 50%;
- *сценарий 2*: сокращение парка грузовиков на 20% (дефицит транспорта);
- *сценарий 3*: внедрение цифровой платформы планирования маршрутов (уменьшение холостых пробегов на 15%);
- *сценарий 4*: увеличение плотности трафика на основных маршрутах (имитация дорожного ремонта и заторов) [5; 18].

Результаты моделирования представлены в виде сравнительной таблицы (табл. 1) по основным критериям эффективности логистической системы.

Таблица 1

Основные критерии эффективности логистической системы

Сценарий	Среднее время доставки (ч)	Уровень загрузки ТС (%)	Просроченные заказы (%)	Общие затраты (ед.)
Базовый	5,3	71	3,2	100
Сценарий 1	6,1	83	8,7	112
Сценарий 2	6,9	95	11,3	118
Сценарий 3	4,7	78	2,5	91
Сценарий 4	6,8	74	6,9	109

Таблица 1 показывает, что в рамках исследования проведено комплексное сопоставление базовых показателей эффективности логистической системы в различных сценариях её функционирования, а предметом анализа выступили следующие ключевые параметры: среднее

время доставки, уровень загрузки транспортных средств, процент просроченных заказов и общие затраты. Так, *базовый сценарий* представлен в качестве отправной точки для сравнительного анализа. Его показатели (среднее время доставки — 5,3 часа, уровень загрузки ТС — 71%, просроченные заказы — 3,2%, общие затраты — 100 единиц) отражают текущее состояние логистической системы и служат эталоном для оценки эффективности альтернативных вариантов.

Первый сценарий демонстрирует существенное ухудшение всех анализируемых показателей относительно базового варианта. Наблюдается увеличение среднего времени доставки на 15%, что свидетельствует о снижении оперативности логистических операций. Уровень загрузки транспортных средств достигает 83%, однако это не компенсирует рост просроченных заказов, количество которых возрастает более чем в 2,7 раза. Существенное увеличение общих затрат на 12% указывает на снижение экономической эффективности системы.

Второй сценарий характеризуется максимальной загрузкой транспортных средств (95%), однако данная интенсификация сопровождается существенным ухудшением остальных показателей эффективности. Время доставки увеличивается до 6,9 часов, что является наихудшим результатом среди всех сценариев. Критическое значение достигает показатель просроченных заказов (11,3%), превышая базовый уровень более чем в 3,5 раза. Значительное увеличение общих затрат до 118 единиц подтверждает неэффективность данного сценария.

Третий сценарий демонстрирует наиболее благоприятные результаты по всем анализируемым показателям: сокращение среднего времени доставки на 11% до 4,7 часов свидетельствует о существенном повышении оперативности логистических операций; при умеренном

уровне загрузки транспортных средств (78%) достигается минимальный среди всех сценариев процент просроченных заказов (2,5%); существенное снижение общих затрат на 9% до 91 единицы подтверждает высокую экономическую эффективность данного варианта.

Четвертый сценарий представляет собой промежуточный вариант развития логистической системы. Несмотря на увеличение времени доставки, он характеризуется относительно низким уровнем загрузки транспортных средств (74%) и умеренным ростом затрат (9%); процент просроченных заказов (6,9%) находится на приемлемом уровне, что свидетельствует о сохранении приемлемого качества логистического сервиса.

В результате проведенного исследования мы пришли к выводу, что среди рассмотренных сценариев наиболее эффективным является третий вариант развития логистической системы, где внедрение цифровой платформы позволило снизить логистические затраты на 9% и сократить время доставки. Его преимущества заключаются в оптимальном сочетании всех анализируемых показателей: минимальное время доставки, низкий процент просроченных заказов при умеренной загрузке транспортных средств и минимальных общих затратах.

Следует отметить, что полученные результаты позволяют рекомендовать к практической реализации третий сценарий как наиболее сбалансированный и эффективный вариант развития логистической системы. В частности, результаты сценарного анализа показали: высокая доля срочных заказов увеличивает нагрузку на транспорт и способствует росту просрочек доставки, что может привести к ухудшению клиентского сервиса и увеличению затрат; сокращение

транспортного парка критически снижает гибкость системы, вызывая непропорциональное увеличение времени доставки и отказов по заказам; внедрение цифровой платформы маршрутизации позволило оптимизировать загрузку транспорта и снизить долю холостого пробега, что подтверждает важность цифровой трансформации логистики [11; 16; 18].

Эти выводы полностью согласуются с современными исследованиями, ранее проведёнными в данной области. Так, Т.Е. Масликова и С.Г. Редько подчёркивают, что имитационное моделирование обеспечивает более точную оценку эффективности логистических процессов за счёт учета динамики системы и поведенческих факторов участников [11]. Аналогично, Н.В. Власова, Л.Д. Богданова, А.А. Суслопаров отмечают, что контейнерные и автомобильные перевозки требуют адаптивных моделей, учитывающих специфику региона и сезонные изменения спроса [5; 7].

Исследование показало, что имитационное моделирование — это эффективный метод, который позволяет быстро обнаруживать проблемные зоны, предсказывать результаты управленческих решений и разрабатывать оптимальные стратегии развития системы. Это особенно важно для транспортных компаний, работающих в условиях острой конкуренции, нестабильного спроса и постоянно меняющихся требований клиентов [2; 3; 4; 6; 11; 16].

Полученные данные эксперимента могут быть полезны: менеджерам по логистике — для оценки рисков и планирования маршрутов; стратегическим аналитикам — для формирования долгосрочных решений в условиях нестабильности поставок; разработчикам цифровых платформ — при проектировании сервисов

автоматизированного управления перевозками; органам регионального управления — при планировании транспортной инфраструктуры и регулировании грузопотоков [3; 6; 16].

Таким образом, имитационное моделирование выступает не просто как вспомогательный метод, а как ключевая технология принятия решений, обеспечивающая гибкость, устойчивость и адаптивность логистических систем в быстро меняющемся мире. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением функциональности моделей, интеграцией искусственного интеллекта, а также разработкой цифровых двойников логистических цепочек.

Список литературы

1. Акопов А. С., Бекларян Л. А. Мультисекторная модель ограниченного соседства: сегрегация агентов и оптимизация характеристик среды // Математическое моделирование. — 2021. — Т. 33. — № 11. — С. 95–114.

2. Андронов С. А., Ульвачева О. В. Оценка и повышение пропускной способности транспортного узла посредством имитационного моделирования в среде PTV VISSIM // Системный анализ и логистика. — 2022. — № 2 (32). — С. 113–129.

3. Борщёв А. В. Применение имитационного моделирования в России – состояние на 2007 г. // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сб. Третьей всероссийской научно-практической конференции – СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС, 2007. – С. 11 – 13.

4. Буенок Е. В. Имитационное моделирование движения высокоскоростного транспорта // Материалы XX междунар. науч.-техн.

конф. ... Гомель, 23–24 апр. 2020. — Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. — С. 469–472.

5. Власова Н. В., Богданова Л. Д., Суслопаров А. А. Развитие контейнерных перевозок в Европе и России. Имитационное моделирование // Молодая наука Сибири. — 2024. — № 3 (25). — (электронный ресурс, страницы не указаны).

6. Воронцов А. Н. Имитационное агентное моделирование транспортных систем : автореф. дисс. ... магистра техники и технологии. — Минск : БГУИР, 2020. — 7 с.

7. Дегтярёв А. С., Заходякин Г. В. Использование методов имитационного проектирования в программной среде AnyLogic для решения логистических задач в фармацевтической промышленности // Успехи в химии и химической технологии. 2011. №13 (129). URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-imitatsionnogo-proektirovaniya-v-programmnoy-srede-anylogic-dlya-resheniya-logisticheskikh-zadach-v](https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-imitatsionnogo-proektirovaniya-v-programmnoy-srede-anylogic-dlya-resheniya-logisticheskikh-zadach-v-farmaceuticheskoy-promyshlennosti) (дата обращения: 30. 08. 2025).

8. Захаров Ю. И., Карнаух Е. С. Основные современные инструменты имитационного моделирования транспортных потоков // Вісник ПДАБА. 2014. №1 (190). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-sovremennye-instrumenty-imitatsionnogo-modelirovaniya-transportnyh-potokov> (дата обращения: 30. 08. 2025).

9. Картабаев Р. С. Машинная имитация движения транспортных потоков для проектирования автомобильных дорог в горной местности/ Р. С. Картабаев, В. А. Еремин. – Фрунзе: Илим, 1982. – 330 с.

10. Каталевский Дмитрий Юрьевич, Гареев Тимур Рустамович Имитационное моделирование для прогнозирования развития автомобильного электротранспорта на уровне региона // Балт. рег.. 2020.

№2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-dlya-prognozirovaniya-razvitiya-avtomobilnogo-elektrotransporta-na-urovne-regiona> (дата обращения: 30. 08. 2025).

11. Масликова Татьяна Евгеньевна, Редько Сергей Георгиевич Применение подходов имитационного моделирования для оценки эффективности логистических процессов // Глобальная энергия. 2013. №4-2 (183). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-podhodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-otsenki-effektivnosti-logisticheskikh-protssesov> (дата обращения: 30. 08. 2025).

12. Панасюк Я. С. Агентное микроскопическое моделирование транспортных потоков в COS. SIM // Матер. конф. «Математическое моделирование транспортных потоков». – МФТИ, Долгопрудный. –2011.

13. Рожков М. И. Имитационное моделирование логистических сетей поставщиков в автомобильной промышленности // Логистика и управление цепями поставок. – 2012. – № 2. – С. 40 – 49.

14. Сергеева К. Ф. Анализ и оптимизация транспортных потоков с помощью моделирования /Сайт Междунар. молод. школы-семинара «БИКАМП: Будущее Информатики, Космического, Авиационного и Медицинского Приборостроения». – 2013.

15. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации дорожного движения /В. В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1983. – 424 с.

16. Соболев Сергей Андреевич Формирование инструментария стратегического планирования для управления развитием российских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-instrumentariya->

strategicheskogo-planirovaniya-dlya-upravleniya-razvitiem-rossiyskih-aglomeratsiy (дата обращения: 30. 08. 2025).

17. Хашев А. И., Мамаев Э. А., Гуда А. Н. Комбинированное имитационно-аналитическое моделирование в транспортно-логистических системах // Вестник Ростовского гос. университета путей сообщения. — 2022. — № 1 (85). — С. 117–125.

18. Холмовский Станислав Геннадьевич, Силантьев Александр Валерьевич, Малецкая Марина Борисовна Цифровая логистика и ограничения процесса уберизации грузовых автомобильных перевозок // Baikal Research Journal. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-logistika-i-ogranicheniya-protssessa-uberizatsii-gruzovyh-avtomobilnyh-perevozk> (дата обращения: 30. 08. 2025).

19. Черненко В. Е. Графический конструктор моделей транспортных систем // Труды всероссийской конференции «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации» (ОИ-2009) Ульяновск: УлГТУ - 2009 - т. 1. - С. 180-185.

© Панайотов К.К., Панайотова А.Н., 2025