

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ

## Арифджанова Н.З.

*Арифджанова Нафиса Захидовна – старший преподаватель,  
кафедра транспортной логистики,  
Ташкентский государственный транспортный университет,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан*

**Аннотация:** в статье рассматриваются современные методы моделирования и оптимизации транспортных процессов, направленные на повышение эффективности, безопасности и экологичности транспортных систем. Проанализированы ключевые подходы: имитационное, математическое и статистическое моделирование, а также интеллектуальные транспортные системы (ИТС). Описаны преимущества и недостатки каждого метода, области их применения и достигаемые результаты, такие как снижение заторов, повышение пропускной способности, сокращение транспортных затрат и уменьшение вредных выбросов. Проведён сравнительный анализ методов. Выявлены основные вызовы, связанные с моделированием сложных, динамичных и многофакторных транспортных систем, включая необходимость обработки больших данных, учета неопределённости и человеческого фактора. Сделан вывод о необходимости комплексного применения различных методов и постоянного совершенствования моделей для создания интеллектуальных и устойчивых транспортных систем будущего. Обозначены перспективы дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** транспортные системы, моделирование, оптимизация, имитационное моделирование, математическое моделирование, статистическое моделирование, интеллектуальные транспортные системы.

## MODERN METHODS OF MODELING AND OPTIMIZATION OF TRANSPORT PROCESSES

### Arifjanova N.Z.

*Arifdzhanova Nafisa Zakhidovna – Senior Lecturer,  
DEPARTMENT OF TRANSPORT LOGISTICS,  
TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY,  
TASHKENT, REPUBLIC OF UZBEKISTAN*

**Abstract:** this paper examines modern methods for modeling and optimizing transportation processes, aimed at enhancing the efficiency, safety, and environmental sustainability of transportation systems. Key approaches are analyzed, including simulation modeling, mathematical modeling, statistical modeling, and intelligent transportation systems (ITS). The advantages and disadvantages of each method are described, along with their respective application areas and achievable results, such as reduced congestion, increased throughput capacity, lower transportation costs, and reduced harmful emissions. A comparative analysis of the methods is presented. The main challenges associated with modeling complex, dynamic, and multi-factorial transportation systems are identified, including the need for big data processing, accounting for uncertainty, and incorporating the human factor. It is concluded that a comprehensive application of various methods and continuous model improvement are necessary to create intelligent and sustainable transportation systems of the future. Prospects for further research are outlined.

**Keywords:** transportation systems, modeling, optimization, simulation modeling, mathematical modeling, statistical modeling, intelligent transportation systems.

УДК: 656.1/.5: 004.94 : 519.8

### Введение

Современные транспортные системы (ТС) представляют собой сложные, динамичные и многокомпонентные структуры, требующие эффективных методов управления для обеспечения безопасности, экономичности, экологичности и устойчивости перевозок. Растущий уровень автомобилизации и урбанизации приводит к экспоненциальному увеличению нагрузки на транспортные сети, особенно в крупных мегаполисах. Это, в свою очередь, обуславливает острую необходимость применения передовых методов моделирования и оптимизации для повышения эффективности функционирования ТС и снижения негативных последствий, таких как заторы, аварийность и загрязнение окружающей среды [1].

Моделирование транспортных процессов предоставляет инструментарий для анализа и прогнозирования поведения ТС в различных условиях, включая экстремальные нагрузки и сбои. Это

позволяет принимать обоснованные решения при планировании, развитии и управлении транспортной инфраструктурой. Ключевыми задачами моделирования являются: оптимизация дорожного движения (включая управление светофорными объектами и маршрутизацией), повышение безопасности на дорогах, снижение транспортных издержек и улучшение экологической обстановки [2].

Оптимизация транспортных процессов, в свою очередь, направлена на минимизацию транспортных затрат (как временных, так и финансовых), повышение эффективности использования транспортных средств и разработку оптимальных маршрутов с учетом множества факторов и ограничений (пропускная способность, спрос на перевозки, техническое состояние инфраструктуры, экологические нормы и т.д.) [3]. Достижение этих целей осуществляется с помощью математических моделей, алгоритмов оптимизации и специализированного программного обеспечения, способного обрабатывать большие объемы данных и учитывать различные сценарии развития событий.

Цель статьи — обзор и анализ современных методов моделирования и оптимизации транспортных процессов для повышения их эффективности, безопасности и экологичности. Задачи включают рассмотрение имитационного, математического и статистического моделирования, а также интеллектуальных транспортных систем, выявление их преимуществ и недостатков, областей применения, достижимых результатов, и основных проблем, связанных с их использованием.

### **Методы**

Работа выполнена на основе междисциплинарного анализа: изучены нормативные акты, статистические отчеты и научные исследования, касающиеся моделирования и оптимизации транспортных процессов. Проведен сравнительный анализ современных методов для определения оптимальных подходов к решению различных транспортных задач.

### **Результаты**

Анализ исследований позволяет разделить современные подходы к моделированию и оптимизации транспортных процессов на следующие основные категории:

1. Имитационное моделирование – позволяет воссоздать поведение транспортной системы в виртуальной среде, имитируя движение транспортных средств, работу светофоров, поведение водителей и другие аспекты. Он незаменим для анализа "узких мест" в ТС, оценки эффективности различных управляющих воздействий и тестирования новых технологий (например, адаптивных систем управления дорожным движением) без риска для реальной системы. Современные имитационные модели подразделяются на микроскопические (моделируют каждое транспортное средство), мезоскопические (моделируют группы транспортных средств) и макроскопические (моделируют транспортные потоки в целом) [4].

2. Математическое моделирование – использует математические уравнения и алгоритмы для описания транспортных процессов и нахождения оптимальных решений. Сюда входят, например, модели теории потоков, модели оптимизации маршрутов (при доставке товаров, организации работы курьеров и т.п.), модели управления светофорным регулированием (задачи синхронизации и фазирования), модели прогнозирования спроса на перевозки [5]. Применение методов выпуклой оптимизации, теории игр и стохастического программирования позволяет находить решения, устойчивые к неопределенности и риску.

3. Статистическое моделирование и машинное обучение – основывается на анализе исторических данных о транспортных потоках, аварийности, погодных условиях и других факторах. Позволяет выявлять закономерности, строить прогнозные модели и разрабатывать системы поддержки принятия решений. В последнее время активно развиваются методы машинного обучения (Machine Learning), в частности, глубокого обучения (Deep Learning), для анализа больших данных (Big Data) в транспортной сфере. Примеры включают прогнозирование заторов с использованием нейронных сетей, распознавание дорожных знаков и разметки, адаптивное управление транспортными потоками [6].

4. Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) – интегрированные системы, объединяющие различные технологии (связь, сенсоры, обработку данных, управление) для повышения эффективности и безопасности транспортных процессов. ИТС включают в себя системы информирования водителей, адаптивного управления дорожным движением, автоматизированные системы взимания платы, системы управления общественным транспортом и многое другое [7].

Эти методы позволяют учитывать сложные взаимосвязи и динамические изменения в ТС, обеспечивая повышение их эффективности, безопасности и экологичности. Важно отметить, что часто эти методы используются комбинированно для достижения наилучших результатов.

Применение современных методов моделирования и оптимизации транспортных процессов приводит к следующим измеримым улучшениям в функционировании ТС:

1. Использование имитационного моделирования позволяет оптимизировать распределение транспортных потоков, в том числе за счет перераспределения спроса по времени суток и видам транспорта [8]. Это способствует снижению перегруженности дорог и уменьшению заторов [1].

Исследования показывают, что применение адаптивных систем управления дорожным движением, основанных на имитационном моделировании, может снизить время задержки в пути на 15-25% [9].

2. Математическое моделирование режимов работы светофоров, а также оптимизация геометрии перекрестков и дорожной сети, позволяет оптимизировать их работу, что приводит к увеличению пропускной способности и снижению задержек [2]. Оптимизация циклов светофорного регулирования с использованием методов математического программирования может увеличить пропускную способность перекрестков на 10-20% [10].

3. Оптимизация маршрутов, включая динамическую маршрутизацию в режиме реального времени, и использование эффективных схем доставки с помощью специализированных программных комплексов позволяют снизить затраты на транспортировку (топливо, амортизация, время водителей) и повысить эффективность использования транспортных средств. Применение алгоритмов оптимизации маршрутов для грузовых перевозок может сократить пробег транспортных средств на 5-15% и, соответственно, снизить расходы на топливо [11].

4. Применение ИТС, основанных на моделировании, анализе данных и машинном обучении, способствует снижению числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и повышению общей безопасности на дорогах [12]. Системы предупреждения о столкновениях, адаптивный круиз-контроль и системы мониторинга "слепых зон", основанные на технологиях ИТС, могут снизить количество ДТП на 10-30% [13]. Также стоит упомянуть системы автоматического экстренного торможения (АЕВ).

5. Снижение заторов, оптимизация маршрутов и режимов движения, а также переход на более экологичные виды транспорта (например, электромобили) способствуют уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу. Исследования показывают, что оптимизация транспортных потоков может снизить выбросы CO<sub>2</sub> на 5-10% [14].

#### **Обсуждение**

Рассмотренные методы моделирования и оптимизации транспортных процессов предоставляют широкий спектр инструментов для улучшения функционирования ТС, охватывая различные уровни управления – от оперативного (управление светофорами, информирование водителей) до стратегического (планирование развития транспортной инфраструктуры). Имитационное моделирование обеспечивает возможность детального анализа поведения транспортных потоков и оценки влияния различных факторов в динамике, включая стохастические (случайные) события.

Математическое моделирование, в свою очередь, обеспечивает возможность разработки оптимальных стратегий управления и планирования, учитывая сложные взаимосвязи между элементами системы и целевые функции оптимизации. Однако, как и любой инструмент, эти методы имеют определенные ограничения и демонстрируют ряд противоречий:

- Транспортные системы характеризуются большим количеством взаимодействующих элементов и высокой степенью неопределенности. Это требует разработки сложных моделей, учитывающих множество факторов, что, в свою очередь, приводит к высоким требованиям к вычислительным ресурсам и сложности валидации моделей.

- Для построения адекватных моделей и принятия эффективных решений необходимы достоверные данные о транспортных потоках, состоянии дорожной сети, поведении водителей и других параметрах. Сбор, обработка и обновление этих данных – сложная и ресурсоемкая задача. Особую актуальность приобретает использование данных, получаемых в режиме реального времени от различных источников (датчики, GPS-трекеры, видеокамеры, мобильные приложения).

- Аварии, погодные катаклизмы, внезапные изменения спроса на перевозки и другие непредсказуемые события могут существенно влиять на работу транспортной системы. Моделирование таких событий и разработка адаптивных стратегий управления – сложная задача, требующая применения методов стохастического моделирования и теории риска.

- Поведение водителей и пешеходов не всегда рационально и предсказуемо. Моделирование человеческого фактора – важная и сложная задача, требующая учета психологических, социальных и когнитивных аспектов. В этом направлении активно развиваются агентно-ориентированные модели (Agent-Based Modeling).

- Методы, хорошо работающие для небольших транспортных сетей, могут оказаться неэффективными для крупных мегаполисов. Разработка масштабируемых алгоритмов и моделей – актуальная задача.

Сравнительный анализ различных методов моделирования и оптимизации представлен в таблице 1.

*Таблица 1. Сравнительный анализ методов моделирования и оптимизации транспортных процессов.*

<b>Метод</b>	<b>Преимущества</b>	<b>Недостатки</b>	<b>Примеры применения</b>
<b>Имитационное</b>	Гибкость в учете	Высокие требования к	Анализ пропускной

<b>моделирование</b>	различных факторов и сценариев; Возможность детального анализа сложных систем; Возможность "проигрывания" сценариев "что если"	вычислительным ресурсам; Сложность валидации моделей; Необходимость калибровки параметров	способности, оценка эффективности АСУДД, тестирование новых технологий (беспилотный транспорт)
<b>Математическое моделирование</b>	Высокая точность при корректной постановке задачи; Возможность получения аналитических решений; Возможность оптимизации	Ограниченность в учете нелинейных и стохастических факторов; Сложность разработки моделей для больших систем	Оптимизация светофорного регулирования, маршрутизация, планирование развития транспортной сети
<b>Статистическое моделирование</b>	Эффективность при наличии большого объема данных; Возможность прогнозирования на основе исторических данных	Зависимость от качества и полноты исходных данных; Ограниченность в учете динамических изменений системы	Прогнозирование транспортных потоков, выявление факторов риска ДТП, оценка спроса на перевозки
<b>ИТС</b>	Комплексный подход к управлению; Интеграция различных технологий; Повышение эффективности и безопасности	Высокая стоимость внедрения и эксплуатации; Сложность интеграции различных систем; Зависимость от надежности каналов связи	Адаптивное управление дорожным движением, информирование водителей, системы взимания платы, управление общественным транспортом

Таким образом, выбор метода (или комбинации методов) моделирования и оптимизации транспортных процессов должен основываться на специфике решаемых задач, доступности данных и ресурсов, а также на особенностях конкретной ТС. Комплексное применение различных методов, а также итеративный подход (построение модели - валидация - уточнение модели), может обеспечить более точные и надежные результаты, способствуя повышению эффективности, безопасности и устойчивости транспортных процессов.

#### **Заключение**

Современные методы моделирования и оптимизации транспортных процессов играют ключевую роль в развитии эффективных, безопасных, устойчивых и экологических транспортных систем. Применение имитационного, математического и статистического моделирования, а также развитие и внедрение Интеллектуальных Транспортных Систем, позволяет решать широкий спектр задач, связанных с управлением транспортными потоками, оптимизацией маршрутов, повышением безопасности дорожного движения и снижением негативного воздействия на окружающую среду.

Однако для достижения максимальной эффективности необходимо учитывать ограничения и вызовы, связанные с применением этих методов. Ключевыми направлениями дальнейших исследований являются:

1. Разработка более совершенных моделей, учитывающих сложность и многофакторность транспортных систем, включая человеческий фактор и непредсказуемые события.
2. Развитие методов сбора, обработки и анализа больших данных (Big Data) в транспортной сфере.
3. Создание масштабируемых алгоритмов и моделей, пригодных для применения в крупных мегаполисах.
4. Интеграция различных методов моделирования и оптимизации для достижения синергетического эффекта.
5. Разработка и внедрение новых технологий, таких как беспилотные транспортные средства и системы искусственного интеллекта, для управления транспортными процессами.
6. Оценка социально-экономической эффективности внедрения новых технологий и методов управления транспортом.

Постоянное совершенствование методов моделирования и оптимизации, а также их интеграция с другими технологиями, позволит создавать более интеллектуальные, адаптивные и устойчивые транспортные системы будущего.

### Список литературы / References

1. Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г., Беляев Э., & Маврин В.Г. Применение современных методов оптимизации транспортной системы в условиях роста автомобилизации // Инновации в науке. – 2012. – №. 13-1. – С. 71-85.
2. Доенин В.В. Моделирование транспортных процессов и систем // М.: Изд. «Компания Спутник. – 2012. – Т. 288.
3. Арифджанова Н.З. Оценка эффективности логистической деятельности //Проблемы современной науки и образования. – 2022. – №. 9 (178). – С. 27-29.
4. Barceló J. et al. Fundamentals of traffic simulation. – New York: Springer, 2010. – Т. 145. – С. 439.
5. Ortúzar J.D., Willumsen L.G. Modelling transport. John Wiley & Sons //West Sussex, England. – 2002.
6. Vlahogianni E.I., Karlaftis M.G., Golias J.. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going //Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2014. – Т. 43. – С. 3-19.
7. Qureshi K.N., Abdullah A.H. A survey on intelligent transportation systems //Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – Т. 15. – №. 5. – С. 629-642.
8. Арифджанова Н.З. Современные тенденции развития городского пассажирского транспорта //Проблемы современной науки и образования. – 2023. – №. 3 (181). – С. 18-20.
9. Комаров В.В., Гагаган С.А. Архитектура и стандартизация телематических и интеллектуальных транспортных систем. Зарубежный опыт и отечественная практика //М.: НТБ «ЭНЕРГИЯ»,–2012. – 2012.
10. Poddar S. Operational performance evaluation of traffic signals using big data analytics: дис. – Iowa State University, 2020.
11. Кочетов Ю.А. Новые модели и методы маршрутизации транспортных средств //Проблемы оптимизации и экономические приложения. – 2015. – С. 52-55.
12. Гасников А.В. Эффективные численные методы поиска равновесий в больших транспортных сетях //Дисс. на соискание уч. степ. д. ф.-м. н. по специальности. – 2016. – Т. 5.
13. Forkenbrock G.J., O'Hara B.C. A forward collision warning (FCW) performance evaluation //Proc. 21st Int. Technical Conf. Enhanced Safety of Vehicles (ESV). – 2009. – С. 1-12.
14. Barth M., Boriboonsomsin K. Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion //Transportation research record. – 2008. – Т. 2058. – №. 1. – С. 163-171.