УДК 656.056.5

Исаков К., Алтыбаев А.Ш., Чопоев А.Б., Чылпакбаева Д., Сыдыков А.
И.Раззаков ат. Кыргыз мамлекеттик техникалык университети,
Бишкек ш., Кыргыз Республикасы
Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызская Республика

K. Isakov, A.Sh.Altybaev, A.B.Chopoev, D.Chylpakbaeva, A.Sydykov
I.Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyz Republic
k.isakov@kstu.kg, a.altybaev@kstu.kg, a.chopoev@kstu.kg, damira_56@mail.ru, sydykov.altyn.02@gmail.com

МИКРОМОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СВЕТОФОРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПЕРЕКРЕСТКЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

ӨТКӨРҮҮ ЖӨНДӨМДҮҮЛҮГҮН ЖАКШЫРТУУ ҮЧҮН КЕСИЛИШТЕРДЕГИ СВЕТОФОРДУН ИШТЕШИНИН МИКРОМОДЕЛИН ТҮЗҮҮ

MICRO-SIMULATION OF TRAFFIC LIGHT OPERATION AT INTERSECTIONS TO IMPROVE THROUGHPUT

Акыркы жылдары шаарларда транспорт каражаттарынын санынын тез өсүшү жол-транспорт инфраструктурасынын иштөөсүнө олуттуу жүк жаратты. Айрыкча светофор аркылуу жөнгө салынган кесилиштерде транспорт агымдарынын топтолушу, кезектердин пайда болушу жана унаалардын кечигүүсү байкалууда. Бул макалада светофордук объекттердин иштөөсүн микромоделдөө ыкмалары аркылуу талдоо жана кесилиштин өткөрүмдүүлүгүн жогорулатуу мүмкүнчүлүктөрү каралат. Изилдөөдө транспорт агымдарынын параметрлери, транспорт каражаттарынын өз ара аракеттенүүсү, кыймыл ылдамдыгы жана светофор фазаларынын узактыгы эске алынган микроскопиялык моделдөө ыкмасы колдонулган. Микромоделдөө реалдуу шарттагы транспорт кыймылын компьютердик моделде кайра түзүүгө мүмкүндүк берип, ар кандай уюштуруу чечимдеринин натыйжалуулугун алдын ала баалоого шарт түзөт. Изилдөөнүн жыйынтыгында светофор фазаларын оптималдаштыруу, бурулуш агымдарын туура бөлүштүрүү жана цикл убактысын жөнгө салуу аркылуу кесилиштин өткөрүмдүүлүгүн жогорулатууга болоору аныкталды. Ошондой эле транспорт каражаттарынын орточо кечигүү убактысы жана кезек узундугу кыскаргандыгы белгиленди.

Ачкыч сөздөр: *транспорт агымы, микромоделдөө, светофордук жөнгө салуу, өткөрүмдүүлүк, жол кыймылы.*

Рост интенсивности транспортных потоков в современных городах приводит к увеличению нагрузки на элементы улично-дорожной сети, особенно на регулируемые перекрёстки. В статье рассматривается применение методов микромоделирования для анализа работы светофорных объектов и повышения пропускной способности перекрёстков. В исследовании используется микроскопическая модель транспортного потока, учитывающая параметры движения транспортных средств, их взаимодействие, скорость движения и структуру светофорных фаз. Применение микромоделирования позволяет воспроизводить реальные условия дорожного движения и анализировать эффективность различных вариантов организации движения. В работе также рассмотрен пример использования микромоделирования для перекрёстка улиц Горького и 7-Апреля в городе Бишкек. Результаты исследования показывают, что оптимизация светофорного

цикла и перераспределение фаз регулирования позволяют снизить задержки транспорта и увеличить пропускную способность перекрёстка.

Ключевые слова: *транспортный поток, микромоделирование, светофорное регулирование, перекрёсток, пропускная способность.*

The growth of traffic demand in modern cities increases the load on urban road networks, particularly on signalized intersections. This paper examines the application of microscopic traffic simulation methods to analyze the operation of signalized intersections and improve their capacity. The research is based on microscopic traffic flow models that consider vehicle behavior, interaction between vehicles, speed characteristics and signal phase structure. Traffic microsimulation allows reproducing real traffic conditions and evaluating the efficiency of different traffic control strategies. The study also presents a case study of the intersection of Gorky Street and April 7 Street in Bishkek. The results show that optimization of signal timing and redistribution of traffic phases can significantly reduce vehicle delays and increase intersection capacity.

Key words: *traffic flow, microsimulation, signal control, intersection capacity, traffic modeling.*

Введение

Улично-дорожная сеть современных городов представляет собой сложную транспортную систему, функционирование которой зависит от эффективности управления транспортными потоками. Одним из наиболее проблемных элементов городской транспортной инфраструктуры являются регулируемые перекрёстки. Именно на перекрёстках происходит пересечение транспортных потоков различных направлений, что часто приводит к образованию задержек и транспортных заторов.

За последние годы в Кыргызской Республика, в том числе в г.Бишкек, наблюдается огромный рост ввозимых транспортных средств, тем самым изменяется состав транспортного потока и увеличивается их интенсивность движения. Для решения данной проблемы есть большая необходимость применения возможностей модернизированных методов, вместо уже известных с давних времен методов.

В настоящее время все глубже внедряется моделирование на разных уровнях – микро, макро и мезо, где есть возможность учитывать множество факторов или критериев, начиная от технических характеристик транспортных средств, заканчивая поведения водителей. В нашем случае, создавая микромоделирование мы можем четко провести анализ движения, которые могут повлиять на эффективную работу уличнодорожно-сети, а именно перекрестков.

Микромоделирование активно применяется в транспортных исследованиях во многих странах мира и используется при проектировании транспортной инфраструктуры, разработке интеллектуальных транспортных систем и оптимизации режимов светофорного регулирования [1].

Методы исследования

В рамках исследования использовались методы микроскопического моделирования транспортных потоков. Основой данного подхода является моделирование движения каждого транспортного средства в системе с учетом параметров дорожной инфраструктуры и поведения водителей.

Основные параметры транспортного потока определяются фундаментальной зависимостью:

$$q = k \cdot v$$

где, q - интенсивность транспортного потока, авт/час; k - плотность транспортного потока, авт/км; v — средняя скорость движения, км/ч.

Пропускная способность регулируемого перекрёстка определяется следующим выражением:

$$C = \frac{S \cdot g}{c}$$

где, C - пропускная способность направления движения; S - насыщенный поток; g - эффективное время зеленого сигнала; c - длительность светофорного цикла.

Для оценки степени загрузки перекрёстка применяется коэффициент насыщения:

$$X = \frac{q \cdot c}{S \cdot g}$$

Если значение коэффициента X превышает 0,85-0,90, перекрёсток работает в условиях перегрузки и наблюдается рост транспортных очередей.

Для более точного анализа функционирования регулируемых перекрёстков в микромоделировании используются дополнительные математические зависимости, описывающие поведение транспортных потоков и параметры движения транспортных средств.

Одним из ключевых показателей эффективности функционирования перекрёстка является средняя задержка транспортных средств. Для её определения часто используется формула Вебстера [9]:

$$d = \frac{0.5\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - X}$$

где, d - средняя задержка транспортных средств, с; C - длительность светофорного цикла, с; g - эффективное время зелёного сигнала, с; X - коэффициент насыщения потока.

Данная зависимость позволяет оценить влияние параметров светофорного регулирования на уровень задержек транспортных средств на перекрёстке.

Для оценки длины очереди на регулируемом перекрёстке используется следующая зависимость:

$$L = \frac{q \cdot d}{3600}$$

где, L - средняя длина очереди, м; q - интенсивность транспортного потока, авт/ч; d - средняя задержка транспортных средств, с.

Использование подобных моделей позволяет оценить эффективность различных вариантов организации движения еще на этапе компьютерного моделирования.

Одним из важнейших инструментов анализа транспортных потоков является **фундаментальная диаграмма транспортного потока**, которая отражает взаимосвязь между тремя основными параметрами движения:

- интенсивностью транспортного потока;
- плотностью транспортного потока;
- средней скоростью движения.

При низкой плотности транспортного потока автомобили движутся практически свободно, и скорость движения близка к максимальной. По мере увеличения плотности транспортного потока расстояние между автомобилями уменьшается, что приводит к снижению скорости движения.

Максимальная пропускная способность дороги достигается при так называемой *критической плотности транспортного потока*. После её превышения скорость движения резко снижается, и начинается образование транспортных заторов.

В условиях регулируемых перекрёстков параметры фундаментальной диаграммы значительно зависят от структуры светофорного цикла и распределения фаз регулирования.

При выполнении микромоделирования учитывались следующие параметры:

- интенсивность транспортных потоков;
- состав транспортного потока;

- скорость движения;
- время реакции водителей;
- структура светофорных фаз.

Международный опыт применения транспортного моделирования. В развитых странах методы микромоделирования широко используются для анализа работы транспортных узлов и перекрёстков.

В Германии, Великобритании и США применяются программные комплексы транспортного моделирования, такие как VISSIM, Aimsun и PARAMICS. Эти системы позволяют моделировать движение транспортных средств, общественного транспорта и пешеходов, а также анализировать различные варианты организации дорожного движения [10].

В Канаде и Австралии широко применяется программный комплекс SIDRA Intersection, предназначенный для анализа регулируемых и нерегулируемых перекрёстков. Использование таких моделей позволяет оценивать уровень обслуживания перекрёстков, определять задержки транспортных средств и оптимизировать параметры светофорного регулирования.

В Сингапуре и Южной Корее транспортное моделирование используется при разработке интеллектуальных транспортных систем, обеспечивающих адаптивное управление светофорами в зависимости от текущей интенсивности движения.

Международный опыт показывает, что применение методов транспортного моделирования позволяет повысить эффективность управления дорожным движением и снизить уровень транспортных заторов в городах [2].

Пример применения микромоделирования в условиях города Бишкек. В качестве примера рассмотрен регулируемый перекрёсток улиц 7-Апреля и Горького в городе Бишкек. Данный перекрёсток характеризуется высокой интенсивностью транспортных потоков, значительным количеством общественного транспорта и активным пешеходным движением.

Для анализа была построена микромодель перекрёстка, включающая:

- четыре подхода к перекрёстку;
- по три полосы движения на основных направлениях;
- выделенные полосы для поворотов;
- регулируемые пешеходные переходы.

При исходных параметрах светофорного регулирования длительность светофорного цикла составляла 120 секунд. Микромоделирование показало, что при таких параметрах на перекрёстке наблюдается значительная задержка транспортных средств и образование очередей.

В результате моделирования были предложены следующие меры:

- сокращение длительности светофорного цикла до 100 секунд;
- увеличение времени зеленого сигнала для основного направления;
- выделение отдельной фазы для левых поворотов;
- координация светофорных сигналов с соседними перекрёстками.

После оптимизации параметры движения улучшились.

Таблица1.– Параметры оптимизации

Показатель	**До оптимизации**	**После оптимизации**
Средняя задержка	65 с	42 с
Длина очереди	120 м	75 м
Пропускная способность	3100 авт/ч	3600 авт/ч

Таким образом, применение методов микромоделирования позволило увеличить пропускную способность перекрёстка примерно на **15–20 %**.

Также, для повышения пропускной способности данного перекрестка предлагается следующая схема движения (Рис.1):

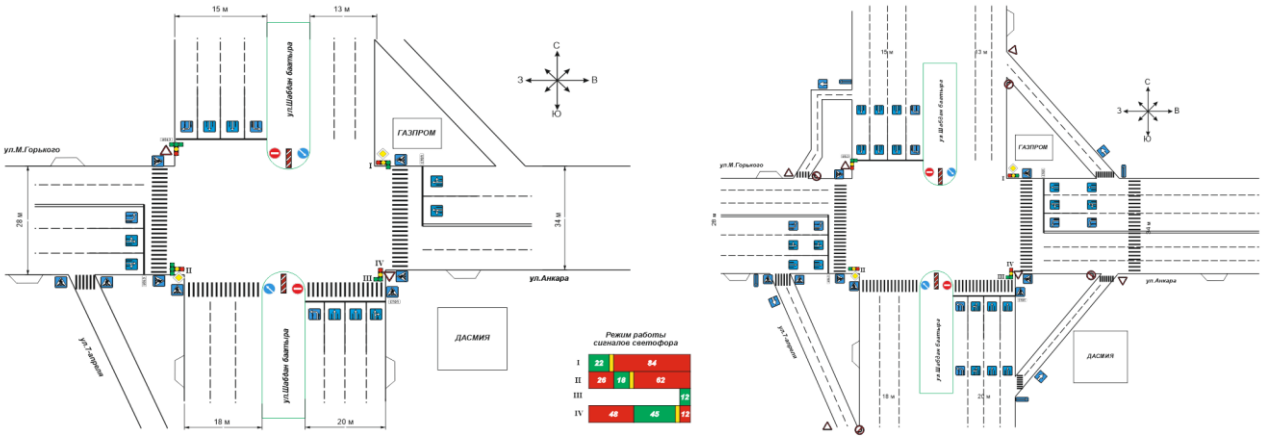


Рисунок 1 – Существующая (слева) и предлагаемая (справа) схема организации движения

1. Закрыть правые повороты ТС по всем направлениям движения.
2. Организовать поворот налево с двух полос:
   - с ул.Анкары с восточного направления;
   - с ул.Шабдан баатыра с южного направления.
3. Строить односторонние дороги направо:
   - с южного направления ул.Шабдан баатыра на ул.Анкара длиной 130 м;
   - с северного направления ул.Шабдан баатыра на ул.Горького длиной 170 м;
4. Перенос остановочного пункта ОТ:
   - на ул.Анкара на восток на 100 м.
   - на ул.Шабдан баатыра на север на 240 м.
5. Добавить 3-полосу движения ТС по ул.Анкара (Горького) с востока на запад до моста ул.Карадарьинская длиной 1 км или увеличить зеленый сигнал светофора на 18 сек. на ул.Анкара с восточной стороны.
6. Установка дорожных знаков на растяжках - 28 шт., на стойках - 16 шт.
7. Нанести дорожные разметки около 400 кв.м.
8. Продолжить работу по совершенствованию движения ТС на перекрестках ул.Анкара-ул.Достоевского, ул.7-апреля-ул.Куйручук.

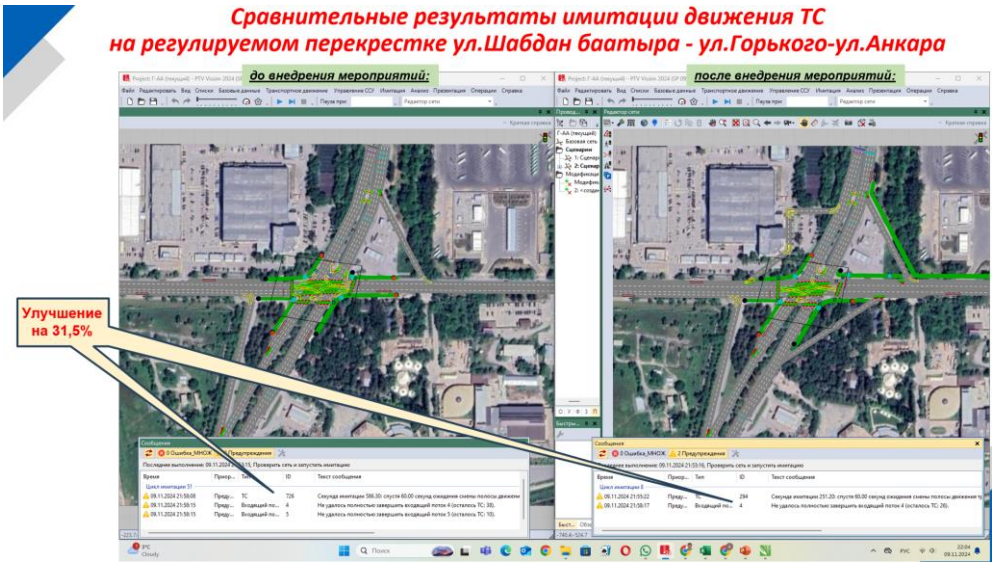


Рисунок 2 – Полученные предварительные результаты после моделирования

Возможности применения микромоделирования для системы управления движением. Использование микромоделирования позволяет решать широкий круг задач в области организации дорожного движения. В частности, данный метод может применяться для:

- оптимизации режимов светофорного регулирования;
- анализа пропускной способности перекрёстков;
- оценки влияния новых транспортных объектов;
- проектирования многоуровневых транспортных развязок;
- разработки интеллектуальных транспортных систем.

Особенно перспективным направлением является использование адаптивных светофорных систем, которые изменяют параметры регулирования в зависимости от текущей интенсивности движения. Такие системы уже применяются в крупных городах Европы и Азии.

В перспективе внедрение транспортного моделирования в системе управления дорожным движением города Бишкек позволит повысить эффективность использования улично-дорожной сети и снизить уровень транспортных заторов.

Выводы

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность применения методов микромоделирования при анализе работы регулируемых перекрёстков.
Применение компьютерного моделирования позволяет:

- прогнозировать транспортные заторы;
- выбирать оптимальные режимы светофорного регулирования;
- снижать задержки транспортных средств;
- повышать безопасность дорожного движения.

Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. На улично-дорожной сети, оборудованные светофорными объектами имеют более высокую степень критических элементов.
2. Использование методов микромоделирования движения участников дорожного движения дает возможность провести качественный анализ и составить стратегию улучшения ОДД по результатам изменения условий движения.
3. Оптимизация параметров светофорного регулирования позволяет снизить задержки транспортных средств и повысить пропускную способность перекрёстков.
4. Использование методов транспортного моделирования является перспективным направлением развития системы управления дорожным движением в городе Бишкек.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке транспортных моделей городов и внедрении интеллектуальных транспортных систем.

В условиях роста автомобилизации в городах Кыргызстана использование транспортного моделирования становится одним из ключевых инструментов научного обоснования решений в сфере организации дорожного движения.

Список литературы

1. К. Исаков и др. Выявление закономерности потребностей количества полос движения на пересечениях улиц г. Бишкек [Текст] / К. Исаков, А.Ш. Алтыбаев, А.Чопоев, А.Абдилова // Известия КГТУ им.И.Раззакова. -Б., 2024. -№2(70). -С.629-635.

2. К.Исаков и др. Анализ и способы улучшения пропускных способностей пересечении улиц г.Бишкек [Текст] / К.Исаков, А.Алтыбаев, К.Арыкбаев, Р.Орунбекова, А.Татанова //Известия КГТУ им.И.Раззакова. -Б., 2023. -№3(67). -С.1529-1535.

3. Организация дорожного движения [Текст]: учебное пособие / И.Н. Пугачев, А.Э. Горев, А.И. Солодкий, А.В. Белов // под ред. А.Э. Горева. – М.: ИЦ «Академия», 2013. – 240 с.

4. К.Исаков и др. Анализ и рекомендации для увеличения пропускной способности улиц г.Бишкек [Текст] / К.Исаков, К.Арыкбаев, А.Алтыбаев, А.Татанова, Э.Элтуйбасова // Известия КГТУ им.И.Раззакова, №2(74). -Б., 2025. С.475-480

5. Пеньшин, Н.В. Методология обеспечения безопасности дорожного движения на автомобильном транспорте [Текст]: учебное пособие/ Н.В. Пеньшин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 456 с.

6. Клинковштейн, Г.И. Организация дорожного движения [Текст]: учеб. для вузов // Г.И.Клинковштейн, М.Б. Афанасьев. – М.: Транспорт, 2001. – 247 с.

7. Коноплянко, В. И. Организация и безопасность дорожного движения [Текст]: учебник / В. И. Коноплянко. – М.: Высшая школа, 2007. – 383 с.

8. Пугачёв, И. Н. Организация и безопасность дорожного движения [Текст]: учебное пособие / И. Н. Пугачёв, А. Э. Горев, Е. М. Олещенко. – М.: Академия, 2009. – 270 с.

9. Webster F. Traffic Signal Settings. London, 1958.

10. Akçelik R. SIDRA Intersection User Guide. Akcelik & Associates, 2017.