

УДК656.025.2

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СФЕРЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРОВ НА ТРАНСПОРТЕ

Д.Д. Варкентин (Санкт-Петербург)

Введение

Современные мегаполисы сталкиваются с проблемой транспортной перегруженности. Данная ситуация обусловлена ростом населения и увеличением мобильности граждан, что приводит к значительному превышению пропускной способности дорожной инфраструктуры. В результате возникает необходимость комплексного подхода к управлению транспортными потоками, включающего внедрение инновационных технологий и оптимизацию маршрутных сетей. В последние годы программы для имитационного моделирования транспортных потоков стали популярны. Они позволяют анализировать текущую ситуацию и находить оптимальные решения. С их помощью можно моделировать различные сценарии развития транспортной сети. Современные интерфейсы позволяют детально спроектировать изменения в транспортной сети и получить результаты близкие к реальным.

Целью данной работы является разработка быстрого и эффективного решения для планирования развития пассажирского транспорта в быстрорастущих городах. Используя программное обеспечение для имитационного моделирования, учитывающего динамичный рост городов и текущие параметры городской сети и пассажиропотоков. Ключевыми задачами являются:

- обеспечение соответствия провозной способности транспортной системы текущему и прогнозируемому пассажиропотоку;
- оптимизация скорости транспортной корреспонденции;
- обеспечение доступности объектов общественного транспорта в регламентированных пешеходных зонах, при этом минимизируя время пешеходной доступности для пассажиров.

Данный подход позволит разработать адаптивные решения для развития пассажирского транспорта, учитывая динамику роста городов и обеспечивая комфортное и эффективное перемещение жителей. Работа будет основана на комплексном анализе данных, включающем текущие параметры пассажиропотока, существующую транспортную сеть и прогнозируемое развитие города. Результатом работы станут модели, позволяющие принимать обоснованные решения по развитию общественного транспорта в быстрорастущих населенных пунктах.

Методика исследования

Эффективная организация пассажирских перевозок требует комплексного подхода, основанного на анализе множества факторов. В качестве основополагающих критериев при проектировании транспортной системы должны выступать:

- фактическая и прогнозируемая численность населения обслуживаемых территорий или численность рабочих мест, если речь идёт о производственной зоне;
- распределение пассажиропотока с учётом провозной способности пассажирского транспорта;
- скорость сообщения и регулярность движения;
- доступность объектов системы пассажирского транспорта.

Имитационное моделирование представляет инструмент для создания виртуальных прототипов транспортных систем, позволяющий анализировать их поведение в различных условиях без необходимости реального внедрения. Методика

включает следующие этапы:

- создание цифровых двойников транспортной инфраструктуры с учетом физических параметров, пропускной способности и интенсивности использования;
- верификация моделей путем сравнения с реальными данными транспортных потоков;
- тестирование различных сценариев размещения объектов инфраструктуры.

Анализ размещения объектов транспортной инфраструктуры при помощи AnyLogistix

Использование программы AnyLogistix для анализа больших данных, позволяет быстро определить места размещения объектов общественного транспорта.

Ключевыми преимуществами программы являются:

- возможность обработки больших массивов данных для определения возможных мест расположения объектов транспорта;
- определение наилучшего места в соответствии с количеством объектов или определение необходимого количества объектов в соответствии с максимальным возможным радиусом охвата от потенциальных пользователей, что особенно важно для объектов пассажирского транспорта;
- использование формулы (1), основанной на минимизации произведения пассажирской нагрузки в соответствии с реальными данными (численностью населения или потенциальными рабочими местами) и расстояний до объектов транспорта. Это позволяет определить места расположения объектов транспорта в соответствии с минимизацией времени подхода, исходя из общего числа потенциальных пассажиров.

$$U = \sum_{i=1}^n (Q_i * L_i) \rightarrow MIN \quad (1)$$

где:

Q_i – потенциальный пассажиропоток, генерируемый производственной или жилой единицей;

L_i – расстояние до объекта пассажирского транспорта.

В работе Полякова А.А. подчеркивается ключевая роль не только времени поездки, но и времени, затрачиваемого на ходьбу до остановки и ожидание транспорта, для оценки качества транспортной сети [1]. Поэтому важно в первую очередь проектировать общественный транспорт с учётом расстояний от мест проживания или работы пассажиров до объектов пользования общественным транспортом.

Для плотнонаселенных городских агломераций, как отмечает Поляков А.А. и подтверждают другие современные исследования общественного транспорта, оптимальное расстояние до остановок должно составлять не более 500 метров (примерно 5-7 минут ходьбы) [2, 3]. Это расстояние позволяет минимизировать затраты времени пассажиров на передвижение к транспорту, что существенно влияет на общую эффективность и качество транспортной сети.

Оценка текущего состояния и выявление потенциальных проблем с помощью интеллектуальных и телекоммуникационных систем

Данная оценка предусматривает применение современных инструментов аналитики для обработки массивов данных о пассажиропотоках и выявления корреляций с демографическими показателями. Использование новых технологий для сбора и анализа данных о пассажиропотоке и мобильности. Эти технологии могут обеспечить более точную оценку реального спроса и более детализированную картину рассматриваемых транспортных потоков:

- сбор и интеграция данных из разнородных источников (транспортные карты, мобильные приложения, датчики);

- статистический анализ пространственно-временного распределения пассажиропотоков.

Для сбора данных применяются различные современные информационные ресурсы, включая: автоматизированные системы контроля оплаты проезда, автоматизированные системы учёта пассажиров; системы автоматического определения местоположения транспортных средств; мобильные устройства пользователей.

При помощи источников данных возможно выявление несоответствий между расчетными и фактическими показателями:

1. анализ соответствия спроса и предложения: использование методов обработки больших данных для оценки несоответствия текущего пассажиропотока с рассчитанным в соответствии с численностью и мобильностью населения;

2. прогнозирование задержек: применение интеллектуальных телекоммуникационных систем для определения средних, повторяющихся задержек по маршрутам в определенный период.

Расхождение времени в пути в час пик должно стремиться к минимуму; частное среднего времени преодоления маршрута во внепиковое время и среднего времени маршрута в пиковый период должно стремиться к единице (2); соответствие пассажиропотока определяется аналогичным образом по формуле (3).

$$\frac{V_{\text{ср.вп}}}{V_{\text{ср.п}}} \rightarrow 1 \quad (2)$$

где:

$V_{\text{ср.вп}}$ – средняя скорость на маршруте во внепиковый период;

$V_{\text{ср.п}}$ – средняя скорость на маршруте в пиковый период.

$$\frac{Q_p}{Q_f} \rightarrow 1 \quad (3)$$

где:

Q_p – уровень расчётного пассажиропотока;

Q_f – уровень фактического пассажиропотока.

Одним из инструментов обработки данных может быть анкетирование. Оно позволяет выявить возможные причины несоответствия показателей при внедрении предлагаемых решений, а также учесть мнение пассажиров об удобстве пользования общественным транспортом. Опросы должны быть нацелены на оценку удобства и качества обслуживания общественного транспорта, а также удобства и скорости перемещения по маршруту.

Корректировка моделей при помощи интеллектуальных систем

После выявления недостатков в транспортной сети можно произвести корректировку транспортной сети. Проблемы с обслуживанием могут быть решены увеличением вместимости транспортных средств или сокращением интервалов движения на маршруте.

Для выявления и анализа задержек в пути рекомендуется использовать специализированное программное обеспечение, которое позволяет детально исследовать участки маршрута, вызывающие существенные временные задержки.

Современные программы транспортного моделирования имеют возможность построение виртуальной модели транспортной системы, включающей существующие дороги, транспортные потоки, остановки общественного транспорта, а также возможные варианты их изменения. В модель должны быть включены данные о численности и составе пассажиропотоков, потоках личного транспорта.

Программы типа Vissim, RITM, AniLogic позволяют произвести моделирование

разных сценариев: Проведение моделирования с различными вариантами рационализации (расширение дорог, изменение маршрутов, выделение полос). Дать оценку влияния каждого сценария на среднее время в пути, пропускную способность дорог и задержки. Оценка влияния расширения на время в пути и пропускную способность. Изучение возможности перераспределения территорий, ранее отведённых под парковку, в пользу общественного транспорта.

Реализации на примере новой развивающейся локации

На рис. 1 представлен анализ расположения остановок общественного транспорта в новом районе. Представлены результаты анализа, проведенного с использованием программы AnyLogic, демонстрирующие наиболее рациональные места расположения объектов транспорта.

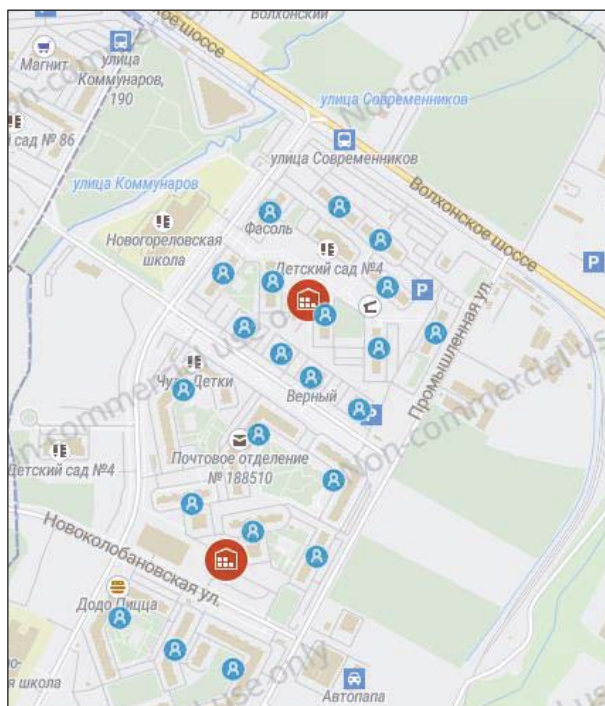


Рис. 1. Выбор мест для размещения объектов транспорта в AnyLogicstix

Далее представлены существующие маршруты, которые обслуживают данный район. Несмотря на то, что остановочные пункты расположены в соответствии с данными, ранее рассчитанными в программе, наблюдается значительное дублирование маршрутов.

Маршруты дублируют друг друга более чем на 90%, кроме того, в радиусе 150 м проходит похожий городской маршрут.

На рис. 2 представлена маршрутизация района с указанием существующих маршрутов. Данная ситуация свидетельствует о нерациональной организации маршрутов, что может приводить к излишним затратам со стороны перевозчиков и негативно сказаться на работе маршрутов, влияя на удобства в плане пассажиропользования.



Рис. 2. Трассы существующих маршрутов

Как видно из рис. 2, трассы коммерческих маршрутов 650Б и 650В практически идентичны, за исключением того, что в посёлке Новогорелово они идут по параллельным довольно коротким улицам длиной 300 и 400 метров, находящимся в 350 метрах друг от друга. На 11 километровом маршруте процент дублирования двух данных маршрутов достигает 95%, при этом параллельно они дублируют более короткий городской 345 маршрут почти на 100%.

В работе Царикова А.А. был проведен анализ маршрутной сети в различных городах страны. В статье была затронута тема нецелесообразного использования транспорта из-за большого количества дублирующих маршрутов. Было выделено, что маршруты с 50% дублированием требуют согласованности в расписаниях, а 75% – исключения. Также был рассчитан маршрутный коэффициент, который определен как отношение суммарной длины маршрутов к длине транспортной сети. Он показывает перенасыщенность транспортной сети, которая провоцируется дублированием и непрямолинейностью некоторых маршрутов. Как показал анализ, во многих городах он избыточен. Подчеркивается, что чрезмерное дублирование ведет к нецелесообразному использованию подвижного состава. Так, в Магнитогорске, чтобы организовать на всех имеющихся маршрутах 10-минутные интервалы движения, необходимо 728 единиц подвижного состава. В случае рационализации схемы маршрутов для того же интервала движения потребуется всего 168 автобусов [4].

Для минимизации дублирования маршрутов общественного транспорта, целесообразно пересмотреть трассировку существующих маршрутов. Как показывает опыт, перенаправление городских маршрутов может быть эффективным решением. В городе уже существуют примеры, когда автобусные городские маршруты перенаправлялись в сторону ближайшей областной застройки. Например, городской маршрут №301 был направлен в сторону новой застройки расположенной в Ленинградской области, что позволило увеличить пассажиропоток для перевозчика и обеспечить регулярное транспортное обслуживание для жителей, длина маршрута при этом была увеличена на километр, что не сказалось существенно на увеличение времени в пути.

В этом случае изменение трассировки маршрута №345 на километр может удовлетворить потребности общественного транспорта нового района. При этом возможно создание новой сети остановок, с максимальным расстоянием до жилого дома в 460 метров, что обеспечит удобный доступ к транспорту. Среднее расстояние в пути для жителя района, согласно расчётам, может быть на 31% больше

рационального варианта, рассчитанного с помощью программного обеспечения. Вариант предполагаемого маршрута демонстрирует рис. 3. Такой подход упростит контроль за работой маршрута, снизит расходы на контроль и обслуживание транспорта, а также позволит обеспечить более рациональные интервалы движения, что позитивно скажется на экономической эффективности обслуживания.

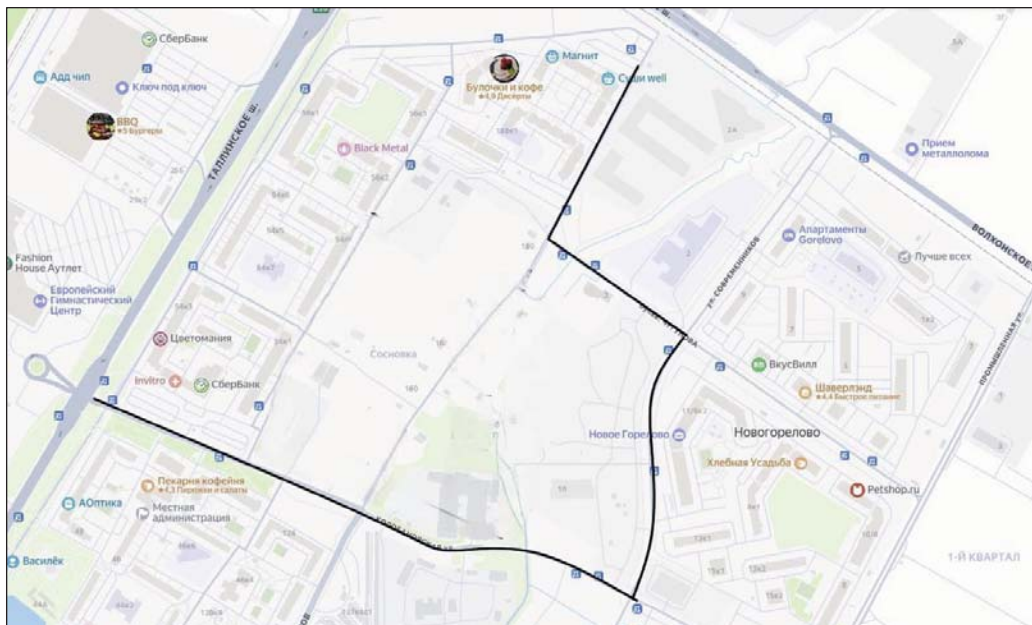


Рис. 3. Возможный вариант трассировки автобуса с заездом в новые районы

Одним из преимуществ городских маршрутов является оснащение современными системами оплаты, контроля за маршрутом и пассажиропотоками, включая валидаторы для оплаты картами всех категорий граждан. В отличие от коммерческих маршрутов, которые зачастую экономят на современных средствах телекоммуникации и оплате, что снижает удобство использования и затрудняет отслеживание пассажиропотока и транспортных средств на маршруте

Также можно выделить 651 маршрут, изображённый на рис. 4, остановки которого наилучшим образом покрывают район в данный момент, фактически совпадая с рациональными решениями, полученными при помощи программы AnyLogicstix.

Пример 651 автобуса показывает, что есть возможность охватить весь район, наиболее рационально обеспечив остановками в шаговой доступности для всех жителей.

Меньшее дублирование маршрутов автобусных перевозок позволит обслуживать больший пассажиропоток и, как следствие, сократить интервалы движения. В настоящее время интервалы, особенно в непиковые часы, достаточно велики, достигая 30 минут, что не соответствует потребностям населения, учитывая плотность застройки района. Сейчас маршруты принадлежат разным организациям и не скоординированы между собой.

Основное преимущество единого маршрутного обслуживания района заключается в упрощении обработки данных и аналитики. Это позволит эффективнее отслеживать пассажиропоток и время в пути, применяя современное оборудование и телекоммуникационные системы, более точно прогнозировать и оптимизировать транспортные потоки. Для более комплексной оценки качества сервиса могут также использоваться опросы пассажиров, которые отражают их мнение о комфорте и удобстве пользования пассажирским транспортом.

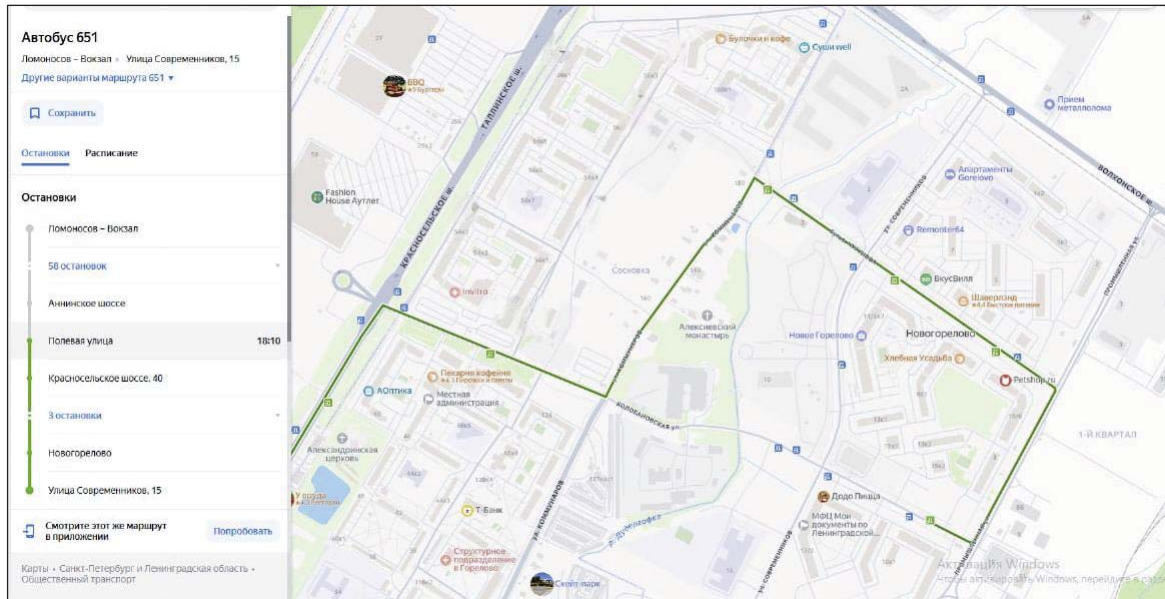


Рис. 4. Трассировка 651 маршрута

Основным преимуществом в организации вместо трех маршрутов одного является возможность экономии на выпуске транспортных средств на линию. Более скоординированное управление позволит сократить количество транспортных средств на линии, при этом обеспечить равномерные интервалы движения, с возможностью более гибко реагировать на изменения пассажиропотока, а также значительно снизить затраты на обслуживание.

Анализ карт и данных о времени в пути по маршруту позволяет выделить участки с потенциальными проблемами и определить необходимость повышения скорости движения. Например, в данном случае, благодаря выполненным исследованиям легко можно выявить необходимость увеличения скорости движения маршрута на участке Колобановской улицы, наиболее проблемный участок, которой изображен на рис. 5.

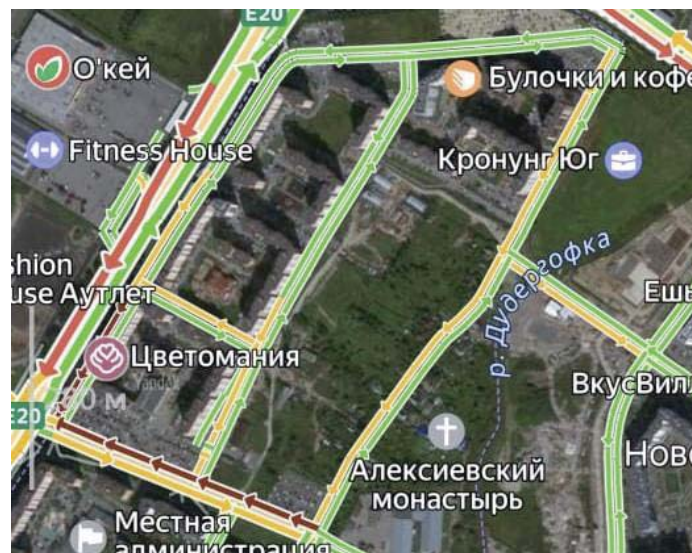


Рис. 5. Транспортная ситуация в пиковый период

В качестве меры по решению транспортных проблем на участке Колобановской улицы рассматривается ее расширение. Однако, учитывая текущие планы по городской застройке в этом районе, существует риск, что расширение не приведет к

существенному увеличению пропускной способности. Альтернативным решением может стать организация выделенных полос для общественного транспорта на данном участке. Это позволит сократить время в пути для общественного транспорта, повысить его эффективность и, как следствие, улучшить общую ситуацию с повышенной плотностью на участке. В итоге, выделенные полосы могут оказаться более эффективным решением, чем просто расширение дороги, особенно в условиях ограниченного пространства и планируемого роста транспортного потока.

Обзор литературы

Современные исследования активно занимаются рационализацией дорожного движения, с фокусом на общественный транспорт. Широкое распространение получили методы оценки использования общественного транспорта, включающие анкетирование пассажиров и обработку данных с помощью телекоммуникационных интеллектуальных информационных систем.

Например, работа Ярмомедова И.В. подчеркивает важность социальных оценок в транспортной сфере [5], а многочисленные исследования, такие как работы Г. Джитендры и Е. Бухураса, применяют многокритериальную оценку, основанную на опросах для определения удовлетворённости жителей городов различными видами транспорта и перевозчиками [6, 7]. Исследования Я. Матер-Ламаса и Келер К. делают акцент на использовании данных телекоммуникационных информационных систем, которые обрабатывают данные пассажиропотоков и позволяют оказывать влияния на текущую работу пассажирского транспорта при помощи телекоммуникационных и интеллектуальных систем [8, 9].

Однако для достижения наиболее точной и комплексной оценки пассажиропотока необходимо сочетать все методы, фокусируясь на фундаментальных показателях. Это включает оценку времени в пути, учитывая время подхода к остановке и ожидания транспорта, а также доступность транспорта, что включает расстояния до объектов общественного транспорта и соответствие их текущему пассажиропотоку.

В некоторых работах посвящённых транспорту, показание телекоммуникативных систем является основополагающим, авторы приходят к выводу, что богатые районы меньше пользуются общественным транспортом, вместо того чтобы искать недостатки в обслуживании. В работе Р. Вучика делается важный вывод о том, что современная система пассажирского транспорта в мегаполисе должна быть конкурентоспособной по скорости передвижения с личным автомобилем, сохраняя при этом удобство и комфорт для жителей [10].

Предложенная в исследовании методика развивает подходы, описанные в работах Ярмомедова И.В. и Р. Вучика, добавляя к социальным аспектам транспортного планирования точные математические методы и инструменты имитационного моделирования.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует эффективность применения комплексного подхода к планированию транспортной системы быстрорастущих городов. Использование современных инструментов имитационного моделирования, таких как AnyLogistix и Vissim, в сочетании с методами анализа больших данных и интеллектуальными телекоммуникационными системами, позволяет разрабатывать научно обоснованные решения для повышения эффективности пассажирских перевозок.

Методика рационализации транспортной инфраструктуры на основе формулы минимизации произведения пассажирской нагрузки и расстояний доказала свою

эффективность при планировании размещения остановочных пунктов. Благодаря применению AnyLogistix удалось найти рациональные места для расположения объектов транспорта в пешеходной доступности для населения района в границах 400-500 метров, что обеспечивает оптимальный охват населения. Полученные результаты согласуются с выводами ведущих специалистов в области транспортного планирования, подтверждающих важность минимизации времени подхода к объектам пассажирского транспорта.

Как показало исследование, существующее дублирование маршрутов более чем на 90% приводит к нерациональному использованию подвижного состава и увеличению эксплуатационных расходов. Реорганизация маршрутной сети позволяет сократить потребность в транспортных средствах на 60-70%, как это демонстрирует опыт Магнитогорска.

Дальнейшее развитие представленной методики может быть связано с интеграцией искусственного интеллекта для прогнозирования пассажиропотоков, учетом социальных и экономических аспектов транспортного планирования, а также разработкой адаптивных систем управления, способных оперативно реагировать на изменения транспортной ситуации.

Также на основе проведенного исследования возможно предложить следующие меры по рационализации транспортной системы:

- внедрение единой системы планирования маршрутов на основе имитационного моделирования;
- разработка программы поэтапного сокращения дублирования маршрутов;
- создание механизма координации работы различных перевозчиков;
- внедрение системы мониторинга пассажиропотока и передвижения общественного транспорта в реальном времени;
- рационализация расписания движения на основе данных мониторинга;
- выделение полос для движения общественного транспорта на основе данных задержек в пути.

Внедрение предложенных решений позволит создать сбалансированную транспортную систему, способную эффективно обслуживать растущие потребности населения.

Литература

1. **А.А. Поляков.** Городское движение и планировка улиц: Государственное издательство по строительству и архитектуре. 1953. С.45-50.
2. **Э.А. Сафронов.** Транспортные системы городов и регионов: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2005. С.173-187.
3. **Цибулка Ян.** Качество пассажирских перевозок в городах: Издательский центр «Транспорт». 1987. С.38-43
4. **Цариков А.А.** Организация маршрутов городского пассажирского транспорта с учетом бесплатных пересадок / А. А. Цариков, В. Г. Бондаренко, М. С. Пятанов // Инновационный транспорт. 2020. № 2(36). С. 18-26. DOI 10.20291/2311-164X-2020-2-18-26. – EDN SXADHI.
5. **Ярмомедов И.В.** Методики оценки эффективности проектов транспортной инфраструктуры: сравнительный анализ / И. В. Ярмомедов, А. Х. Цакаев // Экономическая безопасность. 2024. Т.7, № 9. С.2383-2402. DOI 10.18334/ecsec.7.9.121795.
6. **Jitendra Gurjar, P.K. Agarwal, P.K. Jain.** A Comprehensive Methodology for Comparative Performance Evaluation of Public Transport Systems in Urban Areas,

- Transportation Research Procedia, Volume 48, 2020, Pages 3508-3531, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.100>.
7. **Bouhouras E.; Basbas S.; Mintsis G.; Taxiltaris C.; Miltiadou M.; Nikiforiadis A.; Konstantinidou M.N.; Mavropoulou E.** Level of Satisfaction among University Students Using Various Transport Modes. Sustainability 2022, 14, 4001. <https://doi.org/10.3390/su14074001>.
 8. **Montero-Lamas Y.; Orro A.; Novales M.; Varela-García F.-A.** Analysis of the relationship between the characteristics of the areas of influence of bus stops and the decrease in ridership during COVID-19 lockdowns. Sustainability 2022, 14, 4248. <https://doi.org/10.3390/su14074248>.
 9. **Keller C.; Glück, F.; Gerlach C.F.; Schlegel T.** Investigating the Potential of Data Science Methods for Sustainable Public Transport. Sustainability. 2022, 14, 4211. <https://doi.org/10.3390/su14074211>.
 10. **Вукан Р. Вучик.** Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина под научным ред. М. Блинкина : Территория будущего; Москва; 2011 с. 405-409.