

УДК 656.11:625.7

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-48-54

ИНФРАСТРУКТУРНАЯ ПРИОРИТЕТИЗАЦИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА КАК ПАТТЕРН МИНИМИЗАЦИИ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

**А.В. КОРЖОВА¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ², д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ^{1,3},
О.А. СОНИЧ¹, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ¹**

**(¹Белорусский национальный технический университет (БНТУ),
филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»,
Научно-исследовательский и испытательный центр транспортных средств, Минск;**

²Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;

³Министерство образования Республики Беларусь, Минск)

Статья посвящена проблеме повышения качества функционирования маршрутного пассажирского транспорта в условиях дефицита пропускной способности улично-дорожной сети. На основе методологии квалитметрии дорожного движения и теории потерь реализован топографический аудит аварийности и анализ гидродинамических параметров транспортных потоков на магистральной сети Фрунзенского района г. Минска. Синтезирован комплекс инженерных решений, включающий геометрическое канализирование узлов, организацию обособленных полос и адаптацию алгоритмов светофорного регулирования. Экономическая целесообразность предложенной концепции верифицирована расчетом сокращения транспортных задержек и экологической эмиссии, подтверждающим высокую инвестиционную рентабельность инфраструктурных модификаций.

Ключевые слова: маршрутный пассажирский транспорт, обособленная полоса, организация дорожного движения, теория потерь, транспортная задержка, экологический ущерб, квалитметрия дорожного движения, пропускная способность, геометрическое канализирование.

Введение. Современный вектор развития крупных урбанизированных агломераций детерминирует объективную необходимость концептуальной трансформации транспортной политики: от безусловного обеспечения мобильности индивидуального автотранспорта к парадигме устойчивой городской мобильности [1–3]. Базисом данной парадигмы выступает обеспечение приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта (МПТ) [2; 3]. В условиях нарастающего дефицита пропускной способности улично-дорожной сети (УДС) перманентный рост парка индивидуальных транспортных средств генерирует комплекс взаимосвязанных отрицательных экстерналий: экспоненциально снижается эксплуатационная скорость движения МПТ, нарушается регулярность циклов обслуживания, деградирует качество предоставления транспортных услуг, что в конечном итоге провоцирует дальнейший отток пассажиров в сегмент использования личных автомобилей [4–9]. Подобная циклическая регрессия мультиплицирует экологический ущерб, транспортные задержки (как для автомобилистов, так и для пассажиров) и вероятностный уровень дорожно-транспортного травматизма [4; 9–11].

Репрезентативным научно-практическим подходом к разрешению данного конфликта интересов в транспортном пространстве является методология квалитметрии дорожного движения и системной минимизации социально-экономических потерь [9–11]. Базовый постулат данной методологии гласит, что оценка эффективности любого инженерно-планировочного решения должна осуществляться исключительно посредством математического моделирования и перевода в монетарный эквивалент совокупного интегрального ущерба (состоящего из аварийного, экономического и экологического компонентов) [10; 11]. Пространственный реинжиниринг, сфокусированный на защите МПТ от флуктуаций транзитных потоков и канализировании конфликтных узлов, позволяет радикально снизить непроизводительные потери в масштабах экономики города.

Целью настоящего исследования является комплексная диагностика гидродинамических и кинематических параметров функционирования магистральной улицы районного значения – ул. Лобанка и сопряженных с ней артерий (ул. Одинцова, ул. Мазурова, ул. Горького, ул. Шаранговича) во Фрунзенском районе г. Минска, а также разработка научно обоснованных градостроительных паттернов приоритизации МПТ при минимизации совокупных видов дорожных потерь.

Основная часть. Анализ статистики дорожно-транспортных происшествий (ДТП) выполняет функцию базового индикатора структурно-функциональных дефектов УДС. В рамках представленного исследования реализованы статистический и топографический аудиты аварийности на обозначенном полигоне, базирующиеся на верифицированных массивах данных ОГАИ за репрезентативный период 2022–2025 гг.

За исследуемый период на рассматриваемых участках сети зафиксировано 208 инцидентов. Выявлено 5 учетных ДТП с пострадавшими (5 раненых); происшествий с летальным исходом не зарегистрировано. Абсолютное большинство (203 случая, или 97,6%) составили инциденты, квалифицируемые как ДТП с материальным ущербом. Данный факт свидетельствует о наличии хронических конфликтов в узловых зонах, не приводящих к фатальным последствиям исключительно за счет высокой плотности потока и, как следствие, низких скоростей в моменты столкновений.

Квантитативный анализ сезонного распределения обнаружил жесткую корреляцию аварийности с осенне-зимним климатическим периодом. Суммарно на зимний (67 ДТП; 32,2%) и осенний (64 ДТП; 30,7%) сезоны приходится 63% всех происшествий. Локальные экстремумы зарегистрированы в октябре (26 ДТП), январе

(25 ДТП) и феврале (24 ДТП). Выявленная динамика имеет научное обоснование, связанное с деградацией трибологических (фрикционных) характеристик дорожного покрытия, ухудшением оптической прозрачности атмосферы и сокращением периода естественной инсоляции [12; 13].

Внутринедельная аппроксимация фиксирует локальные максимумы энтропии системы по понедельникам (14,7%) и пятницам (18,0%). Анализ суточного профиля распределения эксплицитно демонстрирует бимодальный характер с пиковыми значениями, синхронизированными с фазами маятниковой трудовой миграции: утренним (08:00–09:00) и пролонгированным вечерним (17:00–19:00) максимумами.

В видовой структуре ДТП доминирующей категорией выступают попутные столкновения (110 эпизодов; 52,88%) и столкновения, классифицируемые как наезд сзади (28 эпизодов; 13,46%). Угловые столкновения на перекрестках представлены 17 инцидентами. Доминирование продольных (попутных) инцидентов является имманентным паттерном для перегруженных многополосных магистралей, не имеющих жесткого геометрического канализирования маневров и физического расщепления фаз светофорного регулирования [9–14]. Перманентные латеральные перестроения, инициируемые наличием припаркованных в крайнем правом ряду транспортных средств, а также стохастические замедления перед заторовыми зонами генерируют высокую дисперсию скоростного режима.

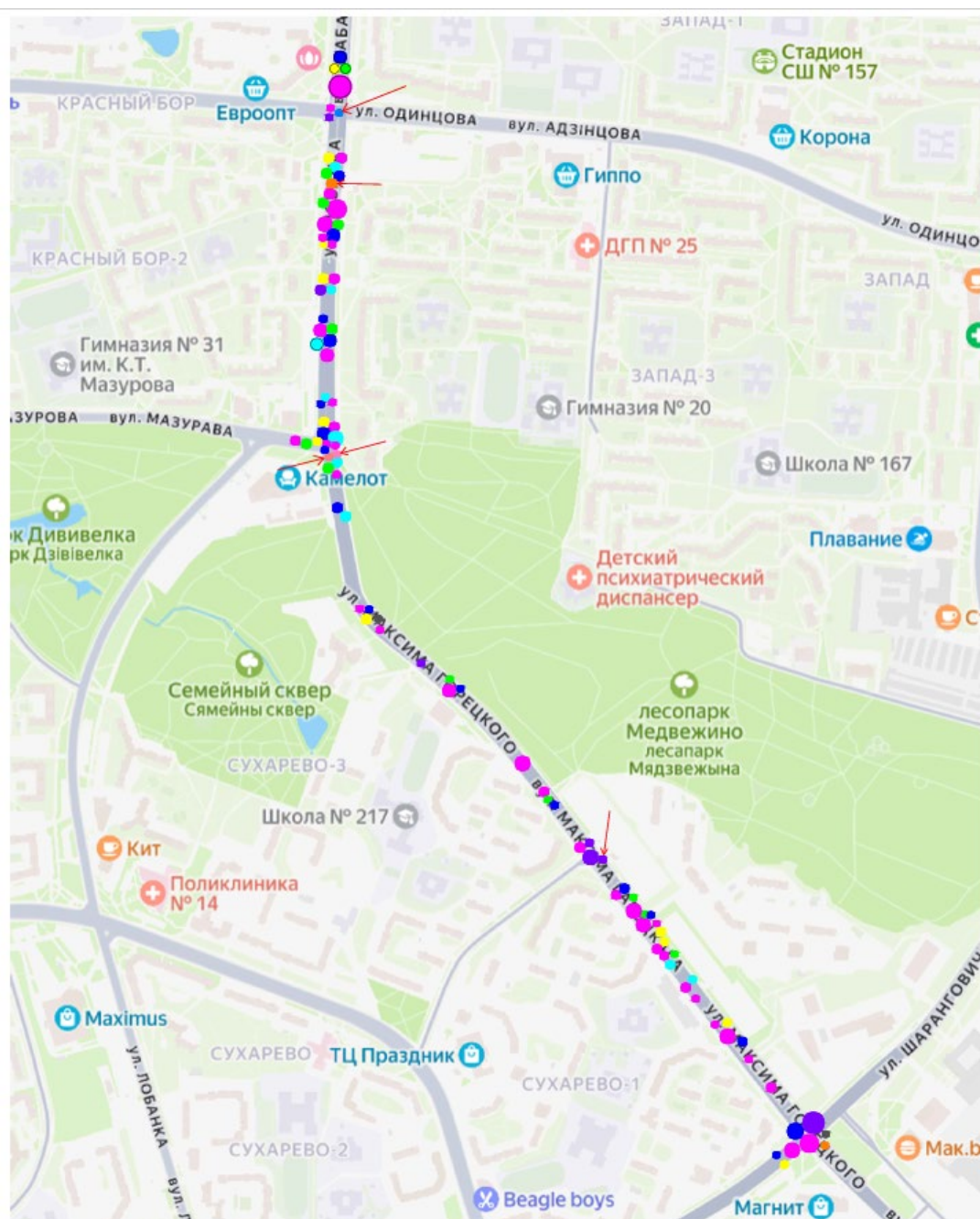


Рисунок 1. – Топографический анализ аварийности

Пространственная привязка событий (топографический анализ, см. рисунок 1) верифицировала гипотезу о том, что подавляющее большинство инцидентов (84,62%) локализуется в зонах пересечений в одном уровне. Главными очагами признаны узлы: ул. Лобанка – ул. Одинцова (очаг интерференции транзитных и локальных потоков у домов № 22 и № 19), ул. Шаранговича – ул. Горького, а также сопряжения с ул. Мазурова и ул. Чайлытко.

Для инструментальной верификации имитационной модели осуществлен комплекс натурных микроскопических измерений кинематических характеристик транспортных и пешеходных потоков с использованием программно-аппаратного комплекса *RTF-Road traffic flows*¹ (примеры картограмм представлены на рисунках 2 и 3). Измерительная дискретность устанавливалась кратной 10 световорным циклам в различные суточные фазы.

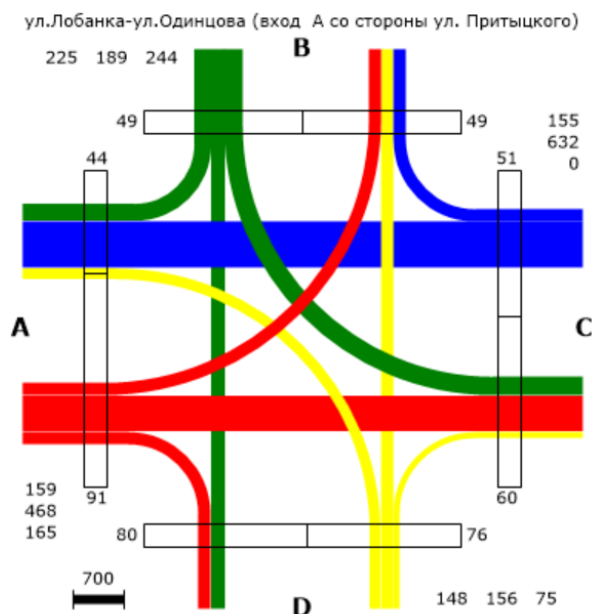


Рисунок 2. – Картограмма интенсивности движения на пересечении ул. Лобанка – ул. Одинцова

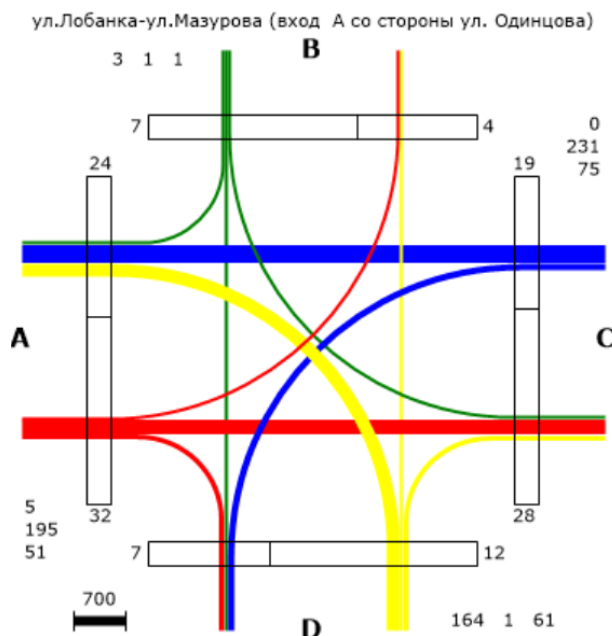


Рисунок 3. – Картограмма интенсивности движения на пересечении ул. Лобанка – ул. Мазурова

¹ RTF-Road traffic flows: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 222 / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, В.Н. Кузьменко и др. – Нац. центр интеллектуальной собственности, 2010.

Особое внимание в архитектуре исследования уделено мониторингу скорости профильных объектов МПТ (троллейбуса маршрута № 25 и автобуса № 140). Расчетный модуль выявил, что среднестатистическая скорость подвижного состава флуктуирует в критически широком коридоре – от 13,48 км/ч до 22,14 км/ч (рисунки 4). Аналитически зафиксированы аномально высокие значения коэффициента вариации распределения скоростей ($Iv \approx 0,72...1,00$), что характеризует движение потока как высокотурбулентное и непредсказуемое.

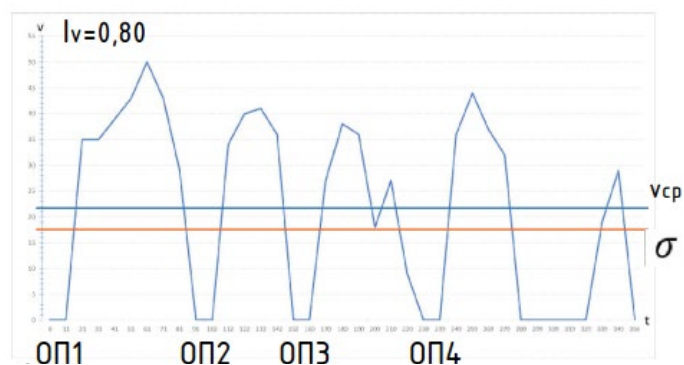


Рисунок 4. – Фрагмент измерения скорости движения методом «плавающего (в потоке) автомобиля»

Девиация и высокая дисперсия кинематики МПТ детерминируются следующими инфраструктурными дисфункциями:

1. Вынужденное броуновское маневрирование автобусов и троллейбусов в конгломерате плотного транзитного потока ввиду отсутствия обособленной (выделенной) полосы.
2. Динамическое замедление у линейных остановочных пунктов, лишенных изолированных заездных карманов (осуществление высадки/посадки сопряжено с перманентной блокировкой крайнего правого транзитного створа).
3. Тотальная запаркованность крайних правых полос на перегонных участках индивидуальным легковым транспортом.
4. Отсутствие аппаратного приоритета МПТ в структуре фазовых переходов светофорных контроллеров.

Комплексная квалиметрическая оценка функционального состояния рассматриваемых сегментов УДС выполнялась посредством монетизации физических потерь по запатентованным методикам. Экономические издержки ($P_{экон}$) рассчитывались как аддитивная функциональная зависимость от времени задержек транспортных средств (P_d), избыточных циклов остановки-разгона перед светофорными объектами (P_o) и задержек пешеходных потоков (P_{dn}). Итерационный расчет удельной транспортной задержки опирался на теорию массового обслуживания с применением уравнения Вэбстера, адаптированного под вероятностный характер пуассоновского прибытия транспортных единиц. Экологические издержки ($P_{экол}$) квантифицировались через расчет эмиссии газообразных поллютантов (M_0), приведенных к оксиду углерода, и уровня акустической диссипации. В качестве объектов рецепции вредного воздействия (потребителей) выделены: участники транспортного потока, пешеходы и резиденты прилегающих жилых образований. Расчет производился с учетом поправочных коэффициентов пространственного затухания звука, наличия фасадного экранирования и дендрологической абсорбции (озеленения).

Эмпирические результаты произведенной квалиметрии обнаружили критический масштаб социально-экономических непроизводительных затрат:

- На узле интерференции «ул. Лобанка – ул. Одинцова» агрегированные экономические потери, генерируемые непроизводительным простаиванием экономически активного населения в транспортных заторах, оцениваются в 1 426,1 тыс. у.е./год, тогда как экологический ущерб составляет порядка 500,0 тыс. у.е./год.
- На пересечении «ул. Шаранговича – ул. Горького» экономические издержки зафиксированы на уровне 1 300,7 тыс. у.е./год, экологические потери – 274,0 тыс. у.е./год.

Математический аппарат доказывает, что при достижении коэффициента загрузки полосы (фазы) значений, близких к порогу насыщения ($X > 0,85$), формируются нелинейно возрастающие скопления транспортных средств. На указанных участках частота циклов «торможение–ожидание–разгон» кратно увеличивала расход углеводородного топлива, выводя эмиссионные характеристики (по оксиду углерода, формальдегиду и акролеину) за пределы санитарно-гигиенических регламентов.

Синтез проектных решений. Для системного выявленных структурных дисфункций разработан инженерный алгоритм, методологическим стержнем которого выступает сегрегация транзитно-целевых потоков и введение жесткого инфраструктурного приоритета МПТ. Фундаментальным научным требованием здесь выступает принцип синергии: геометрическая трансформация узлов императивно обуславливает потребность

перерасчета пропускной способности (величин потоков насыщения, qH и перераспределения долей эффективного разрешающего сигнала (λ) в архитектуре светофорных циклов.

Империческая реаллокация пространства: выделенные полосы МПТ. Разработан протокол обособления полосы для маршрутного транспорта (обозначение линейной разметкой 1.23 «А» и комплексом знаков 5.9.1) на протяжении базисного полигона «ул. Лобанка – ул. Горького» в соответствии с действующими нормативами и рекомендациями (рисунок 5)²[15]. Пространственно-планировочный резерв для данной реаллокации образуется за счет интеграции двух факторов:

- радикальной элиминации стохастического паркования в первой полосе посредством установки предписывающих знаков 3.27 «Остановка запрещена» (перенос статической нагрузки на смежные межквартальные проезды);
- внедрения переразметки в створах приближения к узлам (где существующая ширина профиля позволяет осуществить переформатирование с 6 на 7 полос без масштабного сноса бортового камня).



Рисунок 5. – Фрагмент размещения выделенной полосы для МПТ

Модернизация топологии узла «ул. Лобанка – ул. Одинцова»

- деструкция (демаркировка) неактуальных геометрических параметров и перепланировка остановочных карманов с обеспечением плавных кривых заезда сочлененного подвижного состава МПТ;
- метрический пересмотр длительности фаз и матрицы пофазного разъезда с целью компенсации издержек, которые несет индивидуальный транспорт вследствие изъятия правой полосы под МПТ. Внедрение знаков направления движения по полосам (5.10.3).

Реконструктивный паттерн узла «ул. Лобанка – ул. Мазурова»

- интеграция направляющих островков безопасности физического типа (в бордюрном камне) на входах С и D для кинематического разделения конфликтующих векторов движения и формирования буферных зон пешеходного трафика;
- пространственное смещение островка на входе А к геометрическому центру пересечения с синхронным добавлением консольных стоек для установки светофорных секций Т.1.л;
- алгоритмическая изоляция левого поворота: формирование бесконфликтной защищенной фазы для блокирования фронтально-попутных инцидентов (маркировка линиями 1.1 и 1.18.2).

Топологическая трансформация «ул. Шаранговича – ул. Горького» Сложная многолучевая топология перекрестка с 5-фазным циклом (длительность цикла $T_c = 90$ с генерировала чрезмерный экологический ущерб из-за задержек.

Развертывание симметричной системы треугольных направляющих островков на всех входах, обеспечивающих принудительное канализирование правоповоротных потоков без въезда в центральную зону узла. Расширение входов для обособления маневров МПТ в отдельных каналах, минимизирующее помехи со стороны индивидуального автотранспорта.

Технико-экономическая верификация инфраструктурных интервенций. Ожидаемое улучшение макропараметров моделировалось через пересчет коэффициентов аварийной конфликтности. Формирование выделенных полос МПТ (как инструмента подавления турбулентности) и физическое канализирование маневров, согласно калибровочным таблицам теории потерь, способно снизить количество пересечений траекторий и общую аварийность на сложных узлах на 40–50%. Инфраструктурный проект покрывает собственные затраты всего за 4 месяца эксплуатации (в таблице приведен пример расчета для одного объекта).

² Технические средства организации дорожного движения. Правила применения: СТБ 1300-2024. – Взамен 1300-2014; введ. 01.04.2025. – Минск: Госстандарт, 2024. – 124 с.

Таблица. – Потери на пересечении ул. Шарановича – ул. Горецкого

Показатель	Индекс	Размерность	Значение	Сумма
Потери экономические при сущ. ОДД	$P_{экон1}$	у.е./год	1300759,3	1574776,9
Потери экологические при сущ. ОДД	$P_{экол1}$	у.е./год	274017,6	
Потери экономические при предл. ОДД	$P_{экон2}$	у.е./год	1193952,1	1394692,7
Потери экологические при предл. ОДД	$P_{экол1}$	у.е./год	200740,6	

Заключение. Внедрение квалиметрического математического аппарата и инструментария теории потерь при аудите функционирования улично-дорожной сети доказывает, что системный кризис пропускной способности современных мегаполисов подлежит разрешению не путем безграничного расширения дорожного полотна, а посредством прецизионного инженерного реинжиниринга и алгоритмизации.

Представленное исследование, базирующееся на данных магистралей Фрунзенского района г. Минска, научно доказывает уязвимость гетерогенных потоков. Интеграция большегрузного и маршрутного пассажирского транспорта в плотный индивидуальный поток легковых автомобилей обуславливает критический рост дисперсии скоростей (I_v в диапазоне 0,72–1,00). Подобная кинематическая энтропия является главным генератором попутных столкновений, а также инициатором аномальных объемов акустической и газовой эмиссии из-за перенасыщения участков циклами “stop-and-go”.

Доказано, что главным фактором высвобождения резервов эффективности УДС и минимизации издержек, выражающихся в огромных потерях экономически активного фонда времени населения, выступает пространственная приоритизация МПТ. Реаллокация геометрического ресурса – ликвидация стохастической прибордюрной запаркованности с введением выделенных полос МПТ – выводит маршрутный транспорт в режим ламинарного течения. Одновременное введение направляющих физических островков на перекрестках с пересчетом матриц светофорного управления экранирует транзитный поток от право- и левоповоротных конфликтов.

Верификация макроэкономического эффекта зафиксировала высокую результативность предложенных инфраструктурных мер. Минимизация капитальных вложений, достигаемая использованием существующих габаритов дороги за счет грамотного нанесения линий разметки и установки средств ОДД, приводит к тому, что инвестиции окупаются в сроки от 11 суток до 3 лет. Подобные показатели эффективности формируют убедительную доказательную базу для повсеместного перехода к концепции устойчивой, экологичной и алгоритмизированной транспортной среды, в которой абсолютный приоритет отдан массовому маршрутному перемещению пассажиров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устойчивые транспортные системы городов: учеб. / Д.В. Капский, А.О. Лобашов, И.Н. Пугачев и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 128 с.
2. Маршрутный транспорт городов Полоцка и Новополоцка: эффективность и тенденции развития / Д.В. Капский, В.П. Иванов, Т.В. Вигерина и др. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2021. – 306 с.
3. Новая парадигма разработки проектных документов развития транспортных систем для городов разной крупности или многодесятилетнее выстраивание стадийности решения проблем развития и организации функционирования ТСГ (дискуссия № 6) / С.А. Ваксман, Ф.Г. Глик, П.В. Зюзин [и др.] // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XXV Междунар. (двадцать восьмой Екатеринбургской) науч.-практ. конф. / Екатеринбург (16–17 июня 2019 г.). – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2019. – Т. 1. – С. 18–47.
4. Ярошевич В.К., Седюкевич В.Н., Капский Д.В. Оценка экологических потерь при организации автомобильных перевозок // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2006. – № 5. – С. 61–62.
5. Kapski D., Semchenkov S., Khmel'nitskaya L. Measures to Improve the Operation of Passenger Transport and Urban Mobility // Komunikacie. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – P. A14–A25. DOI: 10.26552/com.c.2023.007
6. Identification of key route indicators to compare different modes of transport / D. Kapski, S. Semchenkov, M. Korolchuk et al. // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 03017. DOI: 10.1051/bioconf/202414503017
7. Изменение параметров городской транспортной системы при введении платы с владельцев автомобилей за использование улично-дорожной сети и варьировании стоимости проезда в общественном транспорте / Д.А. Захаров, Е.М. Чикишев, Д.В. Капский и др. // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 336–344. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344
8. Eco-efficient and environmentally sustainable prioritization of urban passenger transport movement / S.V. Skirkovsky, D.V. Kapski, B. Sattivaldiyev et al. // E3S Web of Conferences. – 2025. – Vol. 646. – P. 00051. DOI: 10.1051/e3sconf/202564600051
9. Капский, Д. В. Методологические основы создания системы повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности в Республике Беларусь / Д. В. Капский // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2009. – № 6. – С. 81–88. – EDN WXONBB.
10. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
11. Капский Д.В. Методология повышения качества дорожного движения. – Минск: БНТУ, 2018. – 370 с.
12. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
13. Капский Д.В. Организация дорожного движения. Аварийность: анализ, оценка, прогнозирование: учеб.-метод. пособие. – Минск: БНТУ, 2023. – 439 с.
14. Ibrayev K., Kapskiy D., Bogdanovic S. Ways to Improve Road Safety Audit in the Republic of Kazakhstan // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, No. 1. – P. 45–51. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-1-45-51

15. Кот Е.Н., Капский Д.В., Коржова А.В. Технические средства организации дорожного движения. – Минск: БНТУ, 2016. – 239 с.

Поступила 02.07.2026

**INFRASTRUCTURE PRIORITIZATION OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT
AS A PATTERN FOR MINIMIZING MACROECONOMIC LOSSES**

A. KORZHOVA¹, V. IVANOV², A. BAKHANOVICH^{1,3}, O. SONICH¹, D. MOZALEVSKY¹

(¹Belarusian National Technical University (BNTU),

BNTU Branch “Research Polytechnic Institute”,

Research and Testing Center for Vehicles, Minsk;

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

³Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)

This article examines the issue of improving the performance of public transport in the context of limited road network capacity. Using traffic qualimetry and loss theory, a topographic accident audit and analysis of the hydrodynamic parameters of traffic flows on the main road network of the Frunzensky District of Minsk were conducted. A set of engineering solutions was synthesized, including geometric channelization of nodes, the organization of dedicated lanes, and the adaptation of traffic light control algorithms. The economic feasibility of the proposed concept was verified by calculating the reduction in traffic delays and environmental emissions, confirming the high investment return on infrastructure modifications.

Keywords: *public transport, dedicated lane, traffic management, loss theory, traffic delay, environmental damage, traffic qualimetry, capacity, geometric channelization.*