

УДК 656.13.05

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-95-99

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПРИОРИТЕТА МАРШРУТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ
В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**

ЛЮ ЮЙВЭЙ*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Целью исследования является совершенствование метода обеспечения пространственно-временного приоритета маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС) на регулируемых перекрестках путем разработки геометрического условия работоспособности приоритетной полосы и научного обоснования границ устойчивости метода к неоднородности транспортного потока. Методами кинематического анализа, имитационного моделирования в среде VISSIM и логистической регрессии получены аналитическое условие безблокировочного проезда шлюзового накопителя и критическая доля посторонних транспортных средств, определяющая границу практической эффективности метода. Установлено, что устройство выделенной полосы снижает максимальную задержку МПТС на 44,5% при однородном потоке, однако критическая доля посторонних транспортных средств, разрушающая данный эффект, составляет лишь $p^ \approx 7,1-7,16\%$, что значительно ниже границ устойчивости по показателям провозной способности и геометрической емкости полосы.*

Ключевые слова: маршрутные пассажирские транспортные средства, пространственно-временной приоритет, шлюзовый накопитель, регулируемый перекресток, кинематическое условие, критическая доля, логистическая модель, имитационное моделирование, надежность расписания, электромобили.

Введение. Наибольшие эксплуатационные задержки маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС) возникают на регулируемых перекрестках, где, как правило, автобусы и троллейбусы сталкиваются с проблемой блокировки вследствие правоповоротного движения индивидуального транспорта [1; 2]. Метод пространственно-временного приоритета, основанный на создании обособленного участка проезда МПТС непосредственно перед перекрестком, впервые разработан и научно обоснован Р.М. Зубачиком: устройство выделенной полосы в сочетании с адаптивным светофорным регулированием обеспечивает снижение максимальных задержек МПТС практически в два раза при однородном составе приоритетного потока¹.

Вместе с тем геометрическая концепция подобных решений сохраняет работоспособность только при абсолютном запрете движения личного, в т.ч. электрического, транспорта по специальным полосам, однако количественная граница устойчивости метода к неоднородности потока, равно как и аналитическое (а не только имитационное) условие геометрической работоспособности приоритетной полосы, в известных источниках не установлены^{1,2,3} [3–7]. Недостаток теоретической базы не позволяет научно обосновать геометрические параметры выделенных полос. Эта проблема стала особенно острой в Беларуси и Китае из-за быстрого роста числа личных электромобилей, которым законодательно разрешено выезжать на полосы для общественного транспорта.

Исследование направлено на совершенствование приоритета маршрутного транспорта (МПТС) на регулируемых перекрестках. Для этого: разработано кинематическое условие для свободного проезда транспорта через шлюзовой накопитель; аналитически вычислена предельно допустимую долю посторонних машин на полосе; сопоставлены полученные границы устойчивости с общими показателями эффективности работы перекрестка.

Следует отметить, что само по себе моделирование не объясняет главную причину сбоев: как именно длина и ширина полосы связаны с отказами алгоритмов адаптивных светофоров (АСУДД).

Без конкретных математических формул нельзя перенести готовое решение на другие улицы с иной планировкой. Кроме того, невозможно заранее спрогнозировать, в какой момент выделенная полоса перестанет справляться с работой из-за роста числа электромобилей. Поэтому необходим точный аналитический расчет, который позволит проверять и дополнять результаты компьютерного моделирования.

Основная часть. Систематизация транспортно-планировочных решений для обособленной инфраструктуры в зоне влияния регулируемых пересечений опирается на классификационный базис Р.М. Зубачика¹.

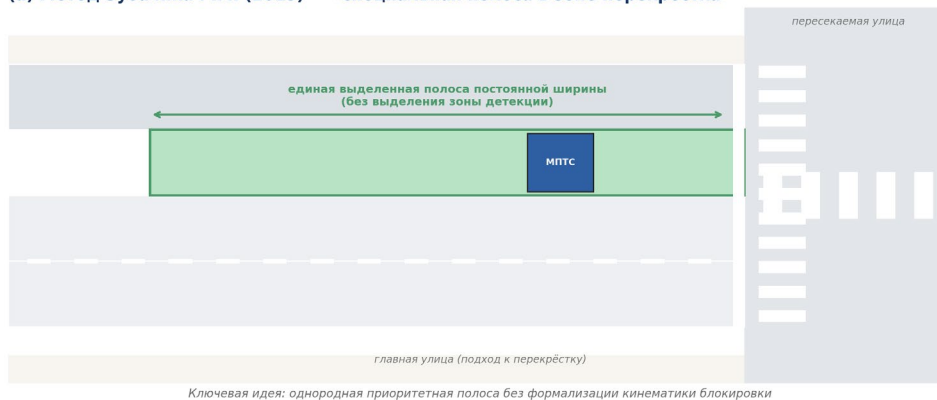
¹Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

² Highway Capacity Manual: HCM 2010 / Transportation Research Board. – Washington, DC: National Research Council, 2010. – 1650 p.

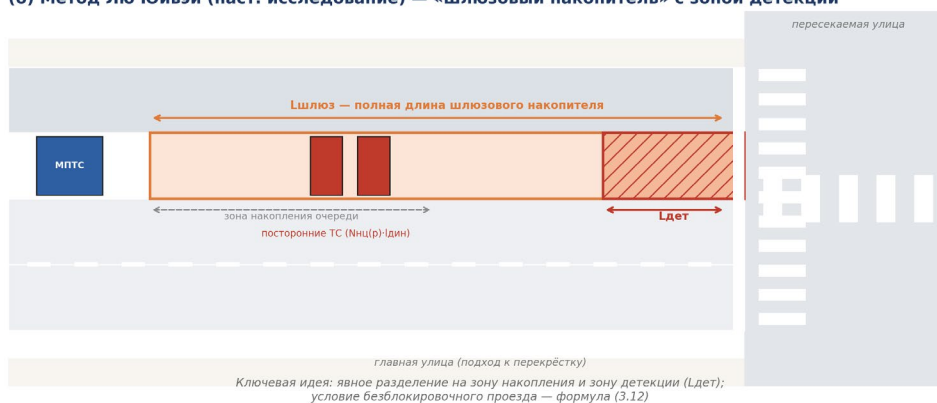
³ Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. – Köln, 2015. – 320 p.

В рамках данного подхода матрица приоритетных полос структурно дифференцируется на две макрогруппы (исходя из топологии размещения остановочных пунктов относительно стоп-линии) и шесть функциональных типов (сообразно разрешенным векторам движения транспортных потоков в узле) (рисунок 1, а).

(а) Метод Зубачика Р.М. (2015) — «специальная полоса в зоне перекрёстка»



(б) Метод Лю Юйвэй (наст. исследование) — «шлюзовый накопитель» с зоной детекции



а – однородная приоритетная полоса;

б – шлюзовый накопитель с выделенной зоной детекции

Рисунок 1. – Принципиальное отличие усовершенствованного метода «шлюзового накопителя» от метода Р.М. Зубачика⁴

Экстраполяция указанного классификатора на условия обслуживания смешанного (интегрирующего рельсовый и безрельсовый) состава маршрутных транспортных средств (МПТС) выявила важнейшую инженерную закономерность (таблица 1).

Таблица 1. – Применимость типов выделенной полосы для рельсового и безрельсового МПТС

Тип полосы	Автобус / троллейбус	Трамвай	Ограничение для рельсового транспорта
1.1	применим	ограниченно	требует совмещения с трамвайными путями
1.2	применим	применим	—
2.1	применим	применим	учет радиуса путевого закругления
2.2	применим	не применим	фиксированная колея не допускает поворота
2.3 / 2.4	применим	не применим	требуются отдельные трамвайные стрелки

Доказано, что реализация универсальных проектных мероприятий, способных гарантировать полноценный совмещенный пространственный приоритет в едином поперечном профиле как для трамвайного сообщения, так и для смешанного движения (трамвай, автобус, троллейбус и пр.), технически жизнеспособна исключительно для двух из шести теоретически возможных проектных конфигураций выделенных полос.

Основным развитием классического подхода⁴ является четкое геометрическое разграничение приоритетной полосы на две функциональные зоны: зону накопления очереди целевых МПТС и зону детектирования

⁴ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

адаптивной системы управления протяженностью $L_{\text{дет}}$ (см. рисунок 1). Введено авторское кинематическое условие безблокировочного проезда шлюзового накопителя: чтобы адаптивная система приоритета срабатывала штатно, геометрическая длина шлюза должна превышать длину очереди посторонних транспортных средств, накопившуюся за время запрещающего сигнала:

$$L_{\text{шлюз}}(p) \geq L_{\text{дет}} + p \cdot Q_{\text{сум}} \cdot t_{\text{кр}} \cdot l_{\text{дин}} / 3600, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сум}}$ – суммарная интенсивность потока на подходе, ед./ч; $t_{\text{кр}}$ – длительность запрещающего сигнала, с; $l_{\text{дин}}$ – динамический габарит одного постороннего транспортного средства в очереди, м.

Из условия (1) аналитически получена геометрическая граница устойчивости метода – критическая доля посторонних транспортных средств, при превышении которой физически разумная длина шлюза не способна сохранить резерв $L_{\text{дет}}$: $p^*_{\text{геом}} \approx 30\%$. Сопоставление с результатами имитационного моделирования показало, что данный геометрический механизм отказа не является лимитирующим: доминирующим оказывается вероятностно-детекторный механизм, при котором единичное постороннее транспортное средство, оказавшееся в узкой зоне детектирования в момент запрещающего сигнала, полностью блокирует алгоритм, даже если остальная часть шлюза свободна.

Практический смысл этого результата в том, что увеличивать длину шлюзового накопителя бесполезно. На первый взгляд, более длинная полоса поможет скомпенсировать помехи от посторонних машин, но на практике это почти не работает. Когда доля чужого транспорта приближается к критическому значению ($p \approx 7\%$), для сохранения геометрии полосы ее нужно удлинить совсем немного – с 60–65 м до 70–75 м. Однако к этому моменту главный плюс метода (сокращение времени в пути для общественного транспорта) уже полностью теряется.

Отсюда следует важный вывод: бороться с помехами нужно не строительными методами (расширением полос), а административными. Проблему решает только жесткий запрет на въезд постороннего транспорта на выделенные полосы.

Проверку геометрии полосы выполняли с помощью имитационного моделирования в среде VISSIM (с учетом методологии Highway Capacity Manual⁵ и модели очереди) на изолированном перекрестке. Эксперименты показали (таблица 2), что в идеальных условиях (когда на полосе нет нарушителей) выделенная полоса со шлюзовым накопителем снижает максимальную задержку маршрутного транспорта на 44,5%.

Таблица 2. – Сравнение параметров движения МПТС с выделенной полосой и без нее (по результатам 200 прогонов VISSIM)

Условие	Макс. длина очереди, авт.	Макс. время проезда МПТС, с	Макс. задержка МПТС, с
С выделенной полосой	33,07	105,63	48,82
Без выделенной полосы	62,26	67,55	87,98

Взамен физически некорректной линейной аппроксимации эффективности метода от доли посторонних транспортных средств предложена логистическая модель фазового перехода «приоритет → алгоритмический затор»:

$$D_{\text{свободн}}(p) = D_{\text{свободн}} \cdot (1 - P_{\text{отказа}}(p)) + D_{\text{затор}} \cdot P_{\text{отказа}}(p), \quad P_{\text{отказа}}(p) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(p-p_0)}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{свободн}} = 48,82$ с, $D_{\text{затор}} = 87,98$ с (см. таблицу 2) – физические асимптоты модели, корректно ограничивающие результат на всей области определения $p \in [0; 1]$ в отличие от линейной аппроксимации.

Калибровка по данным моделирования ($\alpha \approx 95,4$; $p_0 \approx 4,08\%$) дала критическую долю $p^* \approx 7,16\%$ (уровень отказа 95%), практически совпадающую с независимой оценкой по результатам имитационного моделирования VISSIM.

Сопоставление всех установленных критических порогов (рисунок 2) показало, что система теряет практический смысл по показателю задержки ($p^* \approx 7,1-7,16\%$) значительно раньше, чем формально нарушаются геометрическая емкость шлюза ($p^*_{\text{геом}} \approx 30\%$), стандарты регулярности расписания ($p \approx 11,5-27,7\%$, введенные на основе показателя надежности $\sigma_i(p) = \sigma_0 e^{(\delta p)}$, или номинальная провозная способность полосы ($p_{\text{кр}} \approx 55,6\%$). Следовательно, при проектировании систем контроля доступа на выделенные полосы ориентироваться следует именно на наиболее консервативный порог по показателю задержки, поскольку остальные критерии окажутся нарушенными существенно позже и не могут служить основанием для отсрочки защитных мероприятий.

На рисунке 3 показан вариант уширения для организации правоповоротного направления: новый шлюзовый накопитель на подходе к перекрестку (правоповоротный поток отделяется (возможно даже направляющим островком) до входа в зону детекции, не занимая исключительную часть полосы, отведенную для МПТС).

⁵ Highway Capacity Manual: HCM 2010 / Transportation Research Board. – Washington, DC: National Research Council, 2010. – 1650 p.

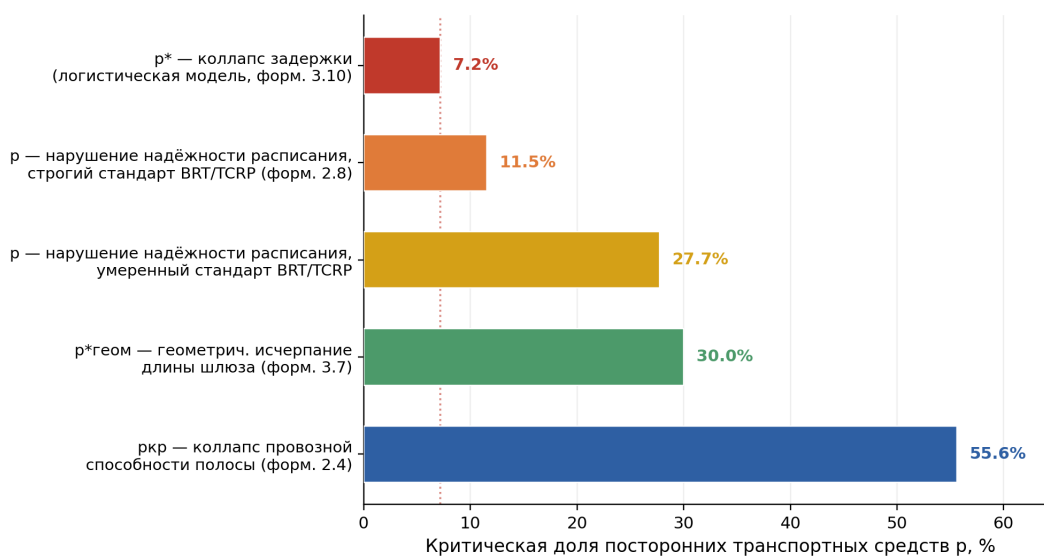


Рисунок 2. – Иерархия критических порогов устойчивости приоритета МПТС, установленных по различным критериям

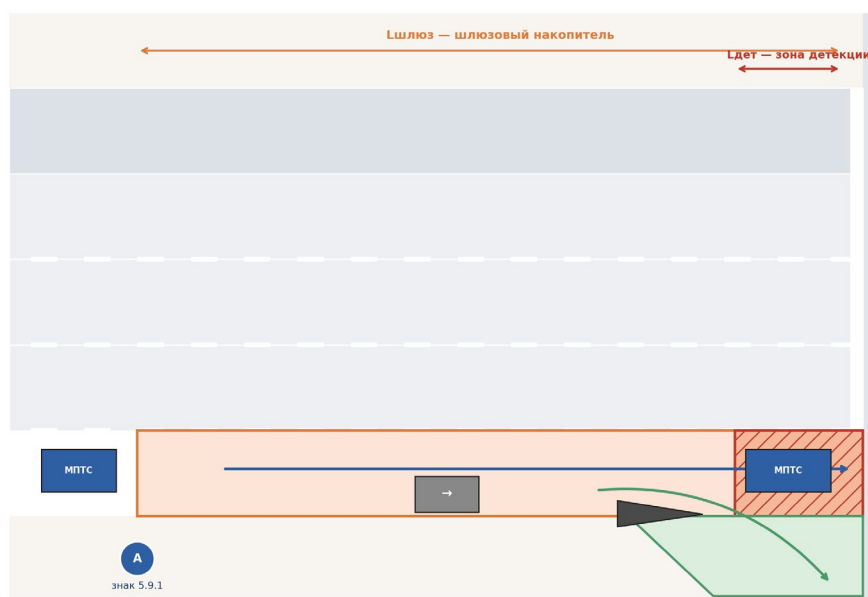


Рисунок 3. – Схема размещения шлюзового накопителя

Заключение. Развита метод пространственно-временного приоритета МПТС на регулируемых перекрестках, предложенный Р.М. Зубачиком⁶: классификация выделенных полос распространена на смешанный состав маршрутного транспорта; впервые выведено авторское кинематическое условие безблокировочного проезда шлюзового накопителя, позволившее аналитически установить геометрическую границу устойчивости метода ($p^*_{\text{геом}} \approx 30\%$); взамен линейной аппроксимации предложена логистическая модель фазового перехода, аналитически подтвердившая критическую долю посторонних транспортных средств $p^* \approx 7,1-7,16\%$, независимо согласующуюся с результатами имитационного моделирования в среде VISSIM.

Сопоставление всех установленных в исследовании критических порогов позволило сформулировать практический вывод о приоритетности показателя задержки как наиболее консервативного индикатора устойчивости метода при проектировании мероприятий по ограничению доступа посторонних транспортных средств на выде-

⁶ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

ленные полосы. Практическая значимость результатов состоит в возможности объективного проектирования геометрических параметров и алгоритмов управления шлюзовых накопителей в условиях реального, неоднородного транспортного потока, что особенно актуально для городов с растущей долей электротранспорта.

Полученные результаты дополняют выводы⁷ в части, ранее не рассматривавшейся: если метод «специальная полоса в зоне перекрестка» был научно обоснован и верифицирован применительно к однородному потоку безрельсового МПТС, то предложенное в настоящей статье развитие метода дает количественный, аналитически обоснованный ответ на вопрос об устойчивости пространственно-временного приоритета к реальной неоднородности транспортного потока, а также распространяет область применимости метода на смешанный (рельсовый и безрельсовый) состав маршрутного транспорта, что существенно расширяет практическую значимость результатов для проектирования объединенных узлов пересадки в городах со смешанной маршрутной сетью.

Направлением дальнейших исследований является распространение предложенного кинематического условия на координированные регулируемые перекрестки и уточнение параметров логистической модели расширенной серией имитационных экспериментов на объектах с различными геометрическими и режимными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лю Ю. Совершенствование метода обеспечения пространственно-временного приоритета маршрутных пассажирских транспортных средств на регулируемых перекрестках // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2026. – № 1. – С. 77–82. DOI: 10.52928/2070-1616-2026-53-1-77-82
2. Лю Ю. Исследование условий движения маршрутного пассажирского транспорта в городе Хух-Хото, КНР // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 2. – С. 50–56. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-50-2-50-56
3. Лю Ю., Саражинский Д.С., Капский Д.В. Разработка и применение алгоритмов гибкого регулирования для повышения качества движения МТС на регулируемых перекрестках // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2. – С. 42–52. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-52-2-42-52
4. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. И.И. Грушко. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
5. Verhulst, P.-F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement // Correspondance mathématique et physique. – 1838. – Vol. 10. – P. 113–121.
6. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2018. – 356 с.
7. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития: учеб. / А.О. Лобашов, Е.Н. Кот, Д.В. Капский и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 236 с.
8. Планирование устойчивой городской мобильности: учеб.-метод. пособие / А.О. Лобашов, С.С. Семченков, Е.Н. Кот и др. – Минск: БНТУ, 2022. – 180 с.

Поступила 20.07.2026

IMPROVING A METHOD FOR ENSURING SPATIAL-TEMPORAL PRIORITY FOR ROUTE PASSENGER VEHICLES AT CONTROLLED INTERSECTIONS IN HETEROGENEOUS TRAFFIC FLOW

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The aim of this study is to improve the method for ensuring spatial-temporal priority for route passenger vehicles (RPVs) at signalized intersections by developing a geometric condition for the operability of the priority lane and scientifically substantiating the method's robustness to traffic flow heterogeneity. Using kinematic analysis, simulation modeling in the VISSIM environment, and logistic regression, we obtained an analytical condition for unblocked passage through a lock storage area and a critical proportion of unrelated vehicles, which determines the practical effectiveness of the method. It was found that the use of a dedicated lane reduces the maximum delay of public transit vehicles by 44,5% under uniform conditions. However, the critical proportion of unrelated vehicles that disrupts this effect is only $p^ \approx 7,1-7,16\%$, which is significantly below the stability limits for the lane's carrying capacity and geometric capacity.*

Keywords: public transit vehicles, spatial-temporal priority, lock storage, signalized intersection, kinematic condition, critical proportion, logistic model, simulation modeling, schedule reliability, electric vehicles.

⁷ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.