

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ УРОВНЯ УДОБСТВА ДВИЖЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ГОРОДСКИХ ДОРОГАХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Клюев Роман Владимирович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия;
Московский политехнический университет, Москва, Россия

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-51-58

Косцов Алексей Валерьевич,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия;
МАДИ, Москва, Россия,
kostsov_msfs@bk.ru

Manuscript received 20 November 2024;
Accepted 12 December 2024

Мартяхин Дмитрий Сергеевич,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия;
МАДИ, Москва, Россия

Кортиев Алан Леванович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Берко Алексей Александрович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Ключевые слова: городские дороги,
улично-дорожная сеть, интеллектуальные
транспортные системы, уровень удобства
движения, проектирование дорог

Растущий спрос населения на внутригородские передвижения в условиях высокого уровня автомобилизации привел к формированию сети городских дорог скоростного движения, предназначенной для удовлетворения потребностей населения в быстрых и комфортных передвижениях по территории крупных и крупнейших городов. Рост интенсивности движения на сети городских дорог скоростного движения в значительной степени опережает темпы дорожно-мостового строительства. В этих условиях от экстенсивного роста протяженности транспортной сети инженеры перешли к применению методов улучшения условий движения и повышения эффективности эксплуатации существующей транспортной инфраструктуры. Один из основных методов повышения эффективности работы городских дорог скоростного движения является внедрение интеллектуальных транспортных систем, направленных на ограничение

доступа автомобилей на проезжую часть, что позволяет обеспечить высокий уровень удобства движения на сети городских дорог скоростного движения. Разработка мероприятий по управлению движением на въездах в сеть городских дорог скоростного движения требует совершенствования методов оценки пропускной способности и уровня удобства движения на основной проезжей части, что является основой для формирования требований к управлению работой интеллектуальных транспортных систем. В статье приведены результаты исследований, позволяющих выполнять оценку пропускной способности и уровня удобства движения на участках переплетения транспортных потоков для повышения уровня удобства движения на сети городских дорог скоростного движения, в том числе при помощи интеллектуальных транспортных систем.

Информация об авторах:

Клюев Роман Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия; Московский политехнический университет, Москва, Россия

Косцов Алексей Валерьевич, к.т.н., доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия;
доцент, "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)", Москва, Россия

Мартяхин Дмитрий Сергеевич, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия;
доцент кафедры "Изыскания и проектирование дорог" ФГБОУ ВО "МАДИ", Москва, Россия

Кортиев Алан Леванович, к.т.н., доцент кафедры начертательной геометрии и геодезии ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия

Берко Алексей Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия

Для цитирования:

Клюев Р.В., Косцов А.В., Мартяхин Д. С., Кортиев А.Л., Берко А.А. К вопросу о расчете уровня удобства движения при создании интеллектуальных транспортных систем на городских дорогах скоростного движения // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 51-58.

For citation:

R.V. Klyuev, A.V. Kostsov, D.S. Martyakhin, A.L. Kortiev, A.A. Berko, "Calculating the ease movement level with creating intelligent transport systems on high-speed urban roads," T-Comm, 2025, vol. 19, no. 1, pp. 51-58. (in Russian)

Введение

Процессы урбанизации, становление и развитие городских агломераций, повышение доли передвижений на автомобильном транспорте приводят к необходимости переосмысления транспортной политики и совершенствования исторически сложившейся транспортной инфраструктуры городов. Одним из важнейших направлений повышения качества транспортного обслуживания населения является формирование нового транспортного каркаса, предназначенного в основном для обеспечения быстрых и удобных передвижений при помощи легкового автомобиля – городских дорог скоростного движения.

Городские дороги скоростного движения, имея крайне низкую протяженность, составляющую до 5% от общей протяженности улично-дорожных сетей, обеспечивают до 30% всех передвижений автомобильным транспортом в пределах крупных и крупнейших городов [1]. Значительная концентрация транспортных потоков на сети городских дорог скоростного движения обусловлена рядом факторов: обеспечением высоких скоростей сообщения и показателей безопасности движения, комфорта и удобства передвижений. Объединение сети городских дорог скоростного движения с транспортным каркасом страны – сетей автомагистралей и скоростных автомобильных дорог позволяет обеспечивать «бесшовные» региональные и межрегиональные транспортные связи.

Крайне высокие затраты на строительство сети городских дорог скоростного движения определяют необходимость повышения эффективности использования уже сложившейся сети дорог городов. В этой связи для достижения целей разумного использования существующей городской транспортной инфраструктуры самое широкое применение должны находить инновационные технологии на транспорте – интеллектуальные транспортные системы и системы «умного города». Применение таких систем позволяет не только повысить эффективность использования сложившейся улично-дорожной сети без устройства новых дорогостоящих элементов дорожной сети, но и обеспечить повышение показателей безопасности движения – важнейшего показателя качества работы транспортной инфраструктуры.

Алгоритмы работы интеллектуальных транспортных систем и систем «умного города» основаны на принципах управления режимом движения автомобилей с учетом данных о закономерностях движения транспортных потоков. Поэтому для построения эффективных интеллектуальных транспортных систем города необходимы актуальные данные о режимах движения транспортных потоков в современных условиях, характерных для крупных и крупнейших городов Российской Федерации.

Для оценки технико-экономических показателей работы улично-дорожных сетей принято использовать показатель «уровня удобства движения» – комплексного показателя, характеризующего режим движения транспортного потока – его скорости, удобства движения, надежности работы водителя и др. На территории Российской Федерации, при организации движения транспортных потоков на магистральных городских дорогах скоростного движения используют комплексный показатель «уровня удобства движения» (УУД). Показатель «уровень удобства движения» находится в тесной взаимосвязи со скоростью движения на дороге и уровнем

загрузки дороги «z» (см. табл. 1), что позволяет использовать показатель «уровень удобства движения» для установления требований к обеспечению качества транспортного обслуживания при помощи сетей городских дорог скоростного движения.

Таблица 1

Уровни удобства движения (УУД)

Уровень удобства движения (УУД)	Показатель			Характеристика УУД
	уровень загрузки, Z	Коэффициент скорости движения K_c	Коэффициент насыщения движением ρ	
А	< 0,2	> 0,9	< 0,1	Движение одиночного автомобиля. Автомобили при движении не испытывают помех со стороны транспортного потока
Б	0,2 – 0,45	0,7 – 0,9	0,1 – 0,3	Необходимость совершения обгонов для поддержания желаемой скорости движения
В	0,45 – 0,7	0,55 – 0,7	0,3 – 0,7	Колонное движение автомобилей в режиме транспортного потока
Г	0,7 – 1,0	0 – 0,55	0,7 – 1	Затор. Возможны остановки движения транспортного потока

Показатель УУД определяется отношением интенсивности движения (q) к пропускной способности (Q) участка автомобильной дороги (1):

$$z_{\min} \leq \frac{q}{Q} \leq z_{\max} \quad (1)$$

где $z_{\min}$ – минимальное значение показателя загрузки дороги для данного УУД; $z_{\max}$ – максимальное значение показателя загрузки дороги для данного УУД.

Уровень удобства движения на городских дорогах скоростного движения во многих случаях определяется пропускной способностью и интенсивностью движения на участках переплетения транспортных потоков, поскольку на таких участках производится значительное количество смен полос движения автомобилей на ограниченной длине, что приводит к существенному снижению пропускной способности, и как следствие, снижению скорости и удобства движения [2] на значительном протяжении дороги.

Указанное обстоятельство подтверждается рядом исследований. Так, в частности, в исследовании Coifman B., Kim S. (2011) [3] представлены доказательства того, что широко используемый подход, согласно которому взаимодействие транспортных потоков осуществляется только в точках его слияния и разделения не дает адекватного описания условий движения на участках слияний, разделений и переплетений транспортных потоков на автомагистралях и городских дорогах скоростного движения. В действительности процессы слияния и переплетения транспортных потоков оказывают значительное влияние на режим движения автомобилей на больших расстояниях. В исследовании Coifman B., Kim S.

(2011) показано, что снижение пропускной способности и скоростей движения наблюдается более чем в 1,5 км от участков слияний и переплетений транспортных потоков. В исследовании Chen D., Ahn S. (2018) [4] показано, что расположенные на небольших расстояниях друг от друга участки переплетения транспортных потоков на автомагистралях и городских дорогах скоростного движения являются основными источниками заторов на дорогах. В этих и многих других исследованиях отмечается, что в основе снижения пропускной способности на участках переплетения транспортных потоков лежат процессы смены полос движения автомобилями, движущимися на съезд с основной проезжей части и автомобилями, движущимися со съезда на основную проезжую часть дороги.

К настоящему времени проведено значительное количество исследований, посвященных изучению процессов смены полос движения автомобилем, движущимся в пределах участков переплетения на городских дорогах скоростного движения. В исследовании Zheng Z. (2014) [5] представлены основные разработанные до настоящего времени модели движения автомобилей при выполнении смены полос движения. Основные модели смены полосы движения, в соответствии с данными Zheng Z. (2014), можно разделить на две основные группы: модели, направленные на изучение процесса принятия решений о смене полосы движения, и модели, направленные на качественную и количественную оценку влияния поведения водителя при смене полосы движения на режим движения транспортного потока.

В соответствии с данными исследования Srivastava A., Jin W. (2016) [6] даже один или несколько маневров смены полосы движения на городской дороге скоростного движения в условиях движения плотных транспортных потоков (в условиях УУД – «В», см. табл. 1) может привести к переходу состояния транспортного потока в УУД – «Г», что соответствует значительному снижению скоростей движения и существенному снижению эффективности работы улично-дорожных сетей в целом. Выполнение маневра смены полосы движения вблизи участка переплетения транспортных потоков снижает пропускную способность на всех полосах многополосных дорог и приводит к снижению пропускной способности всего сегмента автомагистрали.

В многочисленных исследованиях изучалось также влияние регулирования ограничения скорости и смены полосы движения на решение проблемы заторов в пределах участков переплетения транспортных потоков. В исследовании Srivastava, A., Jin, W. (2016) [6] предложено инновационное решение по улучшению условий движения на участках переплетения транспортных потоков путем регулирования скоростей движения на участке городской дороги скоростного движения. Для этого предложено использовать интегрированный контроллер, позволяющий отслеживать скоростной режим и количество маневров смены полос движения. Принцип действия контроллера основан на разработанной авторами исследования модифицированной модели передачи данных по многосекционным ячейкам (СТМ). Показания знаков переменной информации, отображающих скоростной режим на дороге, оптимизируются с использованием данных моделирования. По данным [6], предложенные методы управления режимом движения транспортных потоков апробированы и дают хорошие результаты. Также, особое внимание в

исследованиях уделено изучению выполнения смены полосы движения в условиях движения высокоавтоматизированных транспортных средств [7-9, 16-19] и оценке риска возникновения дорожно-транспортных происшествий при смене полос движения [10-15].

Особого внимания заслуживают исследования Yan Z., Yang K. (2020) [7], в которых разработаны методы распознавания намерений водителя сменить полосу движения при движении высокоавтоматизированных транспортных средств. В исследовании Xia Y., Qu Z., Sun Z., Li Z. (2021) [8] предложена модель для выявления намерений водителя по смене полосы движения (HLCIUM) для применения для условий автономного вождения. Предлагаемая модель имитирует работу человека при выполнении смены полосы движения: система помощи в выполнении маневров (ПВМ) концентрируется на окружающих транспортных средствах и соответствующим образом распознает их намерения по смене полосы движения. Система помощи ПВМ измеряет скорости окружающих транспортных средств и распознает автомобили, которые потенциально могут выполнить маневр по смене полосы движения. Внимание системы помощи ПВМ привлекается к соответствующему транспортному средству. Затем намерение по смене полосы движения идентифицируется распознавателем намерений на основе скрытой марковской модели (HMM).

В исследовании (Wu Kulcsár, Ahn Qu, 2020) [16] предложен метод информирования водителей о движении неисправного автомобиля для целей предварительной смены полосы движения. В исследовании (Xu Zhang, Cassandras Li Feng, 2020) [17] предложены алгоритмы совместного управления высокоавтоматизированных транспортных средств в зонах въездов и съездов при помощи сетей беспроводной связи. В исследовании (Nie Li, Wang Zhao, Lian Outbib, 2020) [18] предложен метод управления автомобилем при смене полос движения, основанный на определении и учете скорости движения и ускорения автомобилей, окружающих транспортное средство, выполняющее маневр перестроения.

Выполненный анализ проведенных к настоящему моменту исследований, направленных на изучение закономерностей выполнения маневров автомобилей показывает, что исследования режимов движения автомобилей при смене полос движения на участках переплетения рассматриваются в основном на микроскопическом уровне и посвящены изучению режимов движения одиночного автомобиля [19, 20], а также разработке алгоритмов помощи водителю при смене полос движения. Исследований, посвященных изучению режимов движения автомобилей на участках переплетения на мезоскопическом и макроскопическом уровне недостаточно. Анализ таких показал, что посвящены они в основном адаптации «кинематических» теорий к условиям движения на участках переплетения [21], а также рассмотрению режимов движения транспортного потока как волн, распространяющихся вдоль автомобильной дороги [6, 19].

В последнее время, с развитием новых методов сбора данных о режимах движения транспортных потоков появляются исследования, в которых для изучения движения транспортных потоков используются данные о траекториях движения автомобилей при смене полос движения [22-26], а также основанные на решениях детерминировано-стохастической модели движения транспортных потоков [27, 28].

Методы оценки пропускной способности городских дорог скоростного движения, в основе которых лежат решения детерминировано-стохастических моделей движения транспортных потоков могут быть использованы в качестве компонентов интеллектуальных транспортных систем, поскольку позволяют рассчитывать пропускную способность участков переплетения транспортных потоков на городских дорогах скоростного движения с учетом влияния не только дорожных условий, но и интенсивностей движения транспортных потоков. Определение пропускной способности участка переплетения при применении детерминировано-стохастических моделей производится с учетом как для движущихся по основной проезжей части автомобилей, так и движущихся по съездам пересечений и примыканий к основной проезжей части дороги, что позволяет повысить точность выполняемых расчетов.

Вместе с тем, для принятия решений в области проектирования автомобильных дорог, решения задач организации движения и формирования алгоритмов работы интеллектуальных транспортных систем необходимо иметь частные решения детерминировано-стохастических моделей с учетом особенностей движения транспортных потоков в крупных и крупнейших городах нашей страны. Выполненный к настоящему моменту комплекс экспериментальных исследований режимов движения транспортных потоков в современных условиях позволяет выполнять поиск частных решений детерминировано-стохастической модели движения транспортных потоков.

Цель данного исследования – нахождение частных решений детерминировано-стохастической модели движения транспортных потоков путем выполнения математического моделирования режимов движения транспортных потоков на участках переплетений городских дорог скоростного движения.

Результаты математического моделирования режимов движения транспортных потоков на участках переплетений городских дорог скоростного движения могут быть рекомендованы в качестве методической основы для разработки интеллектуальных транспортных систем, позволяющих регулировать интенсивность входящего на городскую дорогу скоростного движения транспортного потока для обеспечения заданного уровня удобства движения.

Математическое моделирование режимов движения транспортных потоков на участках переплетений городских дорог скоростного движения

В настоящем исследовании проведено математическое моделирование режимов работы участков переплетения транспортных потоков с учетом условий движения в крупных и крупнейших городах нашей страны. Исследования выполнены для наиболее распространенных случаев сопряжения проезжей части основного направления движения и съездов: однополосных переходно-скоростных полос (см. рис. 1а) и двухполосных переходно-скоростных полос (см. рис. 1б). Математическое моделирование производилось при условии равенства интенсивностей движения, выезжающего и въезжающего с городской дороги транспортных потоков ($q_{22} = q_{21}$). При проведении математического моделирования была использована разработанная ранее авторами детерминировано-стохастическая модель движения транспортных потоков,

которая может быть применена для расчета пропускной способности участков переплетения транспортных потоков [27, 28]. Ряд переменных детерминировано-стохастической модели принят с учетом результатов ранее проведенных исследований: распределение автомобилей по проезжей части принято в соответствии с данными, изложенными в [29], вероятность смены полос движения – в соответствии с результатами исследований [30, 31]. Результаты численного моделирования режимов движения транспортных потоков на участках переплетения для шестиполосных дорог приведены на рисунке 2а, для восьмиполосных – на рисунке 2б, десятиполосных – на рисунке 2в. Уравнения $Q_p = f(L_n, q_{22}, q_{21})$ для уровня удобства движения – «В», $q_{22} = q_{21}$ даны в таблице 2.

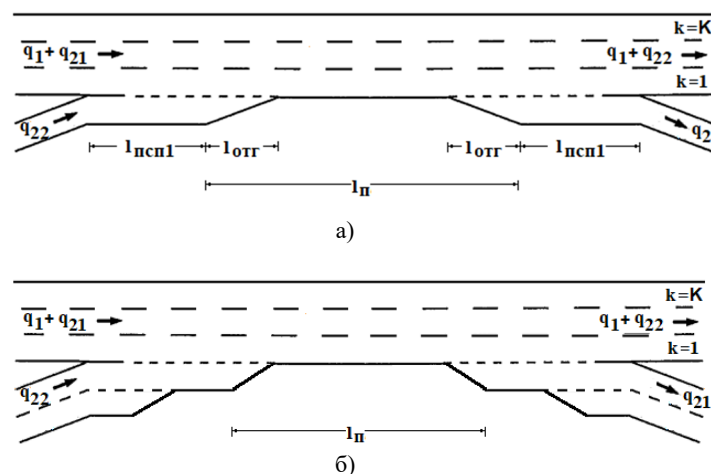


Рис. 1. Схема планировочного решения участка переплетения транспортных потоков: а) при сопряжении однополосных съездов с переходно-скоростной полосой (В1-С1); б) при сопряжении двухполосных съездов с переходно-скоростными полосами (В3-С3)

Таблица 2

Пропускная способность участков переплетения Q_p

№ п/п	Тип сопря- жений	Уравнение	R ²
K=3			
1	B1-C1	$0,5Q_p = 5E-14L_n^5 - 4E-10L_n^4 + 1E-06L_n^3 - 0,0022L_n^2 + 1,7591L_n + 826,35$	1,0
2	B3-C3	$0,5Q_p = -1E-13L_n^5 + 6E-10L_n^4 - 7E-07L_n^3 - 0,0006L_n^2 + 1,7026L_n + 836,96$	
K=4			
3	B1-C1	$0,5Q_p = 2E-13L_n^5 - 1E-09L_n^4 + 3E-06L_n^3 - 0,0038L_n^2 + 2,5998L_n + 711,06$	1,0
4	B3-C3	$0,5Q_p = -1E-13L_n^5 + 7E-10L_n^4 - 8E-07L_n^3 - 0,0007L_n^2 + 2,0747L_n + 817,52$	
K=5			
5	C1-B1	$0,5Q_p = 7E-14L_n^5 - 6E-10L_n^4 + 2E-06L_n^3 - 0,003L_n^2 + 2,3849L_n + 749,48$	1,0
6	C3-B3	$0,5Q_p = -1E-13L_n^5 + 7E-10L_n^4 - 1E-06L_n^3 + 1E-05L_n^2 + 1,7206L_n + 893,68$	

Обсуждение и выводы

Результаты проведенного численного эксперимента показывают, что с увеличением расстояний между въездом и съездом (L_n) нелинейно растет пропускная способность участков переплетения Q_p . Наиболее чувствительна величина пропускной способности (Q_p) при изменении длины участка переплетения с $L_n = 250$ м до $L_n = 500$ м. Для шестиполосных дорог увеличение пропускной способности участков переплетения в этих условиях составляет от 21% до 28%, для восьмиполосных и десятиполосных – от 24% до 35% в зависимости от планировочного решения участка сопряжения транспортных потоков (меньшие значения для однополосных переходно-скоростных полос, большие – для двухполосных переходно-скоростных полос). При увеличении длины участка переплетения с $L_n = 500$ м до $L_n = 1000$ м увеличение пропускной способности участков переплетения для шестиполосных дорог составляет от 7% до 18%, для восьмиполосных – от 6% до 20%, для десятиполосных – от 7% до 24% в зависимости от планировочного решения участка сопряжения транспортных потоков. Дальнейшее увеличение длины участков переплетения транспортных потоков не оказывает существенного влияния на показатели пропускной способности.

Учитывая результаты проведенных исследований следует заключить, что взаимное размещение участков сопряжений съездов при проектировании дорог и их реконструкции рекомендуется вести не только с учетом градостроительных условий, но и с учетом интенсивностей движения транспортных потоков.

В условиях сложившейся улично-дорожной сети полученные зависимости $Q_p = f(L_n, q_{22}, q_{21})$ могут быть использованы для решения задачи поиска пропускной способности съездов и въездов при заданном значении длины участка переплетения (L_n).

В условиях устройства новых участков городских дорог скоростного движения в пределах застроенных территорий их рекомендуется располагать таким образом, чтобы проезжую часть въезда и следующего за ним съезда можно было объединить общей дополнительной полосой движения. В таких условиях обеспечивается наибольшее расстояние между въездом и съездом, которое может быть использовано для устройства полос накопления, предназначенных для въезжающих в сеть городских дорог скоростного движения автомобилей длиной $L_{оч}$ (см. рис. 3).

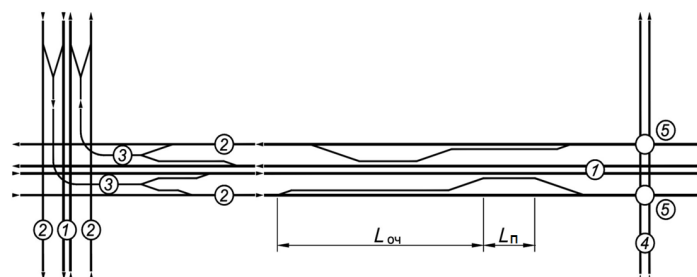


Рис. 3. Общая схема организации въездов на магистральную дорогу скоростного движения: 1 – магистральная городская дорога скоростного движения; 2 – боковой проезд; 3 – съезд пересечения в разных уровнях 1 класса; 4 – магистральная улица районного значения; 5 – пересечение в одном уровне

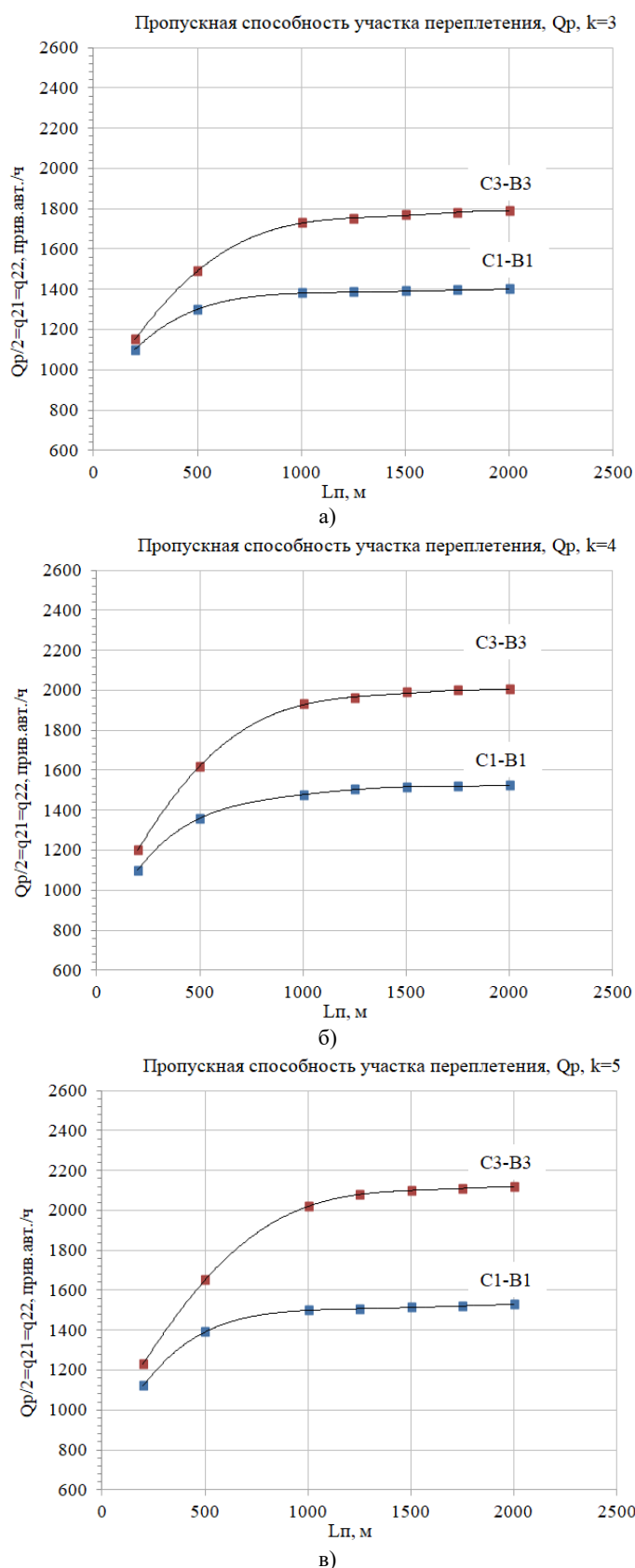


Рис. 2. Зависимости $Q_p = f(L_n, q_{22}, q_{21})$ для уровня удобства движения – «В» $q_{22} = q_{21}$: (а) – для $k=3$; (б) – для $k=4$; (в) – для $k=5$

Обеспечение наибольшей возможной по планировочным условиям длины участка накопления транспортных потоков позволяет увеличить эффективность применения систем контроля интенсивности движения на въездах при устройстве интеллектуальных транспортных систем.

Для ограничения интенсивности движения на въезде рекомендуется применять устройство светофорного объекта на въезде. Расчет режима работы светофорного объекта рекомендуется выполнять с учетом пропускной способности участка переплетения (см. рис. 2 и табл. 2).

Проведенное математическое моделирование режимов движения транспортных потоков позволило получить данные о пропускной способности участков переплетения, что позволяет выполнять оценку уровня удобства движения на участках переплетения при проектировании и эксплуатации городских дорог скоростного движения.

Представленное исследование дает ценную информацию о режимах движения транспортных потоков, но имеет ограничения, обусловленные методикой его проведения. Анализ данных и условий проведения эксперимента показывает, что полученные данные о пропускной способности необходимо интерпретировать с осторожностью, учитывая, что интенсивность движения на съездах и въездах нередко отличаются. В этой связи отмечается необходимость проведения дальнейших исследований с учетом всего спектра условий движения, прежде всего различных интенсивностей движения на съездах, для более точной оценки параметров движения и разработки эффективных мер по оптимизации дорожного движения и построения интеллектуальных транспортных систем городов.

Результаты проведенных исследований рекомендованы к применению для оценки качества транспортного обслуживания и разработки мероприятий по повышению эффективности работы сети дорог скоростного движения в городах России. Результаты исследований также могут быть рекомендованы для применения при проектировании систем интеллектуальных транспортных систем, применяемых для управления движением на съездах и въездах в сеть городских дорог скоростного движения.

Благодарности

Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию (наименование темы научного исследования «Интеллектуальные системы управления развитием улично-дорожной сети городов»; код научной темы, присвоенной учредителем – FEFG-2024-0005).

Литература

1. Михайлов А.Ю., Головых И.М. Современные тенденции в проектировании и реконструкции городских уличных сетей. Новосибирск: Наука, 2004. 267 с.
2. Zhang L., Levinson D. Ramp metering and freeway capacity // Transport Research Part A: Policy and Practice, no. 44(3), 2010, pp. 218-235.
3. Coifman B., Kim S. Extended bottlenecks and the fundamental capacity drop on freeways // Transport Research Part A: Policy and Practice, no. 45(6), 2011, pp. 980-991.

4. Chen D., Ahn S. Capacity drop at extended bottlenecks with merge, diverge, and weave // Transportation Research Part B: Methodological, no. 108(C), 2018, pp. 1-20.
5. Zheng Z. Recent developments and research needs in modeling lane change // Transportation Research Part B: Methodological, no. 60(C), 2014, pp. 16-32.
6. Tianchen Yuan, Faisal Alasiri, Yihang Zhang, Petros A. Ioannou. Evaluation of Integrated Variable Speed Limit and Lane Change Control for Highway Traffic Flow // IFAC-PapersOnLine. Vol. 54, Issue 2, 2021, pp. 107-113, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.06.015>.
7. Yan Z., Yang K., Wang Z., Yang B., Kaizuka T., Nakano K. Intention-based lane-changing and lane-keeping haptic guidance steering system // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, no. 6(4), 2020, pp. 622-633.
8. Xia Y., Qu Z., Sun Z., Li Z. A human-like model to understand surrounding vehicle's lane-changing intentions for autonomous driving // IEEE Transactions on Vehicular Technology, no. 70(10), 2021, pp. 4178-4189.
9. Alizadeh A., Moghadam M., Bicer Y., Ure N.K., Yavas U., Kurtulus C. Automated lane change decision-making using deep reinforcement learning in a dynamic and uncertain highway environment // Proceedings of the 2019 Intelligent Transportation Systems Conference, 2019, pp. 1-6.
10. Li G., Yang Y., Li S., Qu X., Lyu N., Li S.E. Decision making of autonomous vehicles in lane-change scenarios: deep reinforcement learning approaches with risk awareness // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022. P. 134.
11. Zheng Y., Ran B., Qu X., Zhang J., Lin Y. Cooperative lane changing strategies to improve traffic operation and safety near freeway off-ramps in a connected vehicle environment // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 4605-4614.
12. Ali Y., Zheng Z., Haque M.M., Yildirimoglu M., Washington S. Detecting, analyzing, and modeling failed lane-changing attempts in traditional and connected environments // Accident Analysis & Prevention, 2020, vol. 132, no. 10, pp. 1-15.
13. Yu K., Lin L., Alazab M., Tan L., Gu B. Deep learning-based traffic safety solution for autonomous and manual vehicle traffic in a 5G-enabled transportation system // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 4337-4347.
14. Ali Y., Haque M.M., Zheng Z., Washington S., Yildirimoglu M. A hazard-based duration model for quantifying the impact of a connected driving environment on lane-changing safety // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, vol. 98, no. 3, pp. 113-131.
15. Wang C., Sun Q., Guo Y., Fu R., Yuan W. Improving the user acceptability of advanced driver assistance systems based on different driving styles: A case study of lane change warning systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, no. 21(4), 2019, pp. 4196-4208.
16. Wu J., Kulcsár B., Ahn S., Qu X. Emergency vehicle lane pre-clearing: from microscopic cooperation to routing decision making // Transportation Research Part B: Methodological, no. 141(2), 2020, pp. 223-239.
17. Xu H., Zhang Y., Cassandras C.G., Li L., Feng S. A bi-level cooperative driving strategy allowing lane changes // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, no. 120(10), 2020, pp. 1-13.
18. Nie Z., Li Z., Wang W., Zhao W., Lian Y., Outbib R. Gain-scheduling control of dynamic lateral lane change for automated and connected vehicles based on multipoint preview // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, no. 14(3), 2020, pp. 1338-1349.
19. Laval J.A., Leclercq L. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 368, no. 1932, 2010, pp. 4519-4541.
20. Chen D., Ahn S., Laval J., Zheng Z. On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: the role of driver characteristics // Transportation Research Part B: Methodological, vol. 59, 2014, pp. 117-136.
21. Jin W.L., Gan Q.J., Lebacque J.P. A kinematic wave theory of capacity drop // Transportation Research Part B, vol. 81, 2015, pp. 316-329.

22. Zhao S., Chen X., Wang X. Research on the edge resource allocation and load balancing algorithm based on vehicle trajectory // *Complexity*, vol. 2022, p. 5090875, 2022.

23. Rong S., Wang H., Li H., Sun W., Gu Q., Lei J. Performance-guaranteed fractional-order sliding mode control for underactuated autonomous underwater vehicle trajectory tracking with a disturbance observer // *Ocean Engineering*, vol. 263, 2022, p. 112330.

24. Or B., Klein I. Learning vehicle trajectory uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122, 106101.

25. Yang D., Zheng S., Wen C., Jin P.J., Ran B. A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, no. 95, pp. 228-247.

26. Ouyang P., Liu P., Guo Y., Chen K. Effects of configuration elements and traffic flow conditions on lane-changing rates at weaving segments // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, no. 171, 103652.

27. Koscov A.V. Deterministic-stochastic model of traffic flow on multi-lane roads // *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2023. No. 4 (75), pp. 3-12. EDN WNUEDW.

28. Pospelov P., Kostsov A., Tatashev A., Yashina M. A mathematical model of traffic segregation on multilane roads. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, no. 7(1), 2019, pp. 442-446. DOI: 10.21533/pen.v7i1.384. EDN: REDJYZ

29. Косцов А.В. Распределение автомобилей по полосам движения // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2023. № 4. С. 41-44. EDN MHPMQJ.

30. Косцов А.В. Исследование длин участков влияния съездов с многополосных автомагистралей // *Транспортное строительство*. 2019. № 2. С. 16-17. EDN YZGJHX.

31. Косцов А.В. Исследование длин участков влияния въездов на многополосные автомагистрали // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019. № 1(87). С. 20-21. EDN ICMOJL.

CALCULATING THE EASE MOVEMENT LEVEL WITH CREATING INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS ON HIGH-SPEED URBAN ROADS

Roman V. Klyuev, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia;
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Alexey V. Kostsov, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia;
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, kostsov_msfs@bk.ru

Dmitry S. Martynikhin, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia;
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Alan L. Kortiev, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Alexey A. Berko, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract

The increasing demand for intra-urban transportation in the context of high motorization has resulted in the development of a network of urban expressways designed to meet the need for fast and efficient movement within large and megacities. The growth in traffic volumes on urban expressways is significantly outpacing the pace of road and bridge construction. Under these conditions, engineers have shifted from extensively expanding the transportation system to utilizing methods to improve traffic flow and make existing infrastructure more effective. One of the most significant methods for enhancing the efficiency of urban expressway networks is the implementation of intelligent transportation systems that limit vehicle access to roads, enabling high levels of convenience on urban expressways. The development of traffic management strategies at the entry points to the urban express road network necessitates the enhancement of methods for evaluating the capacity and convenience of traffic on the primary thoroughfare, which forms the basis for establishing requirements for the operation of intelligent transportation systems. This article presents the findings of a study that enables the assessment of the level of traffic comfort in areas where traffic streams intersect, with the aim of enhancing traffic convenience on urban expressways, including through the use of intelligent transportation solutions.

Keywords: urban roads, street and road network, intelligent transport systems, level of service, road design.

Acknowledgements

The work was prepared based on the results of research carried out at the expense of the federal budget according to the state assignment (the name of the research topic "Intelligent management systems for the development of the urban street and road network"; the code of the scientific topic assigned by the founder is FEFG-2024-0005).

References

- [1] A. Yu. Mikhailov, I. M. Golovykh, "Modern trends in the design and reconstruction of urban street networks," Novosibirsk: Nauka, 2004. 267 p.
- [2] L. Zhang, D. Levinson, "Ramp metering and freeway capacity," *Transport Research Part A: Policy and Practice*, 2010, no. 44(3), pp. 218-235.
- [3] B. Coifman, S. Kim, "Extended bottlenecks and the fundamental capacity drop on freeways," *Transport Research Part A: Policy and Practice*, 2011, no. 45(6), pp. 980-991.
- [4] D. Chen, S. Ahn, "Capacity drop at extended bottlenecks with merge, diverge, and weave," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, no. 108(C), pp. 1-20.
- [5] Z. Zheng, "Recent developments and research needs in modeling lane change," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, no. 60(C), pp. 16-32.
- [6] Tianchen Yuan, Faisal Alasiri, Yihang Zhang, Petros A. Ioannou, "Evaluation of Integrated Variable Speed Limit and Lane Change Control for Highway Traffic Flow," *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 54, Issue 2, 2021, pp. 107-113, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.06.015>.
- [7] Z. Yan, K. Yang, Z. Wang, B. Yang, T. Kaizuka, K. Nakano, "Intention-based lane-changing and lane-keeping haptic guidance steering system," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2020, no. 6(4), pp. 622-633.
- [8] Y. Xia, Z. Qu, Z. Sun, Z. Li, "A human-like model to understand surrounding vehicle's lane-changing intentions for autonomous driving," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, no. 70(10), pp. 4178-4189.
- [9] A. Alizadeh, M. Moghadam, Y. Bicer, N. K. Ure, U. Yavas, C. Kurtulus, "Automated lane change decision-making using deep reinforcement learning in a dynamic and uncertain highway environment," *Proceedings of the 2019 Intelligent Transportation Systems Conference*, 2019, pp. 1-6.
- [10] G. Li, Y. Yang, S. Li, X. Qu, N. Lyu, S. E. Li, "Decision making of autonomous vehicles in lane-change scenarios: deep reinforcement learning," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, pp. 134.
- [11] Y. Zheng, B. Ran, X. Qu, J. Zhang, Y. Lin, "Cooperative lane changing strategies to improve traffic operation and safety near freeway off-ramps in a connected vehicle environment," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 4605-4614.
- [12] Y. Ali, Z. Zheng, M. M. Haque, M. Yildirimoglu, S. Washington, "Detecting, analyzing, and modeling failed lane-changing attempts in traditional and connected environments," *Accident Analysis & Prevention*, 2020, vol. 132, no. 10, pp. 1-15.
- [13] K. Yu, L. Lin, M. Alazab, L. Tan, B. Gu, "Deep learning-based traffic safety solution for autonomous and manual vehicle traffic in a 5G-enabled transportation system," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 4337-4347.
- [14] Y. Ali, M. M. Haque, Z. Zheng, S. Washington, M. Yildirimoglu, "A hazard-based duration model for quantifying the impact of a connected driving environment on lane-changing safety," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, vol. 98, no. 3, pp. 113-131.
- [15] C. Wang, Q. Sun, Y. Guo, R. Fu, W. Yuan, "Improving the user acceptability of advanced driver assistance systems based on different driving styles: A case study of lane change warning systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, no. 21(4), pp. 4196-4208.
- [16] J. Wu, B. Kulcsar, S. Ahn, X. Qu, "Emergency vehicle lane pre-clearing: from microscopic cooperation to routing decision making," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, no. 141(2), pp. 223-239.
- [17] H. Xu, Y. Zhang, C. G. Cassandras, L. Li, S. Feng, "A bi-level cooperative driving strategy allowing lane changes," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, no. 120(10), pp. 1-13.
- [18] Z. Nie, Z. Li, W. Wang, W. Zhao, Y. Lian, R. Outbib, "Gain-scheduling control of dynamic lateral lane change for automated and connected vehicles based on multipoint preview," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, no. 14(3), pp. 1338-1349.
- [19] J. A. Laval, L. Leclercq, "A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, vol. 368, no. 1932, pp. 4519-4541.
- [20] D. Chen, S. Ahn, J. Laval, Z. Zheng, "On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: the role of driver characteristics," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, vol. 59, pp. 117-136.
- [21] W. L. Jin, Q. J. Gan, J. P. Lebacque, "A kinematic wave theory of capacity drop," *Transportation Research Part B*, 2015, vol. 81, pp. 316-329.
- [22] S. Zhao, X. Chen, X. Wang, "Research on the edge resource allocation and load balancing algorithm based on vehicle trajectory," *Complexity*, 2022, vol. 2022, p. 5090875.
- [23] S. Rong, H. Wang, H. Li, W. Sun, Q. Gu, J. Lei, "Performance-guaranteed fractional-order sliding mode control for underactuated autonomous underwater vehicle trajectory tracking with a disturbance observer," *Ocean Engineering*, 2022, vol. 263, p. 112330.
- [24] B. Or, I. Klein, "Learning vehicle trajectory uncertainty," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122, 106101.
- [25] D. Yang, S. Zheng, C. Wen, P. J. Jin, B. Ran, "A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, no. 95, pp. 228-247.
- [26] P. Ouyang, P. Liu, Y. Guo, K. Chen, "Effects of configuration elements and traffic flow conditions on lane-changing rates at weaving segments," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, no. 171, 103652.
- [27] A. V. Koscov, "Deterministic-stochastic model of traffic flow on multi-lane roads," *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2023. No. 4 (75), pp. 3-12.
- [28] P. Pospelov, A. Kostsov, A. Tatashev, M. Yashina, "A mathematical model of traffic segregation on multilane roads," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2019, no. 7(1), pp. 442-446. DOI: 10.21533/pen.v7i1.384
- [29] A. V. Koscov, "Distribution of cars by traffic lanes," *Science and technology in the road industry*. 2023, no. 4, pp. 41-44.
- [30] A. V. Koscov, "Study of the lengths of sections of influence of exits from multi-lane highways," *Transport construction*. 2019, no. 2, pp. 16-17.
- [31] A. V. Koscov, "Study of the lengths of sections of influence of entrances to multi-lane highways," *Science and technology in the road industry*. 2019, no. 1 (87), pp. 20-21.