

УДК 625.46

Анализ влияния протяженности участка между остановочными пунктами и временных задержек на расчетную скорость движения подвижного состава скоростного трамвая

Д. А. Басовский¹, О. В. Востриков², А. А. Костенко¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²СПб ГУП «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15

Для цитирования: Басовский Д. А., Востриков О. В., Костенко А. А. Анализ влияния протяженности участка между остановочными пунктами и временных задержек на расчетную скорость движения подвижного состава скоростного трамвая // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 148–156. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-148-156

Аннотация

Цель: Обоснование необходимости реорганизации существующего трамвайного движения для возможности реализации высоких расчетных скоростей сообщения, которое является одним из необходимых условий организации скоростных трамвайных линий. **Метод:** Компьютерное моделирование движения подвижного состава скоростного трамвая с определением математических зависимостей расчетных скоростей сообщения от протяженностей участков между остановочными пунктами с учетом временных задержек на регулируемых пересечениях уличной дорожной сети и времени простоя на остановочных пунктах. **Результаты:** Получено математическое выражение, позволяющее оценить расчетную скорость сообщения скоростного трамвая при любой протяженности участка между остановочными пунктами. Обоснована необходимость в реорганизации трамвайного движения с созданием необходимых условий, позволяющих реализовать высокие расчетные скорости сообщения. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут применяться инженерами транспортной инфраструктуры при назначении длин и конфигураций участков в процессе проектирования скоростных трамвайных линий.

Ключевые слова: Трамвайный путь, остановочные пункты, скоростная линия, временные задержки, время простоя, многомодальное моделирование.

Введение

В 2023 г. в Санкт-Петербурге прирост объемов перевозок пассажиров городским общественным транспортом вырос на 19,7 % относительно уровня 2022 г. По данным Комтранса, более 1,2 млрд пассажирских перевозок приходятся на метрополитен, «Пассажиравтотранс» и «Горэлектротранс».

В течение первого полугодия 2023 г. общее количество пассажиров, воспользовавшихся метро, составило приблизительно 327,4 миллиона человек. Трамваи и троллейбусы ГУП «Горэлектротранс» перевезли более 124,9 миллиона пассажиров. ГУП «Пассажиравтотранс» и частные перевозчики обслужили около 156 миллионов и 205,4 миллиона пассажиров на своих автобусных маршрутах.

В 2023 г. завершилось обновление подвижного состава Трамвайного парка № 7, началось масштабное обновление Трамвайного парка № 8, а в парк № 5 было поставлено четырнадцать новых трамваев производства Усть-Катавского вагоностроительного завода. К 2028 г., с завершением реализации программы «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга», город увеличит трамвайный парк до 596 единиц.

Внедрение программы даст возможность «Горэлектротрансу» запустить скоростные магистральные трамвайные маршруты. Благодаря этому время в пути сократится, а интервал между трамваями составит от 3 до 8,6 минуты.

Скоростной трамвай имеет наибольшую провозную способность по сравнению с прочими видами наземного транспорта [1–4].

Согласно пункту 4.1 свода правил СП 98.13330.2018 «Трамвайные и троллейбусные линии» (далее — свод правил), трамвайные линии, где расчетный показатель скорости движения превышает 24 км/ч, отнесены к скоростным. В соответствии с актуальным сводом правил скоростную трамвайную линию определяют как отрезок пути протяженностью от 2 километров и более, где в пиковые часы скорость движения может превышать 21 км/ч.

Существует три основных метода прокладки трамвайных путей [5]:

- в профиле улично-дорожной сети на совмещенном с автодорогой полотне;
- в профиле улично-дорожной сети на обособленном от автодороги полотне;
- на самостоятельном полотне.

Согласно [5], при проектировании новых трамвайных линий необходимо предусматривать их размещение на выделенном полотне, отделенном от проезжей части, тротуаров и велосодорожек. Для этого должны быть использованы разделительные полосы и технические средства, исключающие доступ автотранспорта.

Постановка задачи

Оптимизация расположения остановочных пунктов способствует сокращению общего времени поездки, повышению расчетной скорости сообщения и частоты устройства остановок [6, 7].

Проанализируем зависимость расстояния между остановочными пунктами и скорости сообщения подвижного состава при различном времени простоя трамвая и наличии временных задержек (ожидание на светофорах, пересечения с другими транспортными средствами и др.). Как уже отмечалось ранее, расчетную скорость сообщения в 21 км/ч будем считать минимально необходимой для возможности классифицировать рассматриваемый участок как «скоростную трамвайную линию».

Для использования в системе городского рельсового транспорта рассматривался трехсекционный трамвайный вагон ПКТС 71-932 «Невский», отличающийся

высоким техническим уровнем и большим потенциалом интеграции. Вагон обладает следующими техническими характеристиками, которые были использованы при создании имитационной модели:

- конструкционная скорость — 75 км/ч;
- длина вагона — 27,5 м;
- ширина вагона — 2,5 м;
- высота вагона — 3,5 м;
- служебное ускорение — 1 м/с²;
- служебное замедление — 2 м/с².

Упомянутые технические характеристики были задействованы в ходе создания имитационной модели, сформированной в программном комплексе для моделирования мультимодального движения с открытым исходным кодом SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) [8] (рис. 1–3).

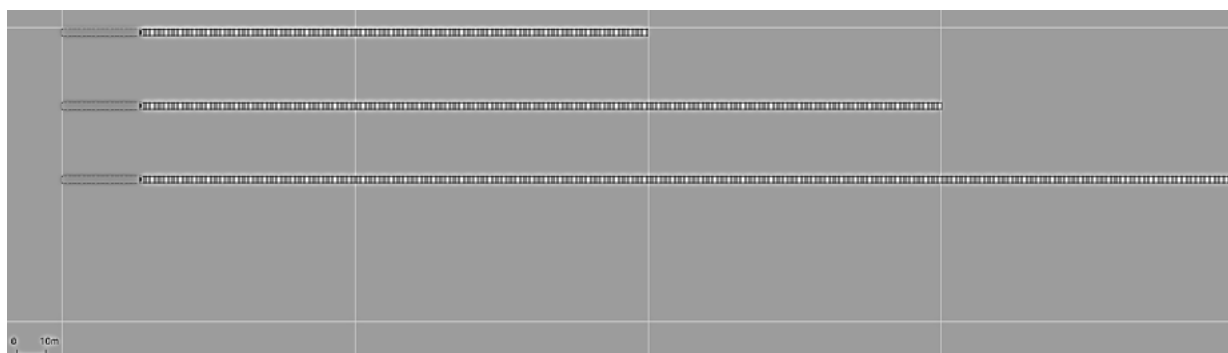


Рис. 1. Расчетные участки между остановочными пунктами (протяженностью 200 до 400 м)

Vehicle Type attributes	
vClass	tram
id	DEFAULT_VEHICLE
color	yellow
length	27.50
minGap	3.50
maxSpeed	20.83
desiredMaxSpeed	2777.78
speedFactor	normc(1.00,0.00)
emissionClass	Zero/default
width	2.50
height	3.50
imgFile	tram.obj
usrFile	default
laneChangeModel	default
guiShape	rail/railcar
probability	1.00
personCapacity	260
containerCapacity	0
boardingDuration	0.50
loadingDuration	90.00
latAlignment	center
minGapLat	0.12
maxSpeedLat	1.00
actionStepLength	0.00
carriageLength	-1.00
locomotiveLength	-1.00
carriageGap	1
Edit parameters	

Lane Change Model attributes	
strategic	1.0
cooperative	1.0
speedGain	1.0
keepRight	1.0
sublane	1.0
opposite	1.0
pushy	0.00
pushyGap	0.00
assertive	1.0
impatience	0.00
timeToImpatience	infinity
accelLat	1.0
lookaheadLeft	2.0
speedGainRight	0.1
maxSpeedLatStanding	0.00
maxSpeedLatFactor	1.00
turnAlignDistance	0.00
overtakeRight	0.00
keepRightAcceptanceTime	-1
overtakeDeltaSpeedFactor	0.00

Car Following Model attributes	
Algorithm	Krauss
accel	1
decel	2
apparentDecel	4.50
emergencyDecel	4.50
sigma	0
tau	1.0

Junction Model attributes	
crossingGap	10
ignoreKeepClearTime	-1
driveAfterYellowTime	-1
driveAfterRedTime	-1
drivelledSpeed	0.0
ignoreFoeProb	0.0
ignoreFoeSpeed	0.0
sigmaMinor	0.0
timegapMinor	1
impatience	0.0

Рис. 2. Технические характеристики и параметры вагона 71-932 «Невский», внесенные в имитационную модель

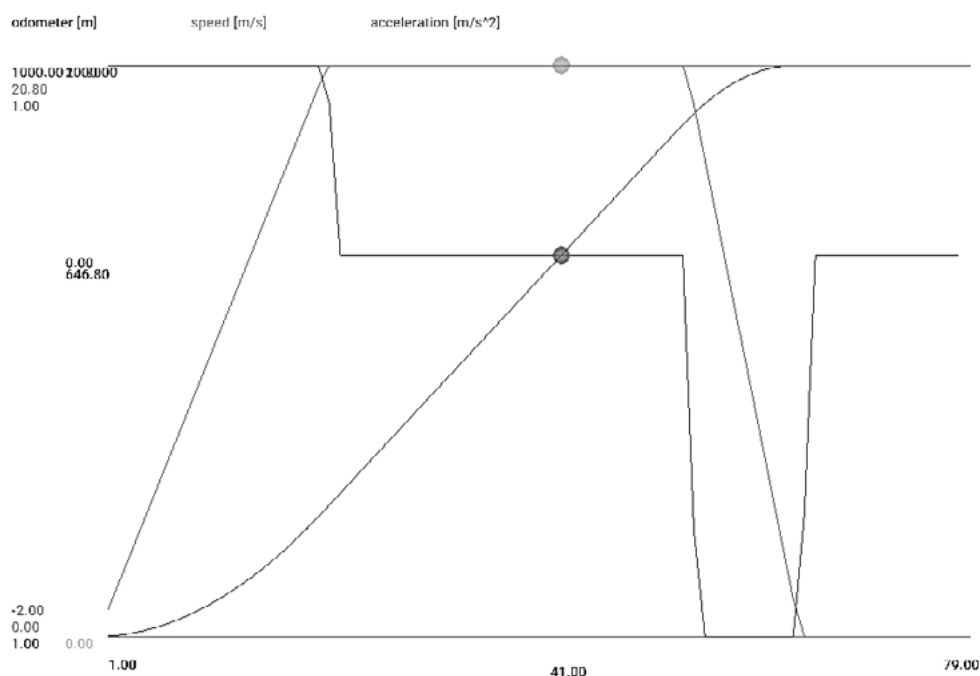


Рис. 3. Кинематические графики ($S(t)$, $V(t)$, $a(t)$) подвижного состава для линейного участка протяженностью 1000 м

В качестве объектов моделирования выступают линейные участки между остановочными пунктами различной протяженности — от 200 до 1500 м. Максимальная скорость, которую может развивать трамвай в заданной модели, составляет 75 км/ч, что соответствует его конструкционным характеристикам, указанным в техническом паспорте.

Кроме того, исследовались два варианта расчета движения трамвая, включающих сценарии с задержками на регулируемых переездах. В случае отсутствия задержек продолжительность ожидания равнялась 0 с, при наличии — 30 с (среднее время ожидания зеленого сигнала светофора).

Было рассмотрено 4 варианта времени простоя трамвая t на остановочных пунктах: 15 с, 30 с, 45 с и 60 с.

Результаты моделирования

По результатам расчета ранее созданных имитационных моделей были построены графики зависимости изменения скорости сообщения трамвая от расстояния между остановочными пунктами и наличия/отсутствия временных задержек на регулируемых пересечениях, которые представлены на рис. 4, 5.

На построенных графиках пунктиром обозначены минимально необходимые расстояния между трамвайными остановками, обеспечивающие достижение минимально необходимой расчетной скорости сообщения в 21 км/ч.

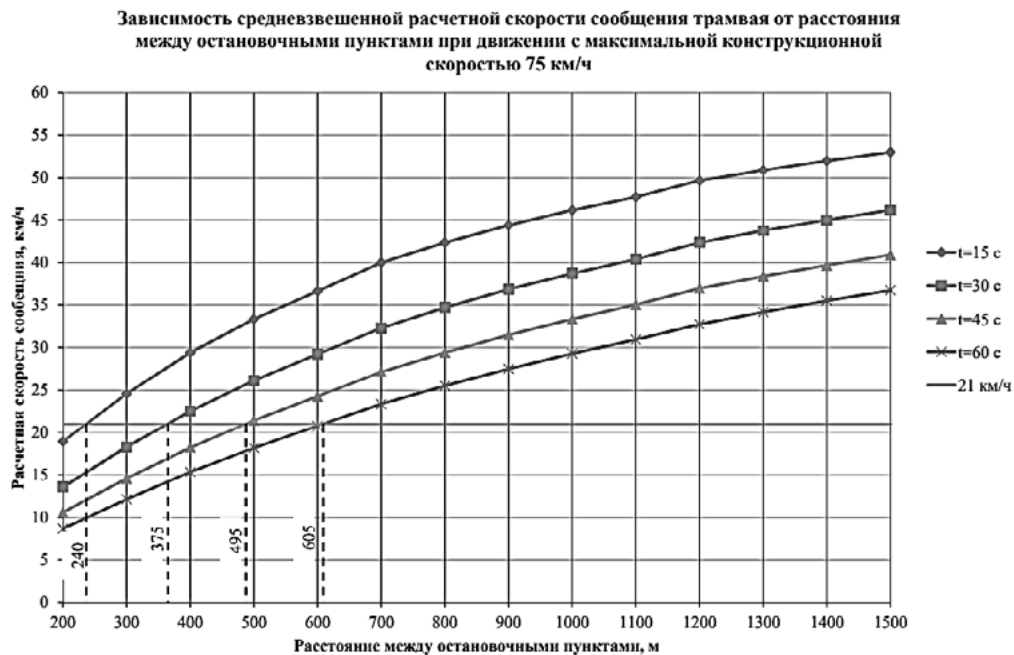


Рис. 4. Анализ динамики расчетной скорости трамвая в связи с расстоянием между остановками и отсутствием простоя на регулируемых переездах

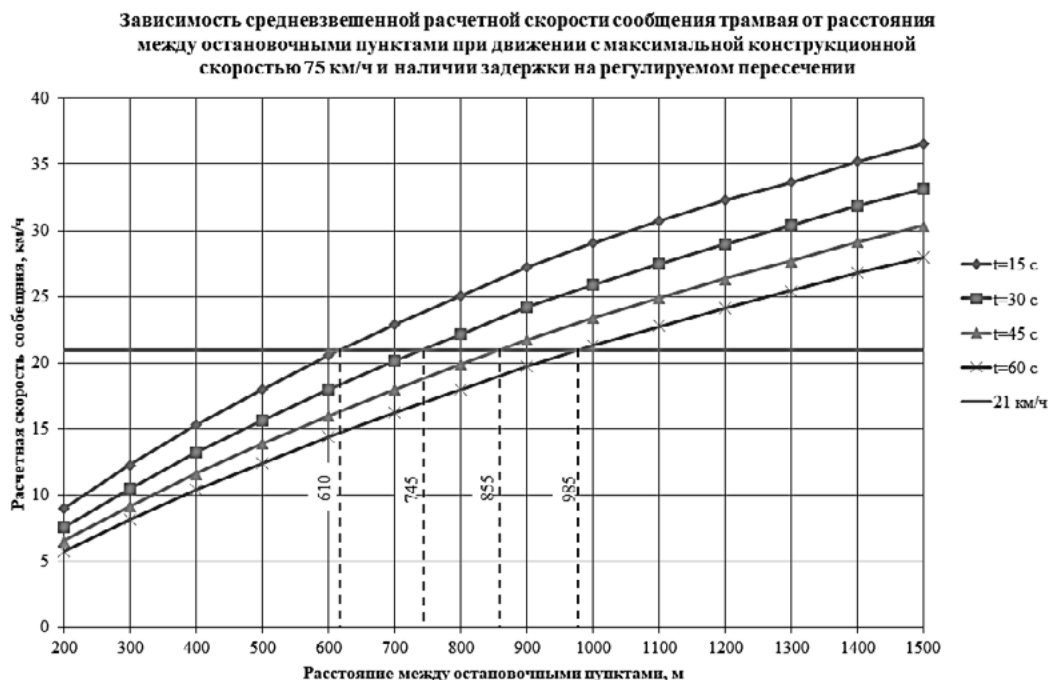


Рис. 5. Анализ динамики расчетной скорости трамвая в связи с расстоянием между остановками и имеющимся простоем в 30 с на регулируемых переездах

По результатам анализа графиков прослеживаются следующие закономерности:

– для обеспечения расчетной скорости движения трамвая 21 км/ч минимальное расстояние между остановками должно составлять 240 метров. Такой интервал допустим при отсутствии задержек на перекрестках и если время ожидания на остановке не превышает 15 секунд. Если время простоя на остановке

увеличивается до 60 секунд, необходимая длина участка для достижения минимальной расчетной скорости возрастает до 605 метров;

– чтобы обеспечить минимальную расчетную скорость движения трамвая, допустимая дистанция между остановками при ожидании зеленого сигнала светофора увеличивается до 610 метров, если время простоя составляет 15 секунд.

Была установлена количественная связь между расчетной скоростью трамвая (выраженной в км/ч) и расстоянием между остановочными пунктами (измеренным в метрах) с помощью построения трендовых линий:

$$v = Ax^2 + Bx + C,$$

где A, B, C — коэффициенты квадратичной функции, учитывающие отсутствие/наличие потери времени на регулируемых пересечениях; время простоя подвижного состава на остановочных пунктах. Все полученные значения коэффициентов сведены в таблицу.

Значения коэффициентов квадратичной функции определения расчетной скорости сообщения подвижного состава

Коэффициенты квадратичной функции	Время простоя t на остановочных пунктах, с			
	15	30	45	60
Задержка на регулируемых пересечениях уличной дорожной сети — 0 с				
A	–1,147E–05	–9,141E–06	–7,277E–06	–5,861E–06
B	0,041314	0,03651	0,031905	0,02801
C	15,081	9,8805	7,1852	5,6118
Задержка на регулируемых пересечениях уличной дорожной сети — 30 с				
A	–5,269E–06	–4,366E–06	–3,668E–06	–3,128E–06
B	0,026606	0,0237963	0,021474	0,019520
C	6,0473	4,8985	4,0901	3,5112

Применение зависимости (1) и коэффициентов таблицы позволяет оценить расчетную скорость сообщения трамвая при любой протяженности участка между остановочными пунктами.

Заключение

Анализ полученных сведений указывает на необходимость реструктуризации трамвайных маршрутов для успешной реализации «скоростных трамвайных линий» в густонаселенных городах. Действительно, высокая плотность транспортных потоков, обусловленная множеством светофоров и пересечений с другими видами транспорта, существенно снижает скорость движения трамваев. Строительство трамвайных путей на обособленном полотне позволит исключить

временные задержки на участках между остановочными пунктами и позволит реализовать высокие расчетные скорости сообщения подвижного состава [9–11].

Список источников

1. Транспорт в России / Росстат. — М.: Росстат, 2018. — 101 с.
2. Самойлов Д. С. Городской транспорт: учебник для вузов / Д. С. Самойлов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1983. — 384 с.
3. Дудкин Е. П. Комплексный подход к выбору и обоснованию вида городского транспорта / Е. П. Дудкин, Н. В. Левадная, В. А. Черняева // Бюллетень результатов научных исследований. — 2013. — № 3(8). — С. 4–13.
4. Дудкин Е. П. Современные скоростные системы рельсового городского транспорта / Е. П. Дудкин, О. Г. Параскевопуло, Ю. Г. Параскевопуло. — СПб.: ПГУПС, 2008. — 158 с.
5. СП 98.13330.2018. Свод правил. Трамвайные и троллейбусные линии. Актуализированная редакция СНиП 2.05.09—90.
6. Горев А. Э. Формирование коридоров приоритетного движения городского пассажирского транспорта / А. Э. Горев, А. И. Солодский, О. В. Попова, Д. Т. Оспанов // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации. — Иркутск: ИРНИТУ, 2019. — С. 618–628.
7. Мирончук А. А. Исследование влияния расстояния между остановочными пунктами на скорость движения трамвая / А. А. Мирончук, Ю. Ю. Добрынина // Инженерный вестник Дона. — 2020. — № 4(64). — С. 39.
8. Simulation of Urban MObility (SUMO). — URL: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> (дата обращения: 15.11.2024).
9. Черняева В. А. Анализ факторов проектирования транспортных систем городов / В. А. Черняева, Н. В. Левадная // Наука и образование XXI века: сборник статей международной науч.-практ. конференции. — Уфа: БГУ, 2013. — С. 280–284.
10. Черняева В. А. Современный подход при определении транспортных систем городов / В. А. Черняева, Н. В. Левадная, Е. П. Дудкин // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2013. — № 3. — С. 64–71.
11. Поляков А. А. Городское движение и планировка улиц / А. А. Поляков. — М., Л.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1953. — 251 с.

Дата поступления: 03.10.2025

Решение о публикации: 30.11.2025

Контактная информация:

БАСОВСКИЙ Дмитрий Аркадьевич — канд. техн. наук, доц.; basovskiy76@mail.ru

ВОСТРИКОВ Олег Владимирович — заместитель начальника службы по перспективному развитию; vost-ol@yandex.ru

КОСТЕНКО Андрей Александрович — аспирант; drynya.ko@mail.ru

The Influence of the Inter-Station Section Length and Time Delays on the Tram Design Speed

D. A. Basovskiy¹, O. V. Vostrikov², A. A. Kostenko¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Saint Petersburg State Unitary Enterprise "Gorelektrotrans", 15, Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Basovskiy D. A., Vostrikov O. V. Kostenko A. A. The Influence of the Inter-Station Section Length and Time Delays on the Tram Design Speed. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 148–156. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-148-156

Summary

Purpose: To substantiate the necessity for reorganization of the existing urban tram networks in order to realize the potential of high-speed tram traffic. **Method:** Computer modelling of high-speed tram rolling stock was performed. The research elucidates the mathematical relationships between calculated operational speeds and the distances between stops. The model incorporates critical variables, including incurred time delays at regulated street network intersections and dwell times observed at the passenger stops. The findings underscore the critical influence of traffic reorganization on achieving the design speeds essential for effective high-speed tram operation. **Results:** A mathematical expression has been developed to enable the precise evaluation of the design tram speed across variable inter-stop segment lengths. The imperative to restructure tram transit operations has been substantiated by the establishment of requisite parameters to facilitate elevated operational speeds. **Practical significance:** Practical applications of this research extend to transport infrastructure engineers when determining tram track lengths and configurations during the foundational design phases of high-speed tram networks.

Keywords: Tram track, stopping points, high-speed line, time delays, downtime, multimodal modelling.

References

1. Rosstat. *Transport v Rossii* [Transport in Russia]. Moscow: Rosstat Publ., 2018, 101 p. (In Russian)
2. Samoylov D. S. *Gorodskoy transport: uchebnik dlya vuzov, 2-e izd., pererab. i dop.* [Urban transport: textbook for universities, 2nd ed., rev. and augm.]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1983, 384 p. (In Russian)
3. Dudkin E. P., Levadnaya N. V., Chernyaeva V. A. Kompleksnyy podkhod k vyboru i obosnovaniyu vida gorodskogo transporta [Comprehensive approach to selecting and justifying the type of urban transport]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2013, Iss. 3(8), pp. 4–13. (In Russian)
4. Dudkin E. P., Paraskevopulo O. G., Paraskevopulo Yu. G. *Sovremennye skorostnye sistemy rel'sovogo gorodskogo transporta* [Modern high-speed rail urban transport systems]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2008, 158 p. (In Russian)
5. SP 98.13330.2018. *Svod pravil. Tramvaynye i trolleybusnye linii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.05.09—90* [SP 98.13330.2018. Set of rules. Tramway and trolleybus lines. Updated version of SNIp 2.05.09—90]. (In Russian)

6. Gorev A. E., Solodskiy A. I., Popova O. V., Ospanov D. T. Formirovanie koridorov prioritetnogo dvizheniya gorodskogo passazhirskogo transporta [Formation of priority movement corridors for urban passenger transport]. *Bezopasnost' kolesnykh transportnykh sredstv v usloviyakh ekspluatatsii* [Safety of wheeled vehicles in operation]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2019, pp. 618–628. (In Russian)
7. Mironchuk A. A., Dobrynina Yu. Yu. Issledovanie vliyaniya rasstoyaniya mezhdu ostanovochnymi punktami na skorost' dvizheniya tramvaya [Study of the impact of the distance between stops on tram speed]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2020, Iss. 4(64), p. 39. (In Russian)
8. Simulation of Urban MObility (SUMO) [Electronic resource]. Available at: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> (accessed: November 15, 2024).
9. Chernyaeva V. A., Levadnaya N. V. Analiz faktorov proektirovaniya transportnykh sistem gorodov [Analysis of factors in designing urban transport systems]. *Nauka i obrazovanie XXI veka: sbornik statey mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konferentsii* [Science and education of the 21st century: collection of articles from the international scientific-practical conference]. Ufa: BGU Publ., 2013, pp. 280–284. (In Russian)
10. Chernyaeva V. A., Levadnaya N. V., Dudkin E. P. Sovremennyy podkhod pri opredelenii transportnykh sistem gorodov [Modern approach to defining urban transport systems]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of the Russian transport complex]. 2013, Iss. 3, pp. 64–71. (In Russian)
11. Polyakov A. A. *Gorodskoe dvizhenie i planirovka ulits* [Urban traffic and street planning]. Moscow, Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1953, 251 p. (In Russian)

Received: October 03, 2025

Accepted: November 30, 2025

Author's information:

Dmitriy A. BASOVSKIY — Ph.D. in Engineering, Associate Professor; basovskiy76@mail.ru

Oleg V. VOSTRIKOV — Deputy Head of the Service for Long-Term Development;
vost-ol@yandex.ru

Andrey A. KOSTENKO — Postgraduate Student; drynya.ko@mail.ru