

Анализ времени пассажирообмена на промежуточных остановочных пунктах маршрутов регулярных перевозок наземного городского пассажирского транспорта



А. И. Жуков,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Автомобильные
перевозки» Московского
автомобильно-дорожного
государственного
технического
университета (МАДИ),



М. А. Кудряшов,
старший преподаватель
кафедры «Автомобильные
перевозки» МАДИ,
заместитель генерального
директора
ОАО «Научно-
исследовательский
институт втомобильного
транспорта»

Время оборота подвижного состава на регулярных маршрутах является ключевым элементом организации перевозок пассажиров. При этом одним из его слагаемых выступает простой на промежуточных остановочных пунктах с такой важнейшей составляющей, как пассажирообмен. Точное моделирование времени пассажирообмена необходимо для разработки адекватных имитационных моделей и цифровых двойников транспортных систем.

Повышение эффективности функционирования наземного городского пассажирского транспорта (НГПТ) и качества транспортного обслуживания населения являются ключевыми задачами современного городского планирования [1]. Эффективное планирование и организация работы подвижного состава требует точного учета всех временных затрат, включая простой на промежуточных остановочных пунктах. Оно может составлять значительную долю общего времени оборота в зависимости от класса подвижного состава, планировки салона, особенностей маршрута и пр. [2].

В условиях растущей сложности транспортных систем городов и необходимости принятия оперативных и обоснованных управленческих решений возрастает роль методов математического и имитационного моделирования [3, 4]. Разработка точных имитационных моделей и цифровых двойников транспортных процессов и систем позволяет тестировать различные сценарии работы маршрутов, выявлять узкие места и предлагать эффективные решения для оптимизации расписания, маршрутной сети и распределения ресурсов.

Недостовверная информация о времени простоя, в частности, пассажирообмена, приводит к существенным погрешностям в имитационных моделях, что делает их непригодными для принятия обоснованных управленческих решений.

Простой транспортных средств может значительно влиять как на отдельные показатели качества обслуживания пассажиров (регулярность движения, уровень наполнения транспортных средств), так и на общую удовлетворенность [5]. Важнейшей составляющей времени простоя на остановочных пунктах является процесс пассажирообмена [6], который непосредственно зависит от количества пассажиров и времени, затрачиваемого каждым из них на вход и выход.

Обследования времени входа и выхода пассажиров проводились в 1970–1980-х гг. С тех пор произошли существенные изменения в структуре пассажиропотоков, типах подвижного состава, способах оплаты проезда и других факторах, которые могут влиять на время пассажирообмена.

В связи с этим результаты проведенных исследований требуют критической оценки и, при необходимости, корректировки на основе актуальных данных. Использование устаревших данных в имитационных моделях приводит к снижению их точности и, как следствие, к неэффективному использованию ресурсов и ухудшению качества транспортного обслуживания. Для построения адекватных имитационных моделей необходимы достоверные данные о временах простоя на остановках, а также вероятностные распределения этих величин [4, 6].

Отдельный интерес представляют исследования, выдвигающие гипотезу

об обратной задаче определения пассажирооборота в зависимости от времени простоя на остановочном пункте [7]. Анализ ранее выполненных исследований, опубликованных в иностранных источниках, показывает недостаточность внимания к рассматриваемому вопросу. В большинстве авторами исследуется совокупная оценка временных затрат на передвижение как одного из параметров, влияющих на качество транспортного обслуживания [8, 9].

В работах дополнительно рассматриваются параметры улично-дорожной сети и режимы работы технических средств организации дорожного движения, в частности анализируется влияние времени простоя подвижного состава на продолжительность пересадки пассажиров, однако не учитывается пассажирообмен на остановочных пунктах как одно из слагаемых, влияющих на общее время, затрачиваемое пассажиром на пересадку [10].

Аналогично при разработке имитационных моделей учитывается класс, категория и планировка подвижного состава. Лабораторным экспериментом получены результаты, подтверждающие актуальность выбранного направления исследования [11].

Следует отметить работы, ставящие своей целью выявить оценку влияния способа оплаты проезда на время пассажирообмена на остановочном пункте [12]. В отдельную группу можно выделить исследования, посвященные оценке времени посадки/высадки различных категорий маломобильных групп населения [13, 14].

Целью настоящего исследования является повышение эффективности и качества транспортного обслуживания населения посредством создания основы для разработки точных имитационных моделей и цифровых двойников транспортных процессов и систем. Точные имитационные модели в своей основе должны использовать прецизионные данные о стохастических характеристиках процессов, происходящих в рамках модели. Авторы сосредоточили усилия на изучении данных о времени пассажирообмена на промежуточных остановочных пунктах.

Результаты исследования позволят создавать имитационные модели транспортных процессов и систем высокой точности. На их основе возможна дальнейшая оптимизация систем транспортного обслуживания населения с целью сокращения времени оборота

маршрутов, повышения регулярности движения, снижения эксплуатационных расходов и, как следствие, улучшения условий поездок для пассажиров.

Полученные данные станут ключевым элементом при создании цифровых двойников транспортных систем, предоставляющих возможность в режиме реального времени не только отслеживать и прогнозировать состояние маршрутов, но и оперативно адаптировать расписание и маршруты движения под изменяющиеся условия, максимизируя пропускную способность остановочных пунктов и минимизируя задержки.

Факторы, определяющие продолжительность простоя подвижного состава на промежуточных остановках

Время простоя транспортного средства на промежуточном остановочном пункте является сложным и многокомпонентным показателем. В общем виде его можно представить как сумму следующих составляющих:

$$t_{\text{поп}} = t_{\text{откр}} + t_{\text{пас}} + t_{\text{вод}} + t_{\text{закр}},$$

где $t_{\text{поп}}$ — время простоя транспортных средств на промежуточных остановочных пунктах;

$t_{\text{откр}}$ — время открытия дверей транспортного средства;

$t_{\text{пас}}$ — время пассажирообмена на промежуточных остановочных пунктах;

$t_{\text{вод}}$ — время визуального контроля водителя на промежуточных остановочных пунктах.

Время открытия дверей зависит главным образом от технических характеристик транспортного средства, в частности, от типа дверного механизма и скорости его срабатывания. В современных транспортных средствах это время относительно стабильно и может рассматриваться как величина, близкая к постоянной.

Время пассажирообмена — время, необходимое для осуществления посадки и высадки пассажиров из транспортного средства. В отличие от времени открытия/закрытия дверей, $t_{\text{пас}}$ является случайной величиной, подверженной влиянию множества факторов.

Время визуального контроля водителя — время, затрачиваемое водителем на визуальную оценку ситуации на остановочном пункте и в салоне транспортного средства, чтобы убедиться в завершении процесса посадки и высадки пассажиров и отсутствии препятствий для начала движения. Этот компонент

также может варьироваться, но, как правило, вносит меньший вклад в общее время простоя по сравнению с $t_{\text{пас}}$.

Время закрытия дверей — аналогично времени открытия дверей, этот компонент определяется техническими характеристиками транспортного средства и может рассматриваться как относительно постоянная величина.

Наибольшую неопределенность в расчет вносит время пассажирообмена. На величину $t_{\text{пас}}$ оказывают влияние такие факторы, как интенсивность пассажиропотока (количество входящих и выходящих людей), степень наполненности транспортного средства, применяемые способы оплаты проезда, выбор транспортного средства для обслуживания маршрута и его конструктивные особенности (количество и ширина дверей), категории пассажиров и др.

Время пассажирообмена непосредственно влияет на суммарное время простоя транспортного средства на промежуточных остановочных пунктах, являясь одним из слагаемых при его расчете, а также на пропускную способность остановочного пункта, провозную способность маршрута и, следовательно, на время оборотного рейса $t_{\text{об}}$, что в конечном итоге влияет на расчетное количество потребного подвижного состава.

Расчет нормативного времени простоя на промежуточных остановочных пунктах может быть выполнен по формуле

$$t_{\text{оп}}^{\text{н}} = \frac{3t_{\text{оп}}^{\text{мин}} + 2t_{\text{оп}}^{\text{макс}}}{5} = \frac{2t_{\text{оп}}^{\text{мин}} + 3t_{\text{оп}}^{\text{макс}}}{5}.$$

Время оборотного рейса определяется по формуле

$$t_{\text{об}} = t_{\text{дв}} + \sum_{k=1}^{n_{\text{оп}}} t_{\text{оп } k} + \sum t_{\text{ко}}.$$

Увеличение $t_{\text{пас}}$ приводит к увеличению $t_{\text{об}}$, что при фиксированной структуре парка подвижного состава увеличивает интервал движения, снижая регулярность и качество транспортного обслуживания населения.

При этом время пассажирообмена является функцией от двух ключевых переменных: количества входящих и выходящих пассажиров $N_{\text{пас}}$ и среднего времени, затрачиваемого одним пассажиром на вход или выход $t_{\text{пв}}$. Математически это можно представить как:

$$t_{\text{пв}} = f(N_{\text{пас}}, t_{\text{пв}}).$$

Время пассажирообмена влияет на производительность подвижного состава. Так, например, при увеличении производительность уменьшается асимптотически приближаясь к нулю $t_{\text{поп}} \rightarrow \infty, Wp = 0$.

Зависимость производительности от можно определить, приняв ее за переменную величину при фиксированных значениях остальных переменных. Пределы ее изменения, приняв минимальное количество $n_{оп} = 0$ (экспрессный режим, где производительность достигает своего максимума), можно получить из уравнения, график которой представляет собой равнобочную гиперболу:

$$t_{оп}W_p - q\gamma l_m + l_m/V_l W_p = 0.$$

Учитывая изложенное, направлением исследования является расчет статистических характеристик времени входа и выхода пассажиров на промежуточных остановочных пунктах регулярных маршрутов НППТ (определение среднего значения, стандартного отклонения, доверительного интервала и закона распределения) и выявление корреляционной связи между временем пассажирообмена и количеством входящих и выходящих пассажиров.

Методика натурных обследований и статистического анализа времени пассажирообмена

Гипотезы исследования:

1. Время входа и выхода пассажира на промежуточном остановочном пункте подчинено нормальному закону распределения.

2. Время пассажирообмена на промежуточном остановочном пункте имеет статистически значимую корреляционную связь с количеством входящих и выходящих пассажиров.

Задачи исследования:

1. Разработать методику сбора данных о времени посадки и высадки пассажиров на промежуточных остановочных пунктах НППТ.

2. Организовать и провести натурные обследования времени посадки и высадки пассажиров на различных маршрутах НППТ.

3. Провести статистический анализ полученных данных, включающий:

- расчет основных статистических показателей времени посадки и высадки пассажиров (среднее значение, стандартное отклонение, доверительный интервал);

- проверку гипотезы о соответствии эмпирического распределения времени посадки и высадки пассажиров нормальному закону распределения с использованием критериев согласия;

- оценку корреляционной связи между временем пассажирообмена и количеством входящих и выходящих пассажиров.

Для достижения поставленной цели и проверки сформулированных гипотез разработана методика сбора данных, основанная на проведении натурных обследований времени простоя транспортных средств на промежуточных остановочных пунктах регулярных маршрутов НППТ. В рамках обследований последовательно регистрировались следующие параметры: время прибытия транспортного средства на остановочный пункт $t_{приб}$; время начала пассажирообмена $t_{нач_пас}$; время окончания пассажирообмена $t_{кон_пас}$; время отправления транспортного средства с остановочного пункта $t_{отпр}$; количество вышедших пассажиров $N_{вых}$; количество вошедших пассажиров $N_{вх}$. На основе этих данных рассчитывались следующие показатели.

Время простоя на промежуточном остановочном пункте:

$$t_{поп} = t_{отпр} - t_{приб}.$$

Время пассажирообмена:

$$t_{пас} = t_{кон_пас} - t_{нач_пас}.$$

Интенсивность пассажирообмена:

$$N_{пас} = N_{вых} + N_{вх}.$$

Время входа-выхода одного пассажира на остановочном пункте:

$$t_{пв} = \frac{t_{пас}}{N_{пас}}.$$

Для автоматизации процесса сбора и обработки данных разработано клиент-серверное web-приложение (рис. 1, 2).

Приложение функционирует следующим образом:

Обследование времени стоянки автобусов

Изменить маршрут
Маршрут: 905

Тип автобуса: БК городской

БК

Городской
 Пригородный
 Междугородный

Автобус остановился на ОП

Начать заново

Рис. 1. Пользовательский интерфейс клиент-серверного web-приложения для обследований времени пассажирообмена на промежуточных остановочных пунктах регулярных маршрутов НППТ

1. Подготовительный этап:

- на клиентском устройстве (например, смартфоне или планшете) в web-интерфейсе приложения фиксируется номер обследуемого маршрута;

- выбирается типаж транспортного средства: тип планировки салона (городской, пригородный, междугородный) и класс вместимости (в соответствии с 220-ФЗ: особо малый класс, малый класс, средний класс, большой класс, особо большой класс).

2. Проведение замеров времени:

- учетчик фиксирует наступление ключевых событий, связанных с остановкой транспортного средства;

- при наступлении каждого события учетчик нажимает на кнопку в web-интерфейсе приложения, каждое нажатие кнопки соответствует определенному событию (начало пассажирообмена, окончание пассажирообмена и т. д.);

- одновременно с фиксацией времени учетчик подсчитывает количество входящих и выходящих пассажиров.

3. Сохранение данных: информация о времени нажатия кнопки (с точностью до миллисекунд) и количестве

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Дата и время	Маршрут	Класс вместимости	Тип планировки	Остановились	Открыты двери	Двери закрываются	Отъехали	Вышло	Вошло
68	05.09.2024 19:34:41	905 БК	БК	городской	1725554047065	1725554049992	1725554065595	1725554071747	8	6
69	05.09.2024 19:41:22	905 БК	БК	городской	1725554450116	1725554453001	1725554468246	1725554473405	11	6
70	05.09.2024 19:48:52	905 БК	БК	городской	1725554899248	1725554902968	1725554911250	1725554923249	9	0
71	05.09.2024 19:50:03	905 БК	БК	городской	1725554976451	1725554979969	1725554989508	1725554994800	8	1
72	05.09.2024 19:53:03	905 БК	БК	городской	1725555159445	1725555162598	1725555169876	1725555175491	6	0
73	06.09.2024 8:36:54	851 ОБК	БК	городской	1725600993024	1725600995321	1725600998095	1725601005695	2	1
74	09.09.2024 18:46:09	403 БК	БК	городской	1725896738981	1725896741785	1725896752680	1725896760992	2	6
75	09.09.2024 18:51:35	403 БК	БК	городской	1725897060416	1725897062270	1725897078148	1725897085396	2	9
76	09.09.2024 18:54:41	403 БК	БК	городской	1725897237415	1725897240025	1725897256668	1725897270964	8	7
77	09.09.2024 18:57:06	403 БК	БК	городской	1725897393425	1725897396138	1725897407065	1725897417271	5	4
78	09.09.2024 18:58:02	403 БК	БК	городской	1725897453616	1725897456547	1725897462796	1725897474043	3	2
79	09.09.2024 18:59:08	403 БК	БК	городской	1725897523879	1725897526987	1725897535582	1725897540128	3	1

Рис. 2. Фрагмент таблицы базы данных приложения для обследований времени пассажирообмена на промежуточных остановочных пунктах регулярных маршрутов НППТ

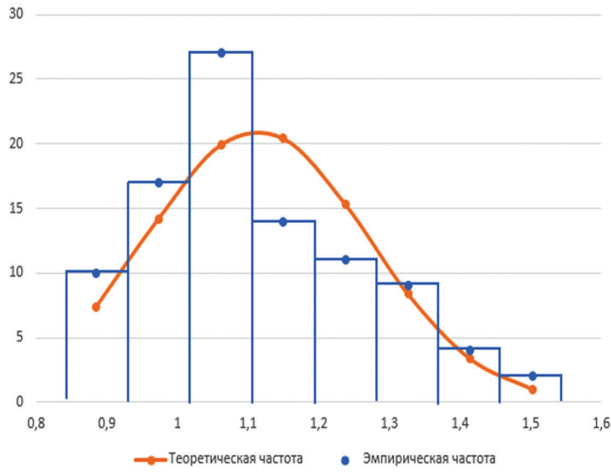


Рис. 3. Гистограмма эмпирических и теоретических частот времени входа-выхода пассажира на остановочном пункте НППТ

пассажира автоматически передается на сервер и сохраняется в базе данных в рамках каждой остановки транспортного средства.

Эмпирические данные и статистические закономерности процесса посадки-высадки пассажиров

Характеристика обследования:

- обследование проводилось в период с сентября по декабрь 2024 г. на шести регулярных маршрутах Москвы;
- замеры проводились для автобусов большого и особо большого классов (согласно 220-ФЗ) I типа планировки (согласно ООН36) и фокусировались на времени пассажирообмена через центральную двойную дверь транспортного средства;
- в ходе обследования выполнено более 160 замеров времени простоя на остановочных пунктах.

Обработка результатов обследования производилась на основе ГОСТ Р 8.736–2011 по следующей процедуре:

1. Исключение систематических погрешностей.
2. Проверка наличия грубых погрешностей и при необходимости их исключение.
3. Вычисление статистических показателей.
4. Проверка распределения эмпирических данных на нормальность.
5. Расчет коэффициента корреляции между количеством пассажиров и временем пассажирообмена на остановочных пунктах.

Исходные данные для анализа:

- первоначально выполнено 160 замеров времени простоя на остановочных пунктах;

- после исключения замеров с общим количеством входящих и выходящих пассажиров менее пяти человек для дальнейшей обработки отобрано 98 замеров;

- в результате проверки на наличие грубых погрешностей отбраковано четыре замера;

- для окончательного статистического анализа использовались данные 94 замеров. Данное количество является достаточным для получения достоверных результатов.

Результаты статистического анализа времени входа-выхода одного пассажира на остановочном пункте по результатам проведенного обследования: выборочное среднее – 1,113 с; выборочная медиана – 1,0845 с; оценка дисперсии – 0,0245; оценка среднего квадратического отклонения – 0,157; коэффициент вариации – 14,07%; асимметрия – 0,665032; эксцесс составил –0,0567; стандартная ошибка выборки для среднего – 0,0162; уровень значимости – 0,05; предельная ошибка выборки – 0,032; нижняя доверительная граница – 1,080; верхняя доверительная граница – 1,145.

Полученное значение коэффициента вариации (14,07%) свидетельствует о слабой вариации данных и однородности выборки. Это позволяет сделать вывод о высокой надежности полученных результатов. С вероятностью 95 % можно утверждать, что истинное среднее значение времени посадки и высадки в расчете на одного пассажира для генеральной совокупности находится в пределах доверительного интервала 1,080–1,145 с. Среднее значение времени посадки и высадки пассажира на остановочном пункте НППТ

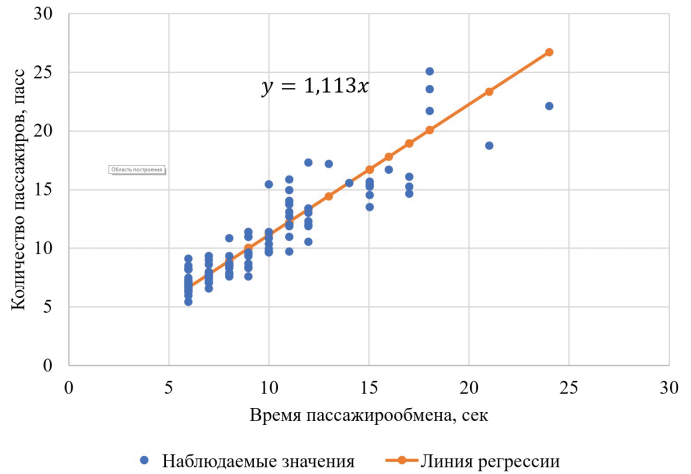


Рис. 4. Наблюдаемые значения и линия регрессии при оценке корреляционной связи между временем пассажирообмена и количеством входящих и выходящих пассажиров

по результатам обследования составило 1,113 с.

Проверка гипотезы о нормальности распределения времени посадки и высадки проводилась по критерию Пирсона при уровне значимости 0,05. Гистограмма эмпирических и теоретических частот представлена на рис. 3.

Массив данных разбит на семь интервалов, чтобы эмпирическая частота в каждом интервале была более пяти значений. В результате расчетов получено наблюдаемое значение критерия $\chi^2_{набл} = 7,912$. Критическое значение критерия при уровне значимости 0,05 и четырех степеней свободы $\chi^2_{кр} = 9,488$. Поскольку $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$, то гипотеза о нормальном распределении случайной величины принимается.

Дополнительным подтверждением соответствия эмпирического распределения нормальному являются следующие аналитические признаки: математическое ожидание (1,113), мода (1,06) и медиана (1,0845) достаточно близки друг к другу; выполняется правило «трех сигм» – все наблюдаемые значения попадают в интервал (0,640; 1,585); коэффициенты асимметрии (0,665) и эксцесса (–0,0567) близки к нулю.

Для оценки взаимосвязи между временем пассажирообмена $t_{пас}$ и количеством входящих и выходящих пассажиров $N_{пас}$ рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. Графически результаты представлены на рис. 4. Полученное значение коэффициента корреляции составило 0,91. В соответствии со шкалой Чеддока это свидетельствует о высокой положительной корреляционной связи между временем пассажирообмена и количеством входящих и выходящих пассажиров.

Заключение

В результате проведенного исследования времени простоя транспортных средств на промежуточных остановочных пунктах регулярных маршрутов НППТ получены следующие основные выводы:

1. Подтверждено, что время входа и выхода одного пассажира при пассажирообмене на промежуточном остановочном пункте НППТ подчиняется нормальному закону распределения.

2. Определены параметры нормального закона распределения времени входа и выхода одного пассажира при использовании двойной двери транспортного средства I типа планировки: математическое ожидание составляет 1,113 с, а среднеквадратическое отклонение — 0,157 с. Полученные параметры могут быть использованы для повышения точности расчетов времени оборота и имитационного моделирования маршрутов НППТ.

3. Установлено наличие очень высокой положительной корреляционной связи (коэффициент корреляции равен 0,91) между количеством входящих и выходящих пассажиров и временем пассажирообмена на промежуточном остановочном пункте. Это подтверждает значительное влияние интенсивности пассажиропотока на продолжительность простоя транспортного средства.

Проведенное исследование позволило получить научно обоснованные данные о времени пассажирообмена на промежуточных остановочных пунктах, что является необходимым условием для разработки точных имитационных моделей и цифровых двойников транспортных процессов и систем. Полученные параметры могут быть непосредственно использованы при создании и калибровке имитационных моделей, повышая их адекватность и прогностическую способность.

Полученные результаты открывают широкие перспективы для дальнейших исследований, направленных на создание комплексных имитационных моделей и цифровых двойников НППТ. В частности, представляется целесообразным:

- провести анализ других составляющих времени остановки транспортного средства на промежуточном остановочном пункте, таких как время открытия и закрытия дверей, а также время визуального контроля водителем;
- определить параметры распределения времени входа и выхода пассажиров

при использовании одинарной двери или других типов транспортных средств, а также для различных категорий пассажиров (маломобильные группы населения, пассажиры с детьми и т. д.);

- изучить влияние на время пассажирообмена других факторов, таких как коэффициент наполнения транспортного средства, способы оплаты проезда и др.;

- расширить перечень исследуемых параметров, необходимых для создания адекватных имитационных моделей, включая время торможения и разгона транспортных средств, зависимость скорости движения от времени суток и загрузки сети, влияние наличия выделенной полосы, а также учет состояния и загрузки отдельных объектов транспортной инфраструктуры (остановочных пунктов, перекрестков и т. д.);

- провести верификацию и валидацию имитационных моделей с использованием реальных данных о работе НППТ для оценки их точности и адекватности.

- разработать и протестировать алгоритмы оптимизации расписания и маршрутной сети на основе имитационных моделей и цифровых двойников НППТ. ■

Источники

1. Букринская Э. М. Логистика города. СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2015. 83 с. EDN: XVANWF.
2. Кузнецова Л. П., Семенихин Б. А., Пассажирские перевозки: Учебное пособие. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. 153 с. EDN: URXFZT.
3. Zhukov A. I., Moroz D. G. Simulation Modeling of a Bus // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 Conference Proceedings, Moscow, 11–12 November 2021. Moscow, 2021. DOI: 10.1109/TIRVED53476.2021.9639219. EDN: EC-TXYF.
4. Липенков А. В. Имитационная модель остановочного пункта городского пассажирского транспорта // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2013. № 4(101). С. 50–55. EDN: SEZWTL.
5. Кудряшов М. А., Айриев Р. С., Прокопенков А. В. Аprobация методики оценки качества транспортного обслуживания // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 2(81). С. 154–164. DOI: 10.3093

2/1992-3252-2019-17-2-154-164. EDN: MEXRAE.

6. Калюжный М. В. Моделирование продолжительности простоя транспортных средств на остановочных пунктах маршрута городского пассажирского транспорта // Вестник Донецкого института автомобильного транспорта. 2009. № 2. С. 14–18.
7. Богумил В. Н., Ефименко Д. Б., Кузнецов К. А. Расчет количества входящих и выходящих пассажиров на основе обработки времени простоя транспортного средства на остановочном пункте // Автотранспортное предприятие. 2013. № 9. С. 26–30.
8. Asgharzadeh, M., Shafahi, Y., Real-time bus-holding control strategy to reduce passenger waiting time // Transportation Research Record. № 2647(1). 2017. pp.9–16.
9. Stradling S., Carreno M., Rye T., Noble A. Passenger perceptions and the ideal urban bus journey experience // Transport policy. № 14(4). 2007. pp. 283–292.
10. Markevych A., Vdovychenko V., Ivanov I. Influence of bus service downtime in the transport interchange on the duration of inter-route transfer of passengers // Technology audit and production reserves. № 3(2/59). 2021. pp. 41–55.
11. D'Souza C., Paquet V., Lenker J. A., Steinfeld E. Effects of transit bus interior configuration on performance of wheeled mobility users during simulated boarding and disembarking // Applied Ergonomics. 2017. Vol. 62. P.94–106. DOI: 10.1016/j.apergo.2017.02.008.
12. Tirachini, A. Bus dwell time: the effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers // Transportmetrica A: Transport Science. 2013. № 9(1), pp.28–49.
13. Дамле У. Тестирование удобства использования аппарелей для посадки и высадки пассажиров общественного транспорта: дис. ... Буффало: Университет штата Нью-Йорк в Буффало, 2010. URL: <https://www.proquest.com/openview/c69680d7d46a4d343b2b972ebac339c5/1?pqorigsite=gscholar&cbl=18750> (дата обращения: 07.11.2025).
14. Mahdaviyayen M., Paquet V., He Q. Using microsimulation to estimate effects of boarding conditions on bus dwell time and schedule adherence for passengers with mobility limitations // Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. 2020. Vol. 146. № 6. P. 04020046.