

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.072

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-74>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ С УЧЁТОМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРУПП ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Х. М. А. Асфур¹, Н. К. Горяев²

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

¹ e-mail: iraqieng2003@gmail.com

² e-mail: gorjaevnk@susu.ru

В. И. Рассоха

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

e-mail: cabin2012@yandex.ru

Аннотация. Транспортные системы современных городов во многом определяют качество жизни городского населения. Повышение роли городского пассажирского транспорта общего пользования, увеличение объёмов перевозок, совершаемых этим видом транспорта, традиционно рассматривается как одно из направлений снижения остроты городских транспортных проблем. В этой связи, исследование, направленное на повышение производительности городского пассажирского транспорта, в том числе за счёт увеличения пропускной способности городской транспортной инфраструктуры, является актуальным. Исходя из актуальности рассматриваемой тематики и подходов, обеспечивающих повышение производительности пассажирских транспортных систем при минимальном объёме инвестиционных вложений, сформулирована цель исследования: повышение эффективности работы городского пассажирского транспорта общего пользования на основе реализации мероприятий по повышению пропускной способности участков улично-дорожной сети. Для разработки мероприятий, формирующих условия организации движения пассажирских транспортных средств, разработана математическая модель пропускной способности участка улично-дорожной сети, позволяющая выявить сочетание параметров транспортной инфраструктуры, обеспечивающее её максимальное значение. От известных аналогов разработанная модель отличается учётом процесса самопроизвольного формирования групп пассажирских транспортных средств и реализацией возможности их синхронного взаимодействия с площадками остановочного пункта. По результатам моделирования определены зависимости пропускной способности участка улично-дорожной сети с выделенной полосой для движения пассажирских транспортных средств от параметров светофорного регулирования и количества посадочных площадок на остановочном пункте. Комплексное применение полученных данных позволяет определить сбалансированные параметры остановочных пунктов и светофорных объектов, обеспечивающие максимальную пропускную способность рассматриваемого участка. Разработанная математическая модель и полученные с её помощью зависимости составляют пункты научной новизны выполненного исследования. Разработанные теоретические положения, сформированная на их основе математическая модель и полученные зависимости в совокупности можно рассматривать как инструмент, позволяющий определить оптимальные параметры городской транспортной инфраструктуры, что составляет практическую значимость полученных результатов. В качестве одного из перспективных направлений развития предложенного подхода планируется расширение области его применения за счёт разработки дополнения, обеспечивающего его реализацию для случая движения пассажирских транспортных средств в общем потоке вне выделенной полосы.

Ключевые слова: городской пассажирский транспорт, пропускная способность, пассажирские перевозки, транспортная инфраструктура, улично-дорожная сеть, транспортные средства.



Для цитирования: Асфур Х. М. А., Горяев Н. К., Рассоха В. И. Моделирование пропускной способности участка улично-дорожной сети с учётом формирования групп транспортных средств // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 6. – С. 74–88. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-74>.

Original article

MODELING THE CAPACITY OF A SECTION OF THE ROAD NETWORK, TAKING INTO ACCOUNT THE FORMATION OF GROUPS OF VEHICLES

H. M. A. Asfur¹, N. K. Goryaev²

South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

¹ e-mail: iraqieng2003@gmail.com

² e-mail: goriaevnk@susu.ru

V. I. Rassokha

Orenburg State University, Orenburg, Russia

e-mail: cabin2012@yandex.ru

Abstract. *The transport systems of modern cities largely determine the quality of life of the urban population. Increasing the role of urban public passenger transport, increasing the volume of traffic carried out by this type of transport, is traditionally considered as one of the ways to reduce the severity of urban transport problems. In this regard, a study aimed at improving the productivity of urban passenger transport, including by increasing the capacity of urban transport infrastructure, is relevant. Based on the relevance of the topic under consideration and approaches that ensure an increase in the productivity of passenger transport systems with a minimum amount of investment, the purpose of the study is formulated: improving the efficiency of public urban passenger transport through the implementation of measures to increase the capacity of the most critical sections of the road network. To develop measures that form the conditions for organizing the movement of passenger vehicles, a mathematical model of the capacity of a section of the street and road network has been developed, which allows to identify a combination of transport infrastructure parameters ensuring its maximum value. The developed model differs from the known analogues by taking into account the process of spontaneous formation of groups of passenger vehicles and the realization of the possibility of their synchronous interaction with the platforms of the stopping point. Based on the simulation results, the dependences of the capacity of a section of the street and road network with a dedicated lane for passenger vehicles on the parameters of traffic light regulation and the number of landing sites at the stop point were determined. The integrated application of the data obtained allows us to determine the balanced parameters of stopping points and traffic lights that ensure maximum throughput of the site under consideration. The developed mathematical model and the dependencies obtained with its help constitute the points of scientific novelty of the performed research. The developed theoretical provisions, the mathematical model formed on their basis and the obtained dependencies together can be considered as a tool for determining the optimal parameters of urban transport infrastructure, which is the practical significance of the results obtained. One of the promising directions for the development of the proposed approach is to expand the scope of its application by developing an add-on that ensures its implementation for the case of passenger vehicles moving in the general flow outside the allocated lane.*

Key words: *urban passenger transport, capacity, passenger transportation, transport infrastructure, road network, vehicles.*

Cite as: Asfur, H. M. A., Goryaev, N. K., Rassokha, V. I. (2024) [Modeling the capacity of a section of the road network, taking into account the formation of groups of vehicles]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 6, pp. 74–88. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-74>.

Введение

Одной из типовых тенденций развития современных городских территорий является повышение уровня автомобилизации и связанное с этим обострение транспортных проблем. Повышение привлекательно-

сти и производительности городского пассажирского транспорта общего пользования традиционно рассматривается как одно из актуальных направлений уменьшения интенсивности городских транспортных потоков при условии полного удовлетворения транспорт-

ных потребностей населения. Но увеличение объёма перевозок, выполняемых городским пассажирским транспортом общего пользования, за счёт увеличения численности пассажирских транспортных средств, является причиной избыточной нагрузки на городскую транспортную инфраструктуру и приводит к формированию заторных процессов на наиболее критичных объектах, к числу которых традиционно относятся остановочные пункты и регулируемые пересечения. В свете вышеизложенного, под производительностью понимается отношение годового объёма перевозок, выполняемых городским пассажирским транспортом общего пользования к численности транспортных средств, обслуживающих регулярные городские маршруты. То есть, производительность – это средний объём перевозок, выполняемый одним транспортным средством. Разработка мероприятий, направленных на снижение вероятности формирования заторов на критичных объектах дорожной инфраструктуры, в том числе на остановочных пунктах, способствует повышению скорости сообщения, и, как следствие, производительности городского пассажирского транспорта.

Обозначенные выше проблемы определяют актуальность исследования, направленного на разработку комплекса мероприятий, обеспечивающих повышение пропускной способности объектов транспортной инфраструктуры.

Обзор литературы

В рассмотренных научных публикациях отмечено, что качество транспортного обслуживания городского населения транспортом общего пользования определяется комплексом разноплановых и взаимосвязанных показателей, ряд из которых связан с увеличением численности транспортных средств. Следствием данного подхода является формирование заторных процессов на остановочных пунктах, что приводит к снижению эффективности работы городского пассажирского транспорта. Качество транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом общего пользования стало объектом исследований следующих учёных: С. А. Аземша, Ю. Л. Власов, В. В. Дедюкин, Д. А. Дрючин, М. М. Исхаков, О. Н. Ларин, А. И. Петров, В. И. Рассоха, И. В. Спирин, Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина, Fernandez R., Robbins G., Tyler N. и др. [1; 3; 7; 9; 14; 16; 17; 19; 20; 21; 23; 24; 26; 27].

Результаты системного анализа транспортных проблем современных городов, а также методы их решения, основанные на совершенствовании организации работы городского пассажирского транспорта общего пользования, приведены в работах А. С. Баннова, В. Н. Богумила, А. В. Вельможина, И. В. Влацкой, Д. Б. Ефименко, А. Е. Кравченко, О. Н. Ларина,

А. В. Литвинова, Р. Бобингера и других авторов [2; 4; 9; 10; 13; 15; 22].

Влияние параметров транспортной инфраструктуры и параметров организации движения на пропускную способность остановочных пунктов описано в научных трудах А. В. Липенкова и А. В. Зедгенизова [5; 6; 11; 12]. Указанные исследователи представили описание математических моделей, отражающих взаимное влияние факторов, определяющих величину пропускной способности элементов пассажирской транспортной инфраструктуры. Являясь методической базой моделирования транспортных процессов, указанные научные работы, однако, не содержат информации о влиянии условий формирования групп транспортных средств на пропускную способность элементов транспортной инфраструктуры.

Анализ содержания научных работ вышеуказанных авторов, а также работ С. А. Аземша, М. М. Исхакова, О. Г. Коптелова, В. И. Рассохи, Г. В. Таубкина [1; 7; 8; 16; 17; 18] позволил произвести группировку факторов, определяющих пропускную способность остановочных пунктов. Предложенная систематизация позволила структурировать обозначенные группы факторов и научные исследования в данной области.

По результатам литературного обзора выдвинута гипотеза о том, что повышение пропускной способности участка улично-дорожной сети может быть обеспечено за счёт формирования групп транспортных средств, синхронно обслуживаемых остановочными пунктами.

Предложенный подход наиболее эффективен для случаев, когда возможности снижения заторных процессов на остановочных пунктах за счёт реализации мероприятий технологического или организационного характера, связанных с изменением расписания и структуры парка, исчерпаны. Кроме того, внедрение предложенного подхода при неизменных организационно-технологических параметрах транспортного обслуживания населения однозначно не приводит к снижению показателей качества транспортного обслуживания населения.

Исходя из предлагаемого подхода к решению обозначенной проблемы, сформулирована цель исследования – повышение эффективности работы городского пассажирского транспорта общего пользования на основе реализации мероприятий по повышению пропускной способности участков улично-дорожной сети.

Теоретическая часть

Производительность работы городского пассажирского транспорта общего пользования на рассматриваемом участке улично-дорожной сети во многом определяется пропускной способностью основных

его элементов: выделенной полосы (Q_r), регулируемых перекрестков (Q_j) и остановочных пунктов (Q_s). Очевидно, что общая пропускная способность участ-

ка улично-дорожной сети (Q_N) определяется элементом, имеющим минимальное значение:

$$\min\{Q_r; Q_j; Q_s\} \geq Q_N. \quad (1)$$

Пропускная способность регулируемого пересечения во многом определяется средним временем задержки транспортных средств. Значение данной величины определяется суммой, включающей в себя: задержку, связанную с замедлением; задержку, обусловленную простоем; задержку в период разгона до скорости транспортного потока. Остановка транс-

портного средства на регулируемом перекрёстке рассматривается как случайное событие, реализуемое с вероятностью, определяемой соотношением продолжительностей фаз разрешающих и запрещающих сигналов светофоров. Итоговая формула для расчёта среднего времени задержки имеет вид:

$$t_j = \left(\frac{v}{7,2 \cdot |J_{deceler}|} + c - g + \frac{v}{7,2 \cdot a_{acl}} \right) \cdot \frac{(c - g)}{c}, \quad (2)$$

где

v – скорость движения пассажирского транспортного средства перед зоной замедления, км/ч;

g – длительность фазы разрешающего сигнала светофора, с;

c – полная длительность цикла регулирования, с;

$J_{deceler}$ – среднее замедление пассажирского транспортного средства, обусловленное торможением при остановке на остановочном пункте или регулируемом пересечении, м/с²;

a_{acl} – ускорение пассажирских транспортных средств до момента достижения средней скорости потока, м/с².

Задержка транспортного средства на остановочном пункте обусловлена потерями времени, связанными с замедлением в зоне подъезда к остановочному пункту; продолжительностью простоя в процессе посадки и высадки пассажиров и потерями времени

в процессе разгона при выезде с остановочного пункта до средней скорости транспортного потока. Система выражений для расчёта величины задержки транспортного средства на остановочном пункте имеет вид:

$$t_s = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{v}{J_{deceler}} + \frac{v}{a_{acl}} - \frac{(S_{de} + S_{ac}) \cdot 3,6}{v}, & \Delta S_{de} \leq 0, \Delta S_{ac} \leq 0 \\ \frac{S_{de}}{v} + \frac{v}{2 \cdot J_{deceler}} + \frac{v}{a_{acl}} - \frac{(S_{de} + S_{ac}) \cdot 3,6}{v}, & \Delta S_{de} > 0, \Delta S_{ac} \leq 0 \\ \frac{v}{a_{de}} + \frac{S_{ac}}{v} + \frac{v}{2 \cdot a_{acl}} - \frac{(S_{de} + S_{ac}) \cdot 3,6}{v}, & \Delta S_{de} \leq 0, \Delta S_{ac} > 0 \\ \frac{S_{de}}{v} + \frac{S_{ac}}{v} + \frac{v}{2 \cdot J_{deceler}} + \frac{v}{2 \cdot a_{acl}} - \frac{(S_{de} + S_{ac}) \cdot 3,6}{v}, & \Delta S_{de} > 0, \Delta S_{ac} > 0 \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где

S_{de} – длина зоны въезда транспортных средств на остановочный пункт, м;

S_{ac} – длина зоны выезда транспортных средств от остановочного пункта, м.

Въезд пассажирских транспортных средств на рассматриваемый участок улично-дорожной сети осуществляется с частотой, определяемой интервалом их движения. В рамках проводимого исследования, под термином «участок улично-дорожной сети»

понимается отрезок магистральной городской улицы с выделенной полосой для движения пассажирских транспортных средств, включающий в себя регулируемое пересечение и остановочный пункт. Формула для расчёта частоты движения имеет вид:

$$v_{TC} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{I_i} \right), \quad (4)$$

где

v_{TC} – частота поступления транспортных средств на рассматриваемый участок улично-дорожной сети, ед/с;
 m – количество маршрутов, проходящих через рассматриваемый участок улично-дорожной сети, ед.;
 I_i – интервал движения пассажирских транспортных средств на i -ом маршруте, проходящем через рассматриваемый участок улично-дорожной сети в заданное время, с.

Самопроизвольное формирование групп пассажирских транспортных средств обеспечивается в том случае, если время задержки на регулируемом пересечении выше интервала поступления пассажирских транспортных средств на рассматриваемый участок. В то же время условие предотвращения образования

дорожного затора соблюдается в случае, когда пропускная способность участка улично-дорожной сети выше частоты движения транспортных средств. Система неравенств, характеризующих данные условия, имеет вид:

$$\begin{cases} Q_N \geq v_{TC} \\ t_j > 1/v_{TC} \end{cases} \quad (5)$$

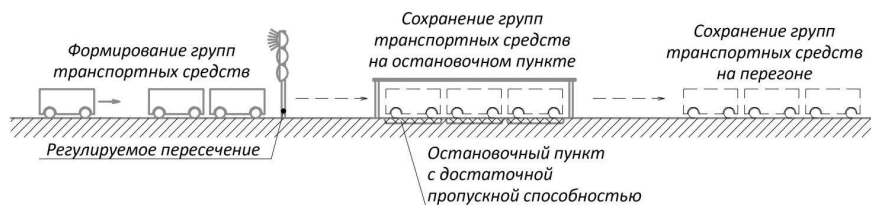
Исходя из соотношения продолжительности задержек и частоты поступления транспортных средств,

представляется возможным определить численность транспортных средств в формируемых группах:

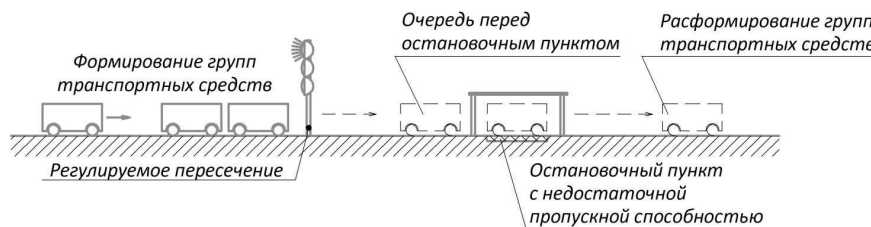
$$n_{\text{групп}} = t_j \cdot v_{TC}. \quad (6)$$

Очевидно, что максимальная пропускная способность остановочного пункта обеспечивается при количестве посадочных площадок большем или равном количеству транспортных средств в формируемых

группах. Процесс формирования групп транспортных средств проиллюстрирован при помощи схем, представленных на рисунке 1.



а) формирование и последующее сохранение групп транспортных средств



б) расформирование групп транспортных средств при выезде от остановочного пункта с недостаточной пропускной способностью

Рисунок 1. Схемы формирования групп пассажирских транспортных средств на участке улично-дорожной сети
 Источник: разработано авторами

Группа формируется в период задержки, когда первое транспортное средство группы останавливается на запрещающий сигнал светофора, а транспортные средства, следующие за ним, выстраиваются друг за другом. Дальнейшая целостность группы обеспечивается, если пропускная способность очередного и последующих остановочных пунктов превышает частоту поступления транспортных средств. Заданная пропускная способность остановочных пунктов обеспечивается за счёт организации на них необходимого количества посадочных площадок в количестве не менее численности транспортных средств в сформированных группах (рисунок 1а).

При недостаточной пропускной способности остановочного пункта не поместившиеся на нём транспортные средства производят посадку и высадку пассажиров с задержкой, когда впереди идущие транспортные средства покинут посадочные площадки. За время посадки и высадки пассажиров впереди идущие транспортные средства успевают отъехать от посадочной площадки на определённое расстояние. Таким образом, в данном случае происходит расформирование ранее образовавшихся групп транспортных средств (рисунок 1б).

Очевидно, что в период разрешающей фазы све-

тофорного регулирования происходит произвольное поступление транспортных средств на рассматриваемый участок улично-дорожной сети с частотой, равной средней частоте их движения. При повышенной длительности разрешающей фазы светофора численность не сгруппированных транспортных средств превысит численность транспортных средств в сформированных группах. Для предотвращения заторов в данной ситуации потребуется организация дополнительных посадочных площадок на остановочном пункте. Исходя из этого, отдельной задачей, решаемой по результатам моделирования, является определение соотношения фаз регулирования, при котором не создаётся дополнительная нагрузка, приводящая к формированию заторных процессов.

Основным целевым показателем, определяющим эффективность проектных решений, является пропускная способность участка улично-дорожной сети Q_N , которая, в свою очередь, определяется, исходя из минимального значения пропускной способности последовательно расположенных элементов дорожной инфраструктуры (регулируемое пересечение, остановочный пункт).

Формула для расчёта пропускной способности регулируемого пересечения имеет вид [25]:

$$Q_j = \frac{x_p \cdot (g-2) / c \cdot s_b}{f_b}, \quad (7)$$

где

Q_j – пропускная способность полосы на регулируемом пересечении, ед./ч;

x_p – максимально-допустимая степень насыщения регулируемого пересечения ($x_p = 0,9$);

g – длительность фазы разрешающего сигнала светофора, с;

$(g-2)$ – эффективная длительность фазы разрешающего сигнала светофора (при принятом времени задержки начала движения 2 с), с;

c – полная длительность цикла регулирования, с;

s_b – поток насыщения выделенной полосы движения транспортных средств, ед./ч ($s_b = 1900$ авт/час);

f_b – коэффициент эквивалентности для пассажирских транспортных средств рассматриваемых классов, легк. авт./автобус.

Пропускная способность остановочного пункта:

$$Q_s = \frac{3600 \cdot n \cdot x_s}{t_s + t_d}, \quad (8)$$

где

Q_s – пропускная способность остановочного пункта, ед./ч;

n – количество посадочных площадок на остановочном пункте, ед;

x_s – максимально допустимая степень насыщения остановочного пункта ($x_s = 0,9$);

t_s – время задержки транспортных средств на остановочном пункте без учёта затрат времени на посадку и высадку пассажиров, с;

t_d – затраты времени на посадку и высадку пассажиров одного транспортного средства, с.

Общее время посадки и высадки пассажиров t_d на остановочном пункте зависит от количества дверей

и организации процесса пассажирообмена. При посадке через одну дверь с двусторонним движением:

$$Q_s = \frac{3600 \cdot n \cdot x_s}{t_s + \beta_a \cdot P_a + \beta_b \cdot P_b}, \quad (9)$$

где

β_a – время высадки одного пассажира, с;

β_b – время посадки одного пассажира, с;

P_a – количество высаживаемых пассажиров из одного транспортного средства в 15-минутном интервале в пиковое время, чел.;

P_b – количество входящих пассажиров в одно транспортное средство в 15-минутном интервале в пиковое время, чел.

При посадке через две двери с односторонним движением:

$$Q_s = \frac{3600 \cdot n \cdot x_s}{t_s + \max \{(\beta_a \cdot P_a); (\beta_b \cdot P_b)\}}. \quad (10)$$

Представленные выражения являются основой разработанной математической модели пропускной способности участка улично-дорожной сети, включающего в себя выделенную полосу для движения пассажирских транспортных средств, регулируемое пересечение и остановочный пункт.

Схема алгоритма, определяющего последовательность действий, выполняемых в процессе моделирования пропускной способности участка улично-дорожной сети, представлена на рисунке 2.

Результаты исследования

В соответствии со схемой разработанного алгоритма, на примере одного из участков улично-дорожной

сети города Челябинска произведено моделирование его пропускной способности. Выбранный участок содержит выделенную полосу движения для пассажирских транспортных средств, регулируемый перекрёсток и остановочный пункт, расположенный на расстоянии 400 метров от перекрёстка. По выбранному участку проходит шесть маршрутов городского пассажирского транспорта. Данные, необходимые для моделирования, получены по результатам натурных наблюдений, выполненных в часы пиковых пассажиропотоков в рабочие дни в период с 15 сентября по 15 октября 2023 г. Числовые значения параметров исследуемого участка, используемые при моделировании в качестве постоянных величин, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметров исследуемого участка, используемые в качестве постоянных величин разработанной модели

Наименование параметра	Значение
Количество маршрутов, ед.	6
Средневзвешенное количество пассажиров, высаживаемых из одного транспортного средства в 15-минутном интервале в пиковое время, чел.	7
Количество входящих пассажиров в одно транспортное средство в 15-минутном интервале в пиковое время	8
Средневзвешенный коэффициент эквивалентности (определяется классом и категорией используемых транспортных средств)	2,8
Скорость движения транспортного средства перед зоной замедления, км/ч	42
Организация посадки и высадки пассажиров	Через две двери с односторонним движением

Источник: разработано авторами

По результатам моделирования получены данные, определяющие влияние параметров светофорного регулирования на пропускную способность участка улично-дорожной сети. Значения пропускной способ-

ности, полученные при организации пассажирообмена через две двери с односторонним движением, в виде графиков представлены на рисунке 3.

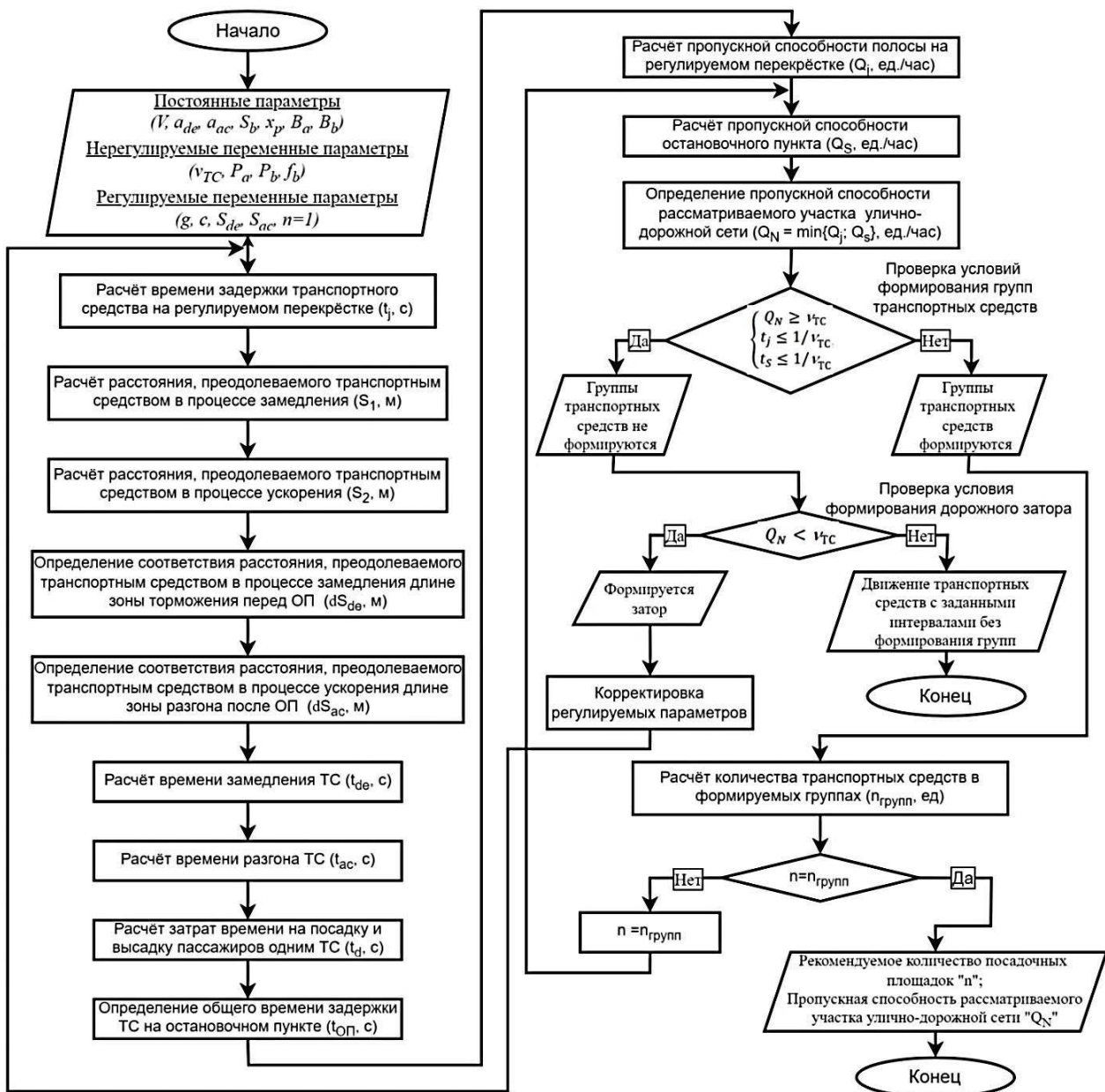


Рисунок 2. Схема алгоритма моделирования пропускной способности участка улично-дорожной сети
 Источник: разработано авторами

Установлено, что при соотношении длительности разрешающей фазы светофорного регулирования к полной длительности цикла менее 0,4 не требуется организация на остановочном пункте дополнительных площадок.

Аналогичные данные получены для случая, когда посадка и высадка пассажиров осуществляется через одну дверь с двусторонним движением. Полученные результаты проиллюстрированы в виде графиков, представленных на рисунке 4.

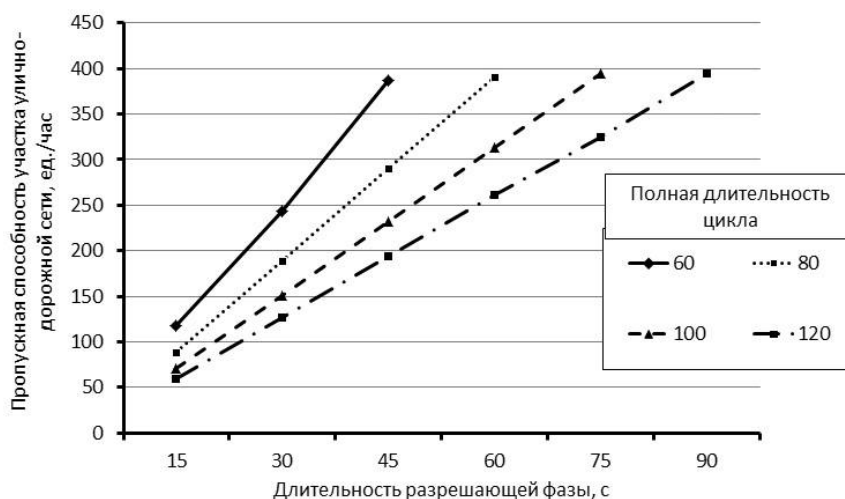


Рисунок 3. Зависимости максимальной пропускной способности участка улично-дорожной сети от параметров светофорного регулирования при посадке пассажиров через две двери с односторонним движением
 Источник: разработано авторами

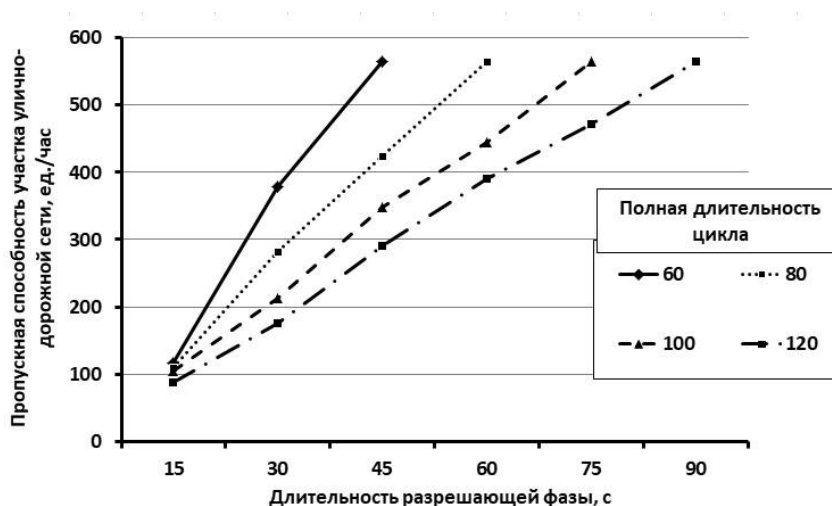


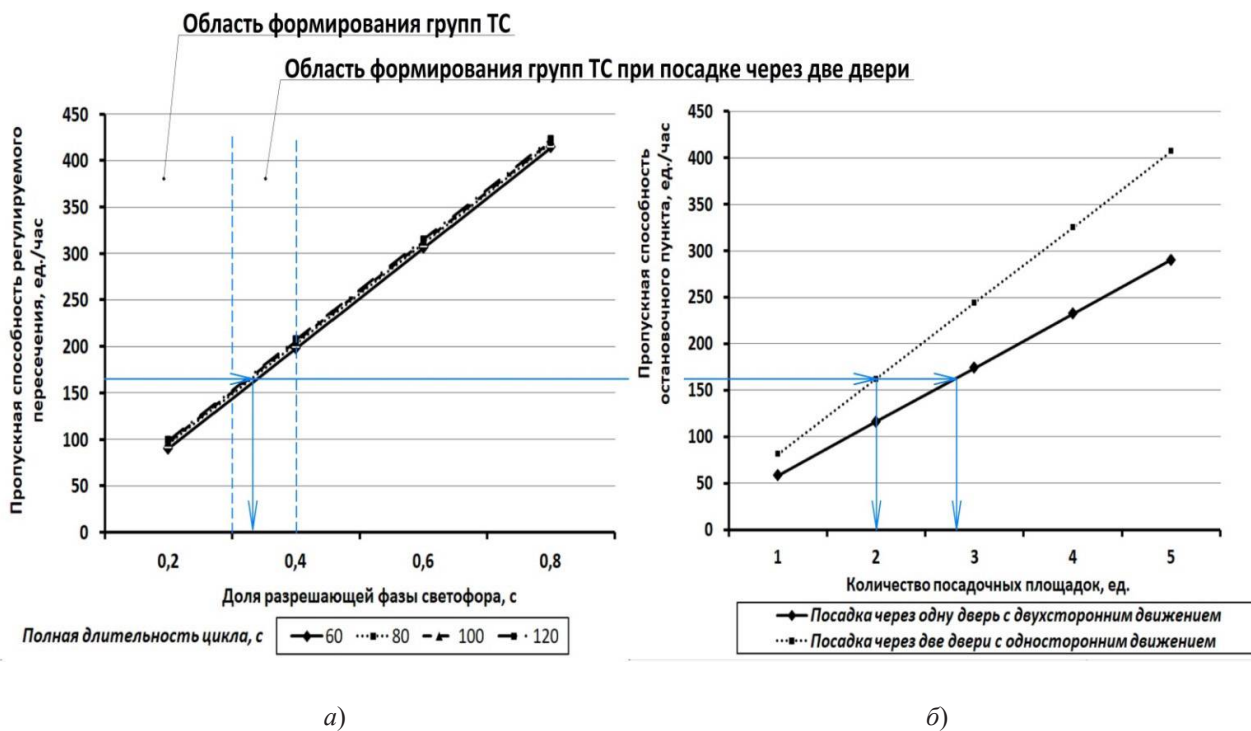
Рисунок 4. Зависимости максимальной пропускной способности участка улично-дорожной сети от параметров светофорного регулирования при посадке пассажиров через одну дверь с двусторонним движением
 Источник: разработано авторами

Установлено, что при посадке и высадке пассажиров через одну дверь не требуется организация на остановочном пункте дополнительных площадок при соотношении длительности разрешающей фазы светофорного регулирования к полной длительности цикла менее 0,3.

При помощи разработанной математической модели установлены зависимости пропускной способности регулируемого пересечения от соотношения фаз светофорного регулирования и зависимости пропускной способности остановочного пункта от количества

остановочных площадок. Данные зависимости приведены на рисунке 5.

Пропускная способность является исходным параметром, задаваемым при разработке задания на проектирование схем организации движения. Следовательно, полученные графики можно использовать для определения проектных параметров организации движения пассажирских транспортных средств на рассматриваемом участке. Схема, иллюстрирующая совместное использование полученных зависимостей, также представлена на рисунке 5.



а – зависимости пропускной способности полосы на регулируемом пересечении от соотношения продолжительности фаз светофорного регулирования; б – зависимости пропускной способности остановочного пункта от количества посадочных площадок.

Рисунок 5. Зависимости пропускной способности элементов улично-дорожной сети от параметров дорожной инфраструктуры

Источник: разработано авторами

Таким образом, получены результаты, имеющие практическую значимость и применимые при проектировании схем организации движения для обеспечения взаимно согласованных проектных параметров.

Заключение

На основе анализа вышеизложенного материала можно сделать вывод об успешном завершении основных этапов научного исследования. Исходя из результатов литературного обзора, разработана математическая модель пропускной способности участка улично-дорожной сети, позволившая определить зависимость пропускной способности от ключевых параметров организации движения пассажирских транспортных средств.

Полученные зависимости, а также математическая модель пропускной способности участка улично-дорожной сети отличаются от результатов известных научных исследований учётом процесса самопроизвольного образования групп транспортных средств и реализацией возможности их синхронного взаимо-

действия с пассажирами на остановочном пункте, что определяет ключевой признак их научной новизны.

Таким образом, можно сделать заключение о достижении поставленной цели исследования – повышении эффективности работы городского пассажирского транспорта общего пользования на основе реализации мероприятий по повышению пропускной способности наиболее критичных участков улично-дорожной сети.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке инструмента, позволяющего определить параметры организации движения пассажирских транспортных средств, обеспечивающие максимальную пропускную способность рассматриваемого участка улично-дорожной сети.

Наиболее перспективным направлением дальнейших исследований планируется усовершенствование разработанной математической модели до уровня, позволяющего расширить область её применения, например, для участков улично-дорожной сети без выделенной полосы для движения пассажирских транспортных средств.

Литература

1. Аземша С. А., Старовойтов А. Н., Скирковский С. В. Оптимизация интервалов движения транспортных средств при городских перевозках пассажиров в регулярном сообщении // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2013. – № 2 (27). – С. 52–57. – EDN: LAKSAV.
2. Богумил В. Н., Ефименко Д. Б. Использование моделей цифровой инфраструктуры в системе управления городским пассажирским транспортом // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021, 27 сентября – 02 октября 2021 года: Материалы XIV мультиконференции в 4 томах. Т. 4. – Ростов-на-Дону – Таганрог, 2021. – С. 23–26. – EDN: SSNDFF.
3. Бочаров И. А., Власов Ю. Л., Рассоха В. И. Модель определения оптимального количества маршрутных транспортных средств // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 10 (129). – С. 49–53. – EDN: PDRBUX.
4. Ефименко Д. Б., Барабанова Е. С., Ткачёв А. И. Применение цифровых технологий в развитии транспортного обеспечения внешнеэкономической деятельности // Вестник транспорта. – 2019. – № 10. – С. 14–17. – EDN: TKNLJD.
5. Зедгенизов А. В. Оценка времени освобождения остановочного пункта городского пассажирского транспорта // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2007. – № 4 (32). – С. 145–151. – EDN: JJPJSJ.
6. Зедгенизов А. В. Повышение эффективности функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2008. – № 3 (35). – С. 123–125. – EDN: JSAEPD.
7. Исахов М. М., Рассоха В. И. Комплексное исследование остановочных пунктов городского пассажирского транспорта г. Оренбурга // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – № 9 (73). – С. 207–214. – EDN: IJXAMR.
8. Исахов М. М., Рассоха В. И. «Человеческий фактор» в организации работы маршрутных транспортных средств на остановочных пунктах // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2008. – № 1 (80). – С. 144–149. – EDN: IJVGTV.
9. Ларин О. Н. Методология организации и функционирования транспортных систем регионов: монография. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 205 с. – EDN: QSLFQN.
10. Ларин О. Н., Кажаяев А. А. Снижение конфликтных ситуаций на остановочных пунктах маршрутных сетей городов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2012. – № 1. – С. 48–49. – EDN: OXEMQZ.
11. Липенков А. В. Исследование влияния регулируемого пересечения на пропускную способность остановочного пункта // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 9 (104). – С. 113–121. – EDN: UJWFKD.
12. Липенков А. В., Кузьмин Н. А., Ерофеева Л. Н. Математическая модель пропускной способности остановочного пункта в случае отсутствия маневров по обгону автобусами друг друга // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 4 (179). – С. 87–94. – EDN: UHINJR.
13. Литвинов А. В. Оценка стоимости времени передвижения на основе моделей выбора способа передвижения // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 11. – С. 45–48. – <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2020-11-8>. – EDN: FJNRDQ.
14. Петров А. И. Социологические аспекты среднесрочной динамики организованности перевозочного процесса на городских автобусных маршрутах Тюмени // Транспорт Урала. – 2022. – № 2 (73). – С. 9–16. – <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-2-9-16>. – EDN: SIAJMA.
15. Прогнозирование пассажиропотоков в городской транспортной системе / А. С. Баннов [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. – 2007. – Т. 2. – № 8 (34). – С. 95–98. – EDN: KWENXD.
16. Рассоха В. И., Надирян С. Л. Моделирование показателей эффективности городского пассажирского транспорта при обслуживании нестационарных пассажиропотоков // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 4-1 (83). – С. 81–90. – [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1\(83\)-81-90](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1(83)-81-90). – EDN: ITMBKX.
17. Рассоха В. И., Дрючин Д. А., Надирян С. Л. Оптимизация структуры парка безрельсовых транспортных средств, обслуживающих городские пассажирские маршруты, на основе результатов математического моделирования // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13. – № 3. – С. 180–202. – <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-180-202>. – EDN: PMCPSJ.

18. Таубкин Г. В., Коптелов О. Г. Изменение времени маршрутного движения при создании заездных карманов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1 (44). – С. 102–105. – EDN: RQFADR.
19. Якунин Н. Н., Якунина Н. В., Спирин А. В. Модель организации транспортного обслуживания населения автомобильным транспортом по маршрутам регулярных перевозок // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2013. – № 3. – С. 63–66. – EDN: PVEJRD.
20. Якунин Н. Н., Нургалиева Д. Х. Критерии оценки доступности перевозок пассажиров по регулярным маршрутам // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 4 (179). – С. 154–158. – EDN: UHINOR.
21. Якунина Н. В., Студеникин В. А. Организация перевозок пассажиров городским общественным транспортом на основе брутто-контракта // Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XVI международной научно-практической конференции, 11–13 ноября 2021 г. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 606–611. – EDN: VMMQYJ.
22. Bobinger R. (1991) Context and framework of Drive transportation evaluation. In Proc. Drive Conference. Elsevier Amsterdam. pp. 389–412. (In Eng.).
23. Fernandez R. (1999) Design of bus stop priorities. *Traffic Engineering and Control*, Vol.40, No. 6, pp. 335–340. (In Eng.).
24. Fernandez R., Tyler N. (2005) Effect of passenger–bus–traffic interactions on bus stop operations. *Transportation Planning and Technology*. – Vol. 28. – No. 4. – Pp. 273–292. – <https://doi.org/10.1080/03081060500247747>. (In Eng.).
25. Highway Capacity Manual 2000. – Transportation Research Board, National Research Council. – Washington, D.C., USA, 2000. – 1134 p. (In Eng.).
26. Robbins G. (1988) Increasing Bus Speed through Improved Stop Spacing. *San Francisco Municipal Railway* – San Francisco, CA., 1988. (In Eng.).
27. Tyler, N. A. (1991). The contribution of expert opinion to the design of high-capacity bus priority systems. *Computers & Structures*, Vol. 40, No. 1, pp. 191–199. – [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90472-x](https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90472-x). (In Eng.).

References

1. Azemsha, S. A., Starovoitov, A. N., Skirkovsky, S. V. (2013) [Optimization of intervals of movement of vehicles in urban passenger transportation in regular service]. *Optimizaciya intervalov dvizheniya transportnyh sredstv pri gorodskih perevozkah passazhirov v regulyarnom soobshchenii* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]. Vol. 2 (27), pp. 52–57. (In Russ.).
2. Bogumil, V. N., Efimenko, D. B. (2021) [The use of digital infrastructure models in the urban passenger transport management system]. *Ispolzovanie modelej cifrovoj infrastruktury v sisteme upravleniya gorodskim passazhirskim transportom 27 sentyabrya – 02 oktyabrya 2021 goda: Materialy XIV mul'tikonferentsii v 4 tomakh* [XIV All-Russian multi-conference on management problems of the ICPU-2021. September 27 – October 02, 2021: Proceedings of the XIV multiconference in 4 volumes]. V. 4. Rostov-on-Don – Taganrog, pp. 23–26. (In Russ.).
3. Bocharov, I. A., Vlasov, Y. L., Rassokha, V. I. (2011) [A model for determining the optimal number of route vehicles]. *Model opredeleniya optimalnogo kolichestva marshrutnyh transportnyh sredstv* [Bulletin of the Orenburg State University]. Vol. 10 (129), pp. 150–157. (In Russ.).
4. Efimenko, D. B., Barabanova, E. S., Tkacheva, A. I. (2019). [The use of digital technologies in the development of transport support for foreign economic activity]. *Primenenie cifrov'x tekhnologij v razviti transportnogo obespecheniya vneshneekonomicheskoy deyatelnosti*. [Transport Bulletin]. Vol. 10, pp. 14. – EDN: TKNLJD. (In Russ.).
5. Zedgenizov, A. V. (2007) [Estimation of the time of release of a stop point for urban passenger transport]. *Ocenka vremeni osvobozhdeniya ostanovochnogo punkta gorodskogo passazhirskogo transporta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. Vol. 4 (32), pp. 145–151. – EDN: JJPJSJ. (In Russ.).
6. Zedgenizov, A. V. (2008) [Improving the efficiency of the functioning of urban passenger transport stops]. *Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya ostanovochnykh punktov gorodskogo passazhirskogo transporta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. Vol. 3 (35), pp. 123–125. – EDN: JSAEPD. (In Russ.).
7. Iskhakov, M. M., Rassokha, V. I. (2007) [A comprehensive study of the stopping points of urban passenger transport in Orenburg]. *Kompleksnoe issledovanie ostanovochny'kh punktov gorodskogo passazhirskogo transporta g. Orenburga* [Bulletin of the Orenburg State University]. Vol. 9 (73), pp. 207–214. – EDN: IJXAMR. (In Russ.).
8. Iskhakov, M. M., Rassokha, V. I. (2008) [«The human factor» in the organization of the work of fixed-route vehicles at bus stops]. *«Chelovecheskij faktor» v organizacii raboty marshrutnyh transportnyh sredstv na ostanovochnykh punktah* [Bulletin of the Orenburg State University]. Vol. 1, pp. 144–149. – EDN: IJJVGV. (In Russ.).

9. Larin, O. N. (2007) *Metodologiya organizatsii i funkcionirovaniya transportnykh sistem regionov* [Methodology of organization and functioning of regional transport systems]. SUSU Publishing House. Chelyabinsk, 207 p. – EDN: QSLFQN.
10. Larin, O. N., Kazhaev, A. A. (2012) [Reduction of conflict situations at the stops of the route networks of cities]. *Snizhenie konfliktnykh situatsiy na ostanovochnykh punktakh marshrutnykh setej gorodov* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. Vol. 1, pp. 48–49. – EDN: UJWFKD. (In Russ.).
11. Lipenkov, A. V. (2015) [Investigation of the influence of a regulated intersection on the capacity of a stop point]. *Issledovanie vliyaniya reguliruemogo peresecheniya na propusknyuyu sposobnost' ostanovochnogo punkta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. Vol. 9 (104), pp. 113–121. (In Russ.).
12. Lipenkov, A. V., Kuzmin, N. A., Yerofeeva, L. N. (2015) [A mathematical model of the capacity of a stopping point in the absence of maneuvers to overtake each other by buses]. *Matematicheskaya model' propusknoy sposobnosti ostanovochnogo punkta v sluchae otsutstviya manevrov po obgonu avtobusami drug druga* [Bulletin of the Orenburg State University] Vol. 4 (179), pp. 87–94. (In Russ.).
13. Litvinov, A. V. (2020) [Estimation of the cost of travel time based on the models of the choice of the mode of movement] *Ocenka stoimosti vremeni peredvizheniya na osnove modelej vybora sposoba peredvizheniya* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. Vol. 11, pp. 45–48. (In Russ.).
14. Petrov, A. I. (2022) [Sociological aspects of the medium-term dynamics of the organization of the transportation process on Tyumen city bus routes] *Sociologicheskie aspekty srednesrochnoy dinamiki organizovannosti perevoznogo processa na gorodskikh avtobusnykh marshrutakh Tyumeni* [Transport of the Urals]. Vol. 2 (73), pp. 9–16. (In Russ.).
15. Bannov, A. S., et al. (2007) [Forecasting passenger flows in the urban transport system]. *Prognozirovaniye passazhiropotokov v gorodskoy transportnoy sisteme* [Proceedings of the Volgograd State Technical University. Series: Ground transportation systems.]. Vol. 2, No. 8 (34), pp. 95–98. (In Russ.).
16. Rassokha, V. I., Nadiryani, S. L. (2023) [Modeling of performance indicators of urban passenger transport in the maintenance of non-stationary passenger flows]. *Modelirovaniye pokazatelej effektivnosti gorodskogo passazhirskogo transporta pri obsluzhivaniy nestacionarnykh passazhiropotokov* [The world of transport and technological machines]. Vol. 4–1 (83), pp. 81–90. (In Russ.).
17. Rassokha, V. I., Dryuchin, D. A., Nadiryani, S. L. (2023) [Optimization of the structure of the fleet of trackless vehicles serving urban passenger routes based on the results of mathematical modeling]. *Optimizatsiya struktury parka bezrel'sovykh transportnykh sredstv, obsluzhivayushix gorodskie passazhirskie marshruty, na osnove rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya* [International Journal of Advanced Studies.]. Vol. 13. No. 3, pp. 180–202. (In Russ.).
18. Taubkin, G. V., Koptelov, O. G. (2015) [Changing the route travel time when creating travel pockets]. *Izmeneniye vremeni marshrutnogo dvizheniya pri sozdaniy zaezdnykh karmanov* [Transport of the Urals]. Vol. 1 (44), pp. 102–105. (In Russ.).
19. Yakunin, N. N., Yakunina, N. V., Spirin, A. V. (2013) [A model for organizing public transport services by road along regular transportation routes]. *Model organizatsii transportnogo obsluzhivaniya naseleniya avtomobilnym transportom po marshrutam regul'yarnykh perevozok* [Cargo and passenger transport]. Vol. 3, pp. 78–83. (In Russ.).
20. Yakunin, N. N., Nesterenko, D. H. (2015) [Criteria for assessing the accessibility of passenger transportation on regular routes]. *Kriterii ocenki dostupnosti perevozok passazhirov po regul'yarnym marshrutam* [Bulletin of the Orenburg State University]. Vol. 4 (179), pp. 154–158. (In Russ.).
21. Yakunina, N. V., Studenikin, V. A. (2021) [Organization of passenger transportation by urban public transport on the basis of a gross contract]. *Organizatsiya perevozok passazhirov gorodskim obshchestvennym transportom na osnove brutto-kontrakta* [Progressive technologies in transport systems: proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference, November 11–13]. Orenburg: Orenburg State University, pp. 606–611. (In Russ.).
22. Bobinger, R. (1991) Context and framework of Drive transportation evaluation. In Proc. *Drive Conference*. Elsevier Amsterdam. pp. 389–412. (In Eng.).
23. Fernandez, R. (1999) Design of bus stop priorities. *Traffic Engineering and Control*, Vol.40, No. 6, pp. 335–340. (In Eng.).
24. Fernandez, R., Tyler, N. (2005) Effect of passenger–bus–traffic interactions on bus stop operations. *Transportation Planning and Technology*. – Vol. 28. – No. 4. – Pp. 273–292. – <https://doi.org/10.1080/03081060500247747>. (In Eng.).
25. Highway Capacity Manual 2000. *Transportation Research Board, National Research Council*. Washington, D.C., USA, 1134 p. (In Eng.).
26. Robbins, G. (1988) Increasing Bus Speed through Improved Stop Spacing. *San Francisco Municipal Railway*. San Francisco, CA. (In Eng.).

27. Tyler, N. A. (1991) The contribution of expert opinion to the design of high-capacity bus priority systems. *Computers & Structures*, Vol. 40, No. 1, pp. 191–199. – [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90472-x](https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90472-x). (In Eng.).

Информация об авторах:

Хасанани Мухи Асфур Асфур, соискатель кафедры автомобильного транспорта, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

ORCID iD: 0000-0003-3448-101X

e-mail: iraqieng2003@gmail.com

Николай Константинович Горяев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

ORCID iD: 0000-0002-7556-6522

e-mail: goriaevnk@susu.ru

Владимир Иванович Рассоха, доктор технических наук, доцент, декан транспортного факультета, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

ORCID iD: 0000-0002-2499-6530

e-mail: cabin2012@yandex.ru

Вклад соавторов:

Асфур Х. М. А. – анализ результатов литературного обзора, планирование экспериментально-аналитической части исследования, сбор и систематизация исходных данных, моделирование и обработка полученных результатов.

Горяев Н. К. – координация работ при проведении анализа литературных источников, обоснование концепции исследования; планирование аналитической части исследования; обобщение результатов исследования, формулировка выводов, интерпретация результатов моделирования, редактирование и переработка рукописи.

Рассоха В. И. – анализ проблемы, формулирование цели и задач исследования, названия статьи, разработка концептуального подхода, и теоретической части исследования, интерпретация результатов моделирования; формулировка выводов.

Статья поступила в редакцию: 26.09.2024; принята в печать: 05.11.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Hasanain Mukhi Asfur Asfur, PhD candidate of the Department of Automobile Transport, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

ORCID iD: 0000-0003-3448-101X

e-mail: iraqieng2003@gmail.com

Nikolay Konstantinovich Goryaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobile Transport, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

ORCID iD: 0000-0002-7556-6522

e-mail: goriaevnk@susu.ru

Vladimir Ivanovich Rassokha, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Transport Faculty, Orenburg State University, Orenburg, Russia

ORCID iD: 0000-0002-2499-6530

e-mail: cabin2012@yandex.ru

Contribution of the authors:

Asfur H. M. A. – analysis of literature review results, planning of experimental and analytical part of the study,

collection and systematization of initial data, modeling and processing of obtained results.

Goryaev N. K. – coordination of works during analysis of literary sources, substantiation of research concept; planning of analytical part of the study; generalization of research results, formulation of conclusions, interpretation of modeling results, editing and revision of the manuscript.

Rassokha V. I. – analysis of the problem, formulation of the purpose and objectives of the study, title of the article, development of conceptual approach and theoretical part of the study, interpretation of modeling results; formulation of conclusions.

The paper was submitted: 26.09.2024.

Accepted for publication: 05.11.2024.

The authors have read and approved the final manuscript.