

Научная статья
УДК 656.021
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>
EDN: AZLV LX



ВЫБОР ВМЕСТИМОСТИ АВТОБУСОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

А.И. Фадеев ✉, А.М. Ильянков, А.С. Поляков
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия
✉ ответственный автор
9135335784@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для городских агломераций общественный транспорт имеет важнейшее значение – он обеспечивает удовлетворение мобильности населения при минимальных затратах ресурсов и городского пространства, а также с приемлемым отрицательным влиянием на окружающую среду.

В настоящей статье рассматривается задача выбора пассажироместимости транспортных средств для работы на городских маршрутах общего пользования, решение которой основывается на оптимальном соотношении параметров эффективности и качества функционирования общественного транспорта.

Материалы и методы. В статье на основании практических данных транспортных организаций показано, что стоимость эксплуатации автобусов линейно зависит от их вместимости. С другой стороны, затраты, приходящиеся на пассажиро-место, имеют нелинейный характер. При одинаковых тарифах для обеспечения рентабельной перевозки автобусы меньшей вместимости должны эксплуатироваться с более высокой степенью заполнения салона, в результате снижается качество транспортного обслуживания.

Приведены рекомендации по выбору вместимости транспортных средств для обслуживания городских регулярных маршрутов с учетом неравномерности пассажирских потоков, а также влияния используемого класса подвижного состава на эффективность (экономические параметры) перевозочного процесса.

Обсуждение и заключение. Эффективность разработанной методики определения вместимости подвижного состава для обслуживания регулярных городских маршрутов показана на тестовых расчетах реального маршрута г. Красноярска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирский поток, транспортный спрос, транспортное предложение, общественный городской транспорт, вместимость автобуса, использование вместимости

Статья поступила в редакцию 14.12.2024; одобрена после рецензирования 18.03.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Фадеев А.И., Ильянков А.М., Поляков А.С. Выбор вместимости автобусов городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 248-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>

© Фадеев А.И., Ильянков А.М., Поляков А.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>
EDN: AZLV LX

EVALUATING PASSENGER CARRYING CAPACITY OF BUSES FOR URBAN PUBLIC TRANSPORTATIONS

Alexander I. Fadeev ✉, Alexei M. Ilyankov, Andrei S. Polyakov
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia
✉ corresponding author
9135335784@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. For urban agglomerations, public transportation is of crucial importance - it provides mobility of population at minimal cost and within minimum urban space, acceptable negative environmental impact being achieved. This paper considers the problem of estimating passenger carrying capacity of vehicles for operation on urban public routes. The solution is based on determining optimal ratio between parameters of efficiency and quality of public transportation.

Materials and Methods. In this article based on empirical data from transport organizations it has been shown that the cost of bus operation is linearly dependant on its capacity. On the other hand, the costs per passenger-seat are of non-linear character. With the same tariffs to ensure profitable transportation buses of smaller capacity should be operated with a higher degree of passenger compartment occupancy, as a result the quality of transportation suffers. Recommendations on selecting vehicle passenger carrying capacity for operation on urban regular routes taking into account the unevenness of passenger flows, as well as the influence of the used class of rolling stock on the efficiency (economic parameters) of the transportation process have been given.

Discussion and conclusion. The effectiveness of the developed methodology for determining the passenger carrying capacity of rolling stock to operate on regular urban routes is shown based on test calculations for a real route of Krasnoyarsk city.

KEYWORDS: passenger flow, transport demand, transport supply, public urban transport, bus capacity, capacity utilization

The article was submitted: December 14, 2024; **approved after reviewing:** March 18, 2025; **accepted for publication:** April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Fadeev A.I., Ilyankov A.I.M., Polyakov A.S. Evaluating passenger carrying capacity of buses for urban public transportations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 248-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>

© Fadeev A.I., Ilyankov A.I.M., Polyakov A.S., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Для городских агломераций общественный транспорт имеет важнейшее значение – он обеспечивает удовлетворение мобильности населения при приемлемых затратах ресурсов и городского пространства, а также с минимальным отрицательным влиянием на окружающую среду. Сбалансированное развитие общественного транспорта, скоординированное с другими элементами городской инфраструктуры, соответствие транспортного спроса и предложения, формирование и реализация эффективных стратегий развития пассажирского автомобильного транспорта общего пользования является важнейшей современной проблемой¹.

В процессе проектирования и реализации транспортного предложения решаются такие задачи, как разработка системы маршрутов, установление интенсивности (интервалов) движения по ним, выбор вместимости и определение числа подвижного состава и др. [1]. Применяемые при этом математические модели, как правило, путем минимизации взвешенной суммы затрат учитывают цели пассажиров, операторов и общества, компромисс между которыми обуславливает устойчивое функционирование транспортной системы [2]. Затраты оператора зависят от числа и вместимости автобусов, оборудования, необходимого для их эксплуатации. Расходы пассажира состоят из пассажирских тарифов, затрат времени на ожидание, поездки и пересадки. Загрязняющие вещества, выбрасываемые транспортными средствами, могут рассматриваться как общественные (экологические) затраты [3]. Для получения средневзвешенных затрат применяются коэффициенты приведения [4], посредством которых учитывается разница между расходами участников транспортного процесса.

Используемые для решения рассматриваемых задач подходы зачастую имеют существенные ограничения, они не обязательно приводят к оптимальным результатам, иногда опираются на ряд нереалистичных допущений и упрощений, таких как неизменный спрос, отсутствие сбоев в расписании, фиксированный размер автопарка или неограниченная вместимость транспортных средств [1].

Одной из наиболее актуальных задач является совершенствование структуры парка подвижного состава [5, 6, 7]. Выбор пассажировместимости транспортных средств для городских маршрутов осуществляется на основе факторов, которые могут быть разделены на экономические, социальные, технические, эксплуатационные и нормативные². Важнейшим фактором для данной задачи является пассажирский спрос.

От вместимости транспортных средств зависит интенсивность (интервал) движения. При использовании подвижного состава большей вместимости интервал движения по маршруту увеличивается, что обуславливает повышение затрат времени пассажиров на ожидание автобуса. Также необходимо учитывать, что снижение интервала движения ограничивается пропускной способностью маршрутов [8], т.к. с увеличением частоты движения повышается вероятность возникновения заторов на улично-дорожной сети и остановочных пунктах общественного транспорта.

Интервалы движения по маршрутам устанавливаются в зависимости от мощности пассажирских потоков и имеющегося парка подвижного состава [9, 10, 11]. По причине сложности рассматриваемых процессов данная задача традиционно решается после проектирования транспортной сети. Только в последнее время предпринимаются попытки разработки маршрутов и настройки частоты движения осуществлять в комплексе [11].

Следует отметить проблему, которая заключается в том, что в разных исследованиях применяются неодинаковые допущения. Как следствие, далеко не всегда возможно сопоставление полученных результатов. В некоторых работах используются данные, не в полной степени соответствующие реальным условиям функционирования общественного транспорта [9]. Зачастую при решении задачи используется один критерий, в то время как к транспортной системе предъявляется множество противоречивых требований. Обычно рассматривается автопарк, состоящий только из одного типа транспортных средств; на практике же, как правило, эксплуатируется подвижной состав, обладающий разными параметрами.

¹ Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах, удобных для жизни – Transportation for Livable Cities. Территория будущего, 2011. 576 с.

² Антошвили М.Е., Либман С.Ю., Спирин И.В. Оптимизация городских автобусных перевозок. М.: Транспорт. 1985. 102 с.

В некоторых работах ставится задача определения интервалов движения по маршруту при условии заданного (известного) парка транспортных средств. Например, в статье [12] приводится модель, которая позволяет распределить доступные автобусы между временными периодами и маршрутами, чтобы максимизировать чистую социальную выгоду при ограничениях на общий объем субсидий, размер парка и степень загрузки транспортных средств.

В работе [13] предлагается модель настройки частоты движения по маршрутам, помогающая проектировщику минимизировать общее время в пути по сети для заданного размера автобусного парка за счет оптимального распределения интервалов движения между автобусными маршрутами, принимая во внимание интересы пассажиров.

Задача определения рациональной интенсивности движения подвижного состава по маршрутной сети в общем виде до настоящего времени не имеет однозначного решения. Во многих исследованиях игнорируется возможное превышение вместимости транспортных средств [14]. Обычно предполагается, что все автобусы имеют одинаковый размер, хотя в некоторых исследованиях ставилась задача неоднородного парка разной вместимости [8] или модификации (например, применение электробусов дополнительно к обычным автобусам) [2]. В работе [15] предлагается для снижения времени сообщения использовать полужэкспрессные и скоростные маршруты с транспортными средствами особо малого, малого и среднего класса. Очевидно, что недостаток данного подхода – это отсутствие учета эффективности работы перевозчика.

Определение интенсивности движения заключается в установлении соответствующих интервалов для каждого периода, на которые подразделяется время работы транспорта. Рациональный интервал движения должен быть достаточно коротким, чтобы удовлетворять пассажиров, и, соответственно, при этом необходимо учитывать расходы оператора [1, 16]. Низкая интенсивность движения автобусов в городских условиях равносильна отсутствию

обслуживания: из-за недостаточного качества услуг пассажиры переориентируются на другие доступные виды транспорта. Поэтому разумно устанавливать приемлемый компромисс с точки зрения и пассажиров, и перевозчиков [16, 17].

На основании упомянутого компромисса определяется баланс спроса и предложения, который формулируется исходя из пассажирооборота за определенный период времени (час, сутки, месяц, год и т.д.) или мощности пассажирских потоков на наиболее загруженном участке сети. Время работы подразделено на пиковые и нормальные периоды [18, 19]. Баланс часового пассажирооборота записывается следующим образом³:

$$P_h = A_m q_n \gamma_d v_e, \quad (1)$$

где A_m – количество транспортных средств;
 γ_d – коэффициент использования вместимости;

q_n – номинальная вместимость транспортного средства;

P_h – часовой пассажирооборот;

v_e – эксплуатационная скорость.

Баланс мощности пассажирских потоков⁴:

$$N_h = q_n \lambda k_h, \quad (2)$$

где N_h – мощность пассажирского потока на наиболее загруженном участке маршрута, пасс/ч;

λ – интенсивность движения подвижного состава по маршруту ед./ч;

k_h – коэффициент внутрисуточной неравномерности пассажирских потоков.

Таким образом, баланс транспортного спроса и предложения предусматривает необходимость по выбранному значению вместимости рассчитать интервал движения по маршруту и, наоборот, по установленному интервалу определить вместимость транспортных средств.

При решении указанной задачи предлагается выполнять следующие условия, во-первых, соблюдение максимально-допустимого интервала движения, определенного стандар-

³ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 535 с.

⁴ Transit Capacity and Quality of Service Manual, 2nd Edit / TCRP Web Document 6 (Project A-15) Contractor's Final Report, 1999. p 62

том транспортного обслуживания⁵. Во-вторых, обеспечить удовлетворение спроса на транспортные услуги без превышения вместимости подвижного состава на наиболее загруженных участках маршрутов [20].

В работе [21] рассматривается задача обслуживания сложившегося спроса населения на перевозки посредством выполнения минимально необходимой транспортной работы автобусами на городских регулярных маршрутах.

В [22] предложена модель работы подвижного состава городского пассажирского общественного транспорта, сочетающая элементы системы массового обслуживания и конечных автоматов. Посредством данной модели предлагается осуществлять оценку удовлетворенности обслуживанием, под которой понимается количество пассажиров, дождавшихся подходящего подвижного состава.

Основной недостаток ранее разработанных рекомендаций по выбору вместимости транспортных средств – отсутствие учета влияния используемого класса подвижного состава на эффективность (экономические параметры) функционирования маршрутов. Таким образом, выбор пассажироместимости транспортных средств для работы на городских маршрутах является непростой задачей, решение которой связано с пропускной способностью линий, эффективностью и качеством функционирования общественного транспорта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Постановка задачи. Затраты перевозчика на эксплуатацию автобуса (C) линейно зависят от вместимости транспортного средства (q_n) [18, 24]:

$$C = C_0 + C_1 q_n, \quad (3)$$

где C_0 , C_1 – постоянные коэффициенты (константы).

Автобусы в соответствии с техническим регламентом⁶ подразделяются на категории М2

(с максимальной массой до 5 т) и М3 (свыше 5 т). Кроме этого, автобусы вместимостью до 22 пассажиров делятся на классы А и В, свыше 22 пассажиров – на классы I, II, III. В автобусах классов В и III допускается перевозка только по местам сидения, в автобусах классов А, I и II – как сидящих, так и стоящих пассажиров. В 220ФЗ⁷ в зависимости от длины автобусы подразделяются на следующие классы: особо малый, малый, средний, большой и особо большой. Для каждого класса в литературе дается примерная пассажироместимости, которая несколько варьируется в разных источниках. Действующими нормативными документами классификация автобусов по вместимости не установлена. Номинальная вместимость автобуса определяется производителем, исходя из площади пассажирского салона и предельно допустимой массы транспортного средства.

В настоящей статье рассматриваются перевозки общего пользования по регулярным городским маршрутам; будем использовать следующие значения вместимости классов подвижного состава (которые не противоречат другим источникам): до 22 пассажиров – особо малый; от 22 до 40 – малый; от 40 до 80 – средний; от 80 до 110 – большой и свыше 110 – особо большой.

Для обслуживания маршрута вместимость подвижного состава ограничивается мощностью пассажирских потоков и интенсивностью движения транспортных средств:

$$q_n \geq \frac{N_l^{\max} k_h}{\lambda_h}, \quad (4)$$

$N_l^{\max}$ – мощность пассажирского потока наиболее загруженного участка маршрута (пассажиров в час);

λ_h – интенсивность движения подвижного состава по маршруту (единиц в час);

q_n – номинальная вместимость подвижного состава;

k_h – коэффициент внутричасовой неравномерности пассажиропотока.

⁵ При отсутствии стандарта транспортного обслуживания параметры функционирования общественного транспорта задаются другими муниципальными документами, например контрактом с перевозчиком.

⁶ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 О безопасности колесных транспортных средств.

⁷ Федеральный закон от 13.07.2015 № 220-ФЗ «Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Коэффициент внутрисалонной неравномерности⁸:

$$k_h = q_{\tau}^{\max} / \bar{q}_{\tau}, \quad (5)$$

где $q_{\tau}^{\max}$ – наибольшее количество пассажиров в расчетном периоде τ , который, например, может составлять 15 мин;

$\bar{q}_{\tau}$ – среднее количество пассажиров в периоде τ .

Внутрисалонная неравномерность пассажирских потоков также может быть определена через коэффициент неравномерности часа пик⁹:

$$HPF = Q_h / (4Q_{15}), \quad (6)$$

где Q_h – пассажиропоток в час пик;

Q_{15} – число пассажиров в пиковые 15 мин часа наибольшей интенсивности пассажиропотока.

Очевидно, что

$$k_h = 1/HPF. \quad (7)$$

Из выражения (4) следует, что интенсивность движения по маршруту:

$$\lambda_h \geq \frac{N_l^{\max} k_h}{q_n}, \quad (8)$$

интервал в минутах:

$$I_h = \frac{60}{\lambda_h} \leq \frac{q_n}{N_l^{\max} k_h}. \quad (9)$$

Степень заполнения салона автобуса оценивается посредством коэффициента статического (Y) и динамического ($\bar{Y}$) использования вместимости¹⁰:

$$\gamma_i = q_i / q_n \leq 1, \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{\sum_i q_i l_i}{\sum_i q_n l_i} = \frac{P}{L_m q_n} \leq 1, \quad (11)$$

где q_i – фактическое число пассажиров в салоне транспортного средства на i -м перегоне маршрута;

l_i – длина i -го перегона маршрута;

P – пассажирооборот;

L_m – пробег по маршруту.

Пассажирские потоки неравномерны во времени и в пространстве (рисунок 1). Неравномерность во времени (рисунок 1, б) оценивается посредством коэффициента неравномерности по часам суток¹¹:

$$k_t = \frac{N_t^{\max}}{\bar{N}_t}, \quad (12)$$

$N_t^{\max}$, $\bar{N}_t$ – наибольшая и среднечасовая мощность пассажиропотока.

Динамика пассажирского потока в пространстве (рисунок 1, а) определяется посредством коэффициента неравномерности по длине рейса или оборота по маршруту:

$$k_l = \frac{N_l^{\max}}{\bar{N}_l}, \quad (13)$$

где $N_l^{\max}$, $\bar{N}_l$ – наибольшая и средняя мощность пассажирского потока на перегоне рейса или оборота.

⁸ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок ... 535 с.

⁹ Highway Capacity Manual 2000 / Transportation Research Board; National Research Council. Washington, DC, 2000. 1134 p.

¹⁰ Spirin I.V. Transportation of passengers by urban transport : a reference guide. Moscow: Akademkniga, 2004. 413 p.

¹¹ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок ... 535 с.

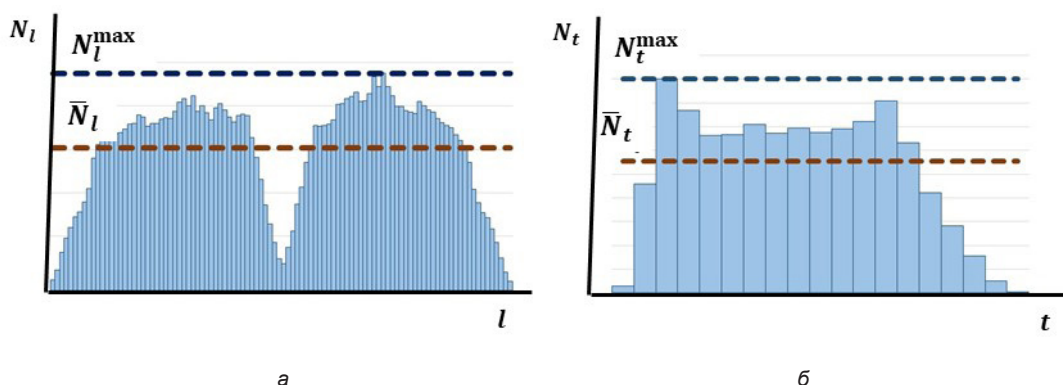


Рисунок 1 – Распределение мощности пассажирских потоков по длине оборота (а) и времени работы транспорта (б)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Distribution of passenger flow capacity by turnover length (а) and time of transport operation (б)
Source: compiled by the authors.

Для среднего числа пассажиров в транспортном средстве за рейс или оборот по маршруту в соответствии с выражением (4) должно выполняться следующее неравенство:

$$q_o \leq \frac{q_n}{k_h k_l}. \quad (14)$$

Коэффициент использования вместимости за рейс или оборот по маршруту не должен превышать [23.1]

$$\bar{\gamma} \leq \frac{1}{k_h k_l}. \quad (15)$$

По результатам натурного обследования пассажирских потоков общественного транспорта г. Красноярска: $k_h = 1,02 \dots 1,09$; $k_l = 1,3 \dots 2,1$. Таким образом, максимально допустимое значение коэффициента использования вместимости за оборот находится в пределах от 0,44 до 0,75.

Рассмотрим задачу выбора вместимости подвижного состава для обслуживания регулярных городских маршрутов на примере автобуса.

2. Решение задачи. Как упоминалось выше, при формировании транспортного предложения рекомендуется исходить из компромисса между показателями эффективности и качества транспортного процесса.

Наиболее значимыми оценками пассажиров качества транспортных услуг является доступность, комфорт, удобство и безопасность. К важнейшим показателям комфорта транспортного обслуживания относятся: частота (интервал) движения и использование вместимости подвижного состава¹². В настоящей работе для определения эффективности и качества транспортного обслуживания используем следующие показатели, которые зависят от вместимости используемого транспортного средства: стоимость перевозок, частота (интервал) движения и степень наполнения (использования вместимости) салона.

Стоимость эксплуатации будем оценивать в приведенных единицах к автобусу большого класса вместимостью 100 пассажиров, которая принята за 1. На рисунке 2 дана зависимость приведенных расходов на эксплуатацию от вместимости автобусов, полученная по информации муниципальных транспортных организаций г. Красноярска. Она, как и в других работах [24], достаточно хорошо описывается линейной зависимостью (коэффициент детерминации 0,93):

$$c = a q_n + b, \quad (16)$$

где q_n – номинальная вместимость автобуса;
 c – приведенные затраты;
 a и b – постоянные коэффициенты.

¹² Highway Capacity Manual 2000 / Transportation Research Board ...1134 p.

Относительные расходы на пассажиро-место, приведенные к автобусу большого класса:

$$c_p = \frac{cq'_n}{q_n}, \quad (17)$$

где q'_n – номинальная вместимость автобуса большого класса.

При условии одинакового использования вместимости транспортного средства интервал движения по маршруту составляет

$$I_\gamma = \frac{I'q_n}{q'_n}, \quad (18)$$

где I' – интервал движения автобуса большого класса.

Для случая равной стоимости перевозок пассажира интервал движения можно определить

$$I_c = I'c. \quad (19)$$

Точку безубыточности, при которой расходы и доходы от перевозок равны, можно записать следующим образом:

$$S_{km} = \frac{t^r \gamma_c q_n}{l_p}, \quad (20)$$

где t^r – пассажирский тариф;

γ_c – коэффициент безубыточного использования вместимости подвижного состава;

S_{km} – себестоимость одного километра пробега транспортного средства по маршруту.

Коэффициент безубыточного использования вместимости:

$$\gamma_c = c_p \gamma'_c, \quad (21)$$

где γ'_c – коэффициент безубыточного использования вместимости автобуса большого класса.

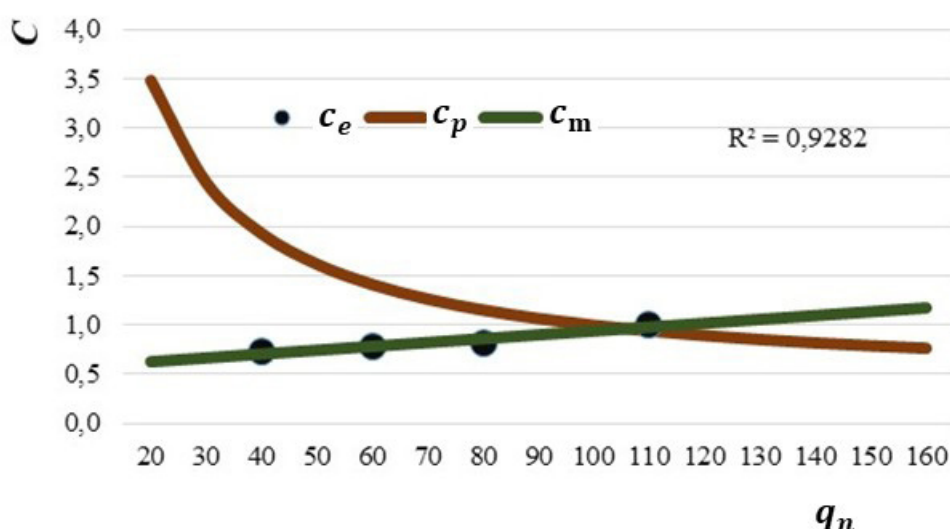


Рисунок 2 – Зависимость приведенных затрат на эксплуатацию (C) от вместимости автобуса (q):
 c_e – фактические приведенные затраты;
 c_p – затраты, приходящиеся на одно пассажиро-место;
 c_m – теоретическая зависимость
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of operation costs (C) on bus capacity (q), where:
 c_e – actual present costs;
 c_p – costs per passenger-seat;
 c_m – theoretical dependence
 Source: compiled by the authors.

На практике имеется взаимное влияние маршрутов общественного транспорта как через общие остановочные пункты, так и через остановочные пункты, находящиеся в пешеходной доступности. В результате наблюдается перераспределение пассажирских потоков между маршрутами в зависимости от интенсивности движения по ним, т.е. при уменьшении интервала между автобусами возможно увеличение числа перевезенных пассажиров [25]. В настоящей работе для простоты будем рассматривать изолированный маршрут, который не взаимодействует с другими маршрутами.

В связи с неравномерностью пассажирских потоков по часам суток интервалы движения для каждого маршрута устанавливаются дифференцированно по периодам работы транспорта таким образом, чтобы обеспечивать требуемое качество транспортного обслуживания и рентабельную работу операторов. Интервал движения для каждого периода обуславливается мощностью пассажирского потока или стандартом качества транспортного обслуживания. Если интервал движения, рассчитанный в соответствии с выражением (9), превышает величину, заданную стандартом транспортного обслуживания, применяется значение данного параметра из стандарта.

В результате на практике в связи с неравномерностью пассажирских потоков по часам суток на городских регулярных маршрутах средний коэффициент использования вместимости существенно ниже, чем в пиковый период. Как правило, в среднем за день работы транспорта он составляет порядка 0,3 [26]. Например, для городского общественного транспорта г. Красноярска при нормировании пассажирских тарифов¹³ применяется коэффициент использования вместимости 0,28. Величину среднего безубыточного коэффициента использования вместимости можно определить следующим образом:

$$\bar{\gamma}_c = \frac{\bar{\gamma}}{1+r/100}, \quad (22)$$

где r – уровень рентабельности, применяемый при нормировании пассажирских тарифов, %;

$\bar{\gamma}$ – средний коэффициент использования вместимости, используемый при определении пассажирских тарифов.

Обычно для общественного транспорта в тарифах рентабельность принимается порядка 5%, т.е. для г. Красноярска точка безубыточности коэффициента использования вместимости составляет 0,267.

В г. Красноярске более 90% перевозок по регулярным маршрутам осуществляется транспортными средствами большой и средней вместимости, исходя из себестоимости эксплуатации которых определяются пассажирские тарифы. На маршрутах работает 60% автобусов большого класса и 30% среднего. Таким образом, средняя вместимость автобусов среднего и большого класса, использующихся на маршрутах: $(0,6 \cdot 100 + 0,3 \cdot 60) / 0,9 = 86,7$. Из условия равной стоимости перевозки пассажира безубыточный коэффициент использования вместимости автобуса большого класса составит

$$\gamma'_c = \bar{\gamma}_c / c'_p, \quad (23)$$

где c'_p – стоимость перевозки пассажира автобусом вместимости, по которой рассчитаны тарифы (86,7 в нашем примере), отнесенная к автобусу большого класса.

Таким образом, для г. Красноярска $\gamma'_c = 0,24$. Определим коэффициент безубыточного использования вместимости при работе на маршруте:

$$\gamma_c = \gamma'_c c_p l_p / \bar{l}_p, \quad (24)$$

где l_p – среднее расстояние поездки пассажира по маршруту;

$\bar{l}_p$ – расстояние поездки пассажира в среднем по сети.

На рисунке 3 даны зависимости от вместимости автобуса относительного интервала движения при одинаковом коэффициенте использования вместимости (I_γ), одинаковой стоимости перевозки пассажира (I_c), а также коэффициента безубыточного использования вместимости (γ_c). Интервал движения по маршруту автобуса большого класса принят за 1. Применение автобусов малого или среднего класса по сравнению с большими обуславливает уменьшение интервала движения по маршруту, чтобы исключить превышение наполнения салона транспортного средства свыше номинальной вместимости.

¹³ Постановление Правительства Красноярского края от 28.09.2012 № 492-п «Об утверждении Методики формирования регулируемых тарифов на регулярные перевозки пассажиров и багажа автомобильным транспортом по муниципальным и межмуниципальным маршрутам регулярных перевозок на территории Красноярского края».

Рассмотрим применение автобуса вместимостью 20 пассажиров по сравнению с большим классом. В соответствии с рисунком 3 коэффициент использования вместимости будет соответствовать большому автобусу, если интервал движения по маршруту уменьшится в 5 раз (составит 0,2 интервала большого автобуса). Однако по условиям равной стоимости перевозок пассажира интервал движения двадцатиместного автобуса допускается снизить только на 30% (0,7 интервала большого автобуса). В противном случае стоимость перевозки одного пассажира автобусом малого класса будет выше, чем у большого автобуса.

Для двадцатиместного автобуса стоимость пассажирского места практически в три раза превышает автобус большого класса. Из этого следует, что при сопоставимых затратах на перевозку одного пассажира, если двадцатиместный автобус заполнен на 100%, использование вместимости автобуса большого класса составит всего 30%. В этом случае для большого автобуса на регулярном маршруте потребует-

ся увеличить интервал движения только в 1,52 раза (например, с 4 до 6 мин) по сравнению с двадцатиместным. Среднее время ожидания пассажира составляет половину интервала движения¹⁴, т.е. в нашем примере оно возрастет с 2 до 3 мин. Очевидно, что для пассажира более важным является меньшая заполненность транспортного средства, чем дополнительная минута ожидания на остановке.

Сравним автобус вместимостью 50 пассажиров с подвижным составом большого класса при условии равных затрат на одного пассажира. Расчеты показывают, что применение большого автобуса вместо пятидесятиместного на условиях равных затрат на пассажира обуславливает увеличение в 1,27 раза интервала движения по маршруту. При этом коэффициент использования вместимости составит 64% от пятидесятиместного, а время ожидания большого автобуса увеличится только на 13,5%, но степень использование вместимости транспортного средства будет снижена на 36%.

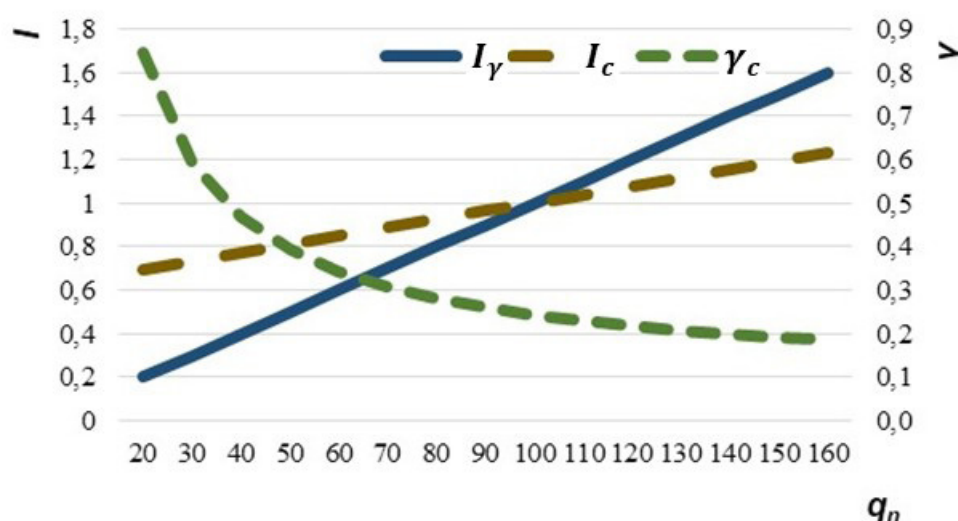


Рисунок 3 – Зависимость I_γ , I_c и γ_c от вместимости автобусов:
 I_γ – интервал движения при одинаковом коэффициенте использования вместимости;
 I_c – интервал движения при одинаковой стоимости перевозки пассажира;
 γ_c – коэффициент безубыточного использования вместимости
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of I_γ , I_c and γ_c on bus capacity; where:
 I_γ – travel interval at the same capacity utilization factor;
 I_c – travel interval at the same cost of passenger transportation;
 γ_c – coefficient of break-even capacity utilization.
 Source: compiled by the authors.

¹⁴ Ortuzar J.D., Willumsen L.G. Modelling transport. John Wiley & Sons, 2011. 586 p.

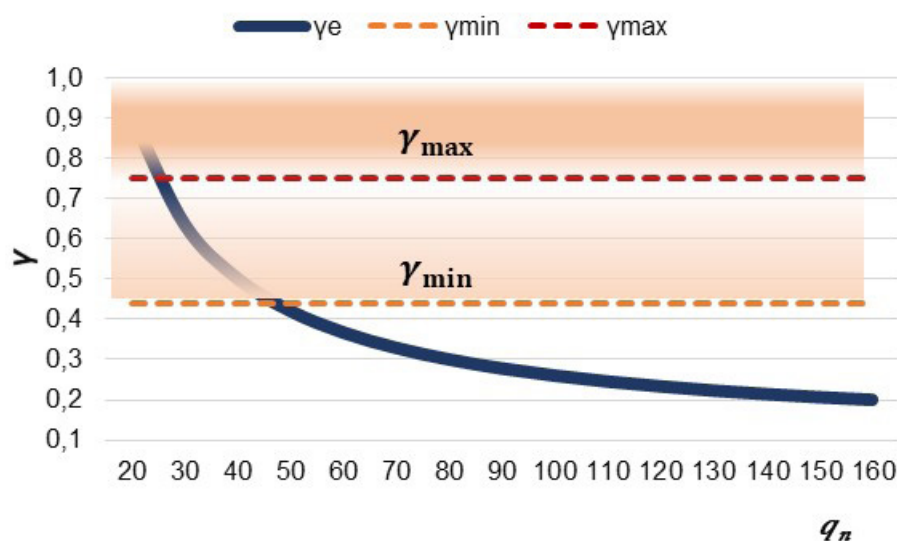


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента безубыточного использования вместимости (γ_c) от вместимости автобусов:
 $\gamma_{\min}, \dots, \gamma_{\max}$ – пределы варьирования коэффициента использования вместимости за оборот на маршрутах городского общественного транспорта
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the break-even capacity utilization coefficient (γ_c) on the capacity of buses; where: $\gamma_{\min}, \dots, \gamma_{\max}$ – limits of variation of the capacity utilization factor per turnover on urban public transport routes
 Source: compiled by the authors.

У автобусов особо большого класса коэффициент использования вместимости, равной стоимости перевозки одного пассажира от большого класса, отличается несущественно (кривая зависимости коэффициента использования вместимости в правой части графика более пологая). Например, коэффициент безубыточного использования вместимости 160-местного автобуса ниже на 20% по сравнению с автобусом большого класса. Применение автобусов особо большого класса целесообразно при ограниченной пропускной способности линии на направлениях с мощным пассажирским потоком.

На рисунке 4 приведена зависимость коэффициента безубыточного использования вместимости (γ_c) от вместимости автобусов. На рисунке также даны пределы варьирования максимально-возможного коэффициента использования вместимости, обусловленного неравномерностью пассажиропотоков внутричасовой и по длине оборота по маршруту. Эти пределы рассчитаны по данным общественного транспорта г. Красноярска (они

корреспондируют с другими источниками¹⁵). В этих пределах находятся все маршруты общественного транспорта. Выше $\gamma_{\max}$ коэффициент использования вместимости за оборот не может быть достигнут ни на одном маршруте при условии, если переполнение автобусов допускаться не будет.

Из рисунка 4 можно заключить следующее: применение автобусов особо малого класса на городских маршрутах регулярных перевозок не обеспечивает выполнение ограничений вместимости транспортного средства. На наиболее напряженных участках маршрута вследствие неравномерности пассажирских потоков будет наблюдаться превышение вместимости салона автобуса или отказ пассажиру в обслуживании.

Автобусы малого класса могут использоваться на ограниченном числе маршрутов со стабильными пассажирскими потоками, мощность которых недостаточна для обеспечения установленного стандартом транспортного обслуживания минимального интервала движения автобусов большого или среднего класса.

¹⁵ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок ... 535 с.

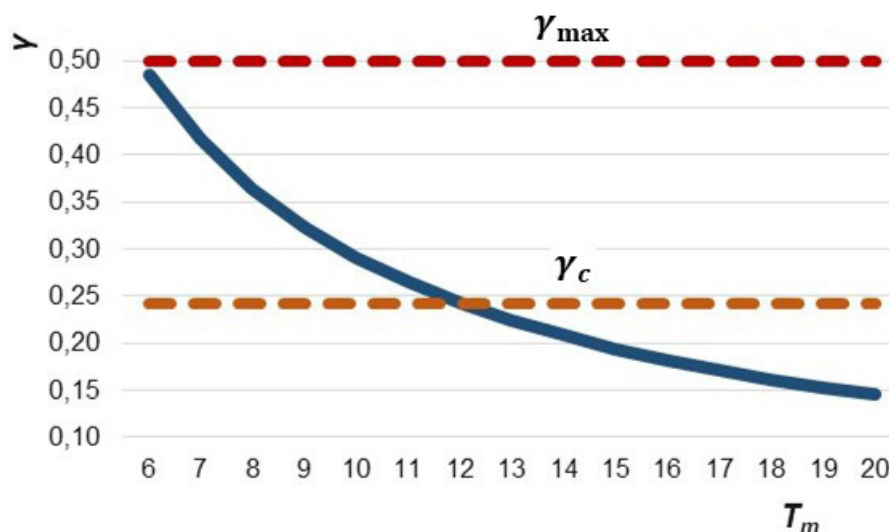


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента использования вместимости ($\bar{\gamma}_m$) от среднего времени работы подвижного состава на маршруте (T_m):
 γ_c – коэффициент безубыточного использования вместимости;
 $\gamma_{\max}$ – максимальный коэффициент использования вместимости маршрута
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of capacity utilization factor ($\bar{\gamma}_m$) on the average time of rolling stock operation on the route (T_m);
 where: γ_c – coefficient of break-even capacity utilization capacity;
 $\gamma_{\max}$ – maximum capacity utilization factor of the route
 Source: compiled by the authors.

Необходимо учитывать, что нормативная рентабельность автобусов малого класса достигается при коэффициенте использования вместимости большим 0,5, который не обеспечивается на многих маршрутах городского общественного транспорта. Использование автобусов малого класса возможно по специальным тарифам (для «маршруток») или посредством бюджетного субсидирования.

Число транспортных средств для обслуживания маршрута можно рассчитать:

$$A \geq \frac{N_l^{\max} k_h t_o}{q_n}, \quad (25)$$

где t_o – время оборота по маршруту, ч.

Как упоминалось выше, из-за неравномерности пассажирских потоков интервалы движения по маршруту устанавливаются дифференцированно по периодам времени. В периоды снижения интенсивности пассажирских потоков водителям предоставляются обеденные перерывы, также практикуется применение отстойно-разрывного режима работы. От сформированного расписания движения зависит среднее время работы автобуса на маршруте ($\bar{T}_m$). Средний коэффициент использования вместимости за день работы транспорта:

$$\bar{\gamma}_m = \frac{Q_m l_p t_o}{A_m q_n \bar{T}_m l_o}, \quad (26)$$

где Q_m – объем перевозок по маршруту;
 A_m – число транспортных средств на маршруте;
 l_o – длина оборота.
 При этом

$$\gamma_{\max} \geq \bar{\gamma}_m \geq \gamma_c, \quad (27)$$

где $\gamma_{\max}$ – предельный коэффициент использования вместимости за оборот в период пассажиропотоков наибольшей мощности, выражение (15).

Среднее время работы подвижного состава на маршруте:

$$\bar{T}_m = \frac{Q_m l_p t_o}{A_m q_n \bar{\gamma}_m l_o}. \quad (28)$$

На рисунке 5 приведена зависимость коэффициента использования вместимости от среднего времени работы подвижного состава на маршруте. В данном примере коэффициент безубыточного использования вместимости составляет 0,24, а наибольший коэффициент

использования вместимости в соответствии с неравномерностью пассажирских потоков по длине оборота равен 0,5. Из рисунка видно, что для рассматриваемого примера рентабельная эксплуатация подвижного состава обеспечивается, если среднее время работы подвижного состава на маршруте находится в пределах от 6 до 12 ч. Более 12 ч приводит к уменьшению коэффициента использования вместимости ниже точки безубыточности, работа менее 6 ч влечет переполнение салона транспортных средств и отказы пассажирам в обслуживании.

3. Практическая реализация. Рассмотрим задачу выбора вместимости подвижного состава для реального маршрута общественного транспорта г. Красноярск, параметры которого приведены в таблице 1. В таблице 2 даны рассчитанные технико-эксплуатационные показатели автобусов большого, среднего и малого классов при работе на рассматриваемом маршруте.

Минимальное число автобусов рассчитывается в соответствии с выражением (25) и зависит от наибольшей мощности и неравномерности пассажирского потока. Из таблицы 2 видно, что для рассматриваемого маршрута требуется 20 автобусов большого класса, 25 среднего и 50 малого. При этом интервал движения по маршруту в период наибольшей мощности пассажирского потока составит 9 мин автобуса большого класса, 7 – среднего и 4 – малого.

Наибольший коэффициент использования вместимости, который обусловлен неравномерностью пассажирского потока, для данного маршрута составит 0,55. Если в течение работы маршрута наполнение автобусов выдерживать как в пиковый период, среднее время работы подвижного состава на маршруте должно быть не менее 6,9 ч. Максимальное время работы подвижного состава ограничено коэффициентом безубыточного использования вместимости.

Таблица 1
Параметры маршрута
Источник: составлено авторами

Table 1
Route parameters
Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Значение
Объем перевозок, пасс./сут	23345
Транспортная работа, пасс-км/сут	153251
Время работы маршрута, ч	18
Среднее расстояние поездки пассажира по маршруту, км	6,6
Среднее расстояние перевозки пассажира по сети, км	6,4
Коэффициент безубыточного использования вместимости автобуса большого класса	0,22
Длина оборота, км	62,7
Скорость сообщения, км/ч	22
Простой на конечных за оборот, ч	0,25
Время оборота, ч	3,1
Коэффициент внутрисуточной неравномерности пассажиропотока	1,1
Коэффициента неравномерности по длине оборота по маршруту	1,65
Коэффициент неравномерности по часам суток	1,74
Наибольшая мощность пассажирского потока (на наиболее напряженном участке маршрута в пиковый период), пасс./ч	587

Таблица 2
Сравнительные параметры автобусов
Источник: составлено авторами

Table 2
Comparative parameters of buses
Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Класс автобуса		
	Большой	Средний	Малый
Вместимость номинальная, пасс.	100	80	40
Интенсивность движения по маршруту в период наибольшей мощности пассажиропотока, ед./ч	6,5	8,1	16,1
Интервал движения по маршруту в период наибольшей мощности пассажиропотока, мин	9	7	4
Максимальный коэффициент использования вместимости подвижного состава	0,55		
Коэффициент безубыточного использования вместимости подвижного состава	0,23	0,29	0,52
Число автобусов на маршруте, ед.	20	25	50
Минимальное среднее время работы подвижного состава на маршруте, ч	6,9		
Максимальное среднее время работы подвижного состава на маршруте, ч	16,8	13,1	7,3
Средний интервал движения точки безубыточности, мин	10	10	9
Средний интервал движения (при среднем времени работы подвижного состава на маршруте 11 ч), мин	15	12	
Коэффициент использования вместимости	0,32	0,32	

Из таблицы 2 видно, что рассматриваемый маршрут можно обслуживать автобусами большого или среднего класса. Применение автобуса малого класса нецелесообразно из-за высокого значения коэффициента безубыточного использования вместимости (0,52), который близок к максимальному значению коэффициента использования вместимости маршрута (0,55).

На городских маршрутах г. Красноярска подвижной состав работает на маршрутах в среднем 11 ч в день. В этой связи в таблице 2 даны средний интервал движения по маршруту и коэффициент использования вместимости при 11 ч работы на маршруте.

Преимущества использования автобуса большого класса по сравнению со средним:

- меньшее число подвижного состава на пять единиц, что актуально в условиях дефицита водителей;

- ниже значение коэффициента безубыточного использования вместимости, что обеспечивает более высокую эффективность перевозочного процесса;

- выше значение максимально возможного среднего времени работы на маршруте, что позволяет повысить качество обслуживания, например, за счет увеличения времени работы маршрута.

Недостатки применения на рассматриваемом маршруте автобусов большого класса по сравнению со средним: более высокий средний интервал движения по маршруту при одинаковой продолжительности работы автобусов, равной 11 ч.

При среднем времени работы на маршруте 11 ч оба рассматриваемых класса автобусов обеспечивают коэффициент использования вместимости, равный 0,32 в среднем за день работы транспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор пассажировместимости транспортных средств для обслуживания городских маршрутов является непростой задачей, решение которой связано с пропускной способностью линий, эффективностью и качеством функционирования общественного транспорта.

В статье на основании практических данных транспортных организаций показано, что стоимость эксплуатации автобусов линейно зависит от их вместимости. С другой стороны, затраты, приходящиеся на пассажиро-место, имеют нелинейный характер (см. рисунок 2). При одинаковых тарифах для обеспечения рентабельной перевозки автобусы меньшей вместимости должны эксплуатироваться с более высокой степенью заполнения салона, в результате снижается качество транспортного обслуживания.

В настоящей работе приведены рекомендации по выбору вместимости транспортных средств для обслуживания городских регулярных маршрутов с учетом неравномерности пассажирских потоков, а также влияния используемого класса подвижного состава на эффективность (экономические параметры) перевозочного процесса. Показано, что автобусы малого класса при использовании на регулярных маршрутах со значительной неравномерностью пассажирских потоков не обеспечивают нормативные параметры эффективности и качества транспортного обслуживания. Рентабельная эксплуатация данных автобусов достигается при использовании вместимости салона более 50%, что невозможно на многих маршрутах общественного транспорта вследствие неравномерности пассажирских потоков.

Выбор вместимости подвижного состава для обслуживания маршрута обуславливается следующими факторами:

мощность пассажирских потоков и заданные (стандартами и пропускной способностью линии) значения интенсивности движения транспортных средств;

верхний предел коэффициента использования вместимости, который обуславливается неравномерностью пассажиропотоков внутри часовой и по длине оборота по маршруту;

нижний предел коэффициента использования вместимости, который определяется точкой безубыточной эксплуатации подвижного состава, зависящей от доходов на одного перевезенного пассажира (складываются из пассажирского тарифа и бюджетных субсидий).

Таким образом, в данной работе предложено решение задачи выбора вместимости подвижного состава, исходя из компромисса между качеством и эффективностью транспортного обслуживания. Решение задачи проиллюстрировано на примере реального маршрута пассажирского транспорта общего пользования г. Красноярска.

Направления дальнейших исследований:

1. Осуществить решение задачи с учетом взаимного влияния маршрутов общественного транспорта.

2. Рассмотреть условия, возникающие при финансировании по брутто-контрактам, в соответствии с которыми оплата работы перевозчиков зависит от выполненной транспортной работы (пробега по маршруту или времени его обслуживания без учета перевезенных пассажиров).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Guihaire V., Hao J-K. Transit network design and scheduling: A global review // *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008. Vol. 42, Iss. 10. P. 1251–1273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.011>.
2. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis MG (2015) Sustainable urban transit network design. *Transp Res Part A Policy Pract* 77:276–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>
3. Duran-Micco J., Vermeir E., Vansteenwegen P Considering emissions in the transit network design and frequency setting problem with a heterogeneous fleet. *Eur J Oper Res.* 2020. 282: 580–592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.050>
4. Owais M. Osman M.K. Complete hierarchical multi-objective genetic algorithm for transit network design problem. *Expert Syst Appl.* 2018. 114:143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.07.033>
5. Дрючин Д.А., Майоров М.А. Основные направления повышения качества транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом по регулярным маршрутам // *Вестник Оренбургского государственного университета.* 2015. № 4. (179). С. 30–36.
6. Дрючин Д.А. Оптимизация численности автотранспортных средств, обслуживающих регулярные маршруты городских агломераций / Д. А. Дрючин, Т. В. Коновалова, Е. А. Лебедева [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Оренбургский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ). Краснодар: Издательский дом «Юг», 2024. 177 с.
7. Дрючин Д.А. Совершенствование структуры городского пассажирского наземного транспортного комплекса на основе согласованного развития подсистем // *Вестник СибАДИ.* 2024; 21(1): 74–87.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-74-87>. EDN: TOXJIX

8. Manser P., Becker H., Hörl S., Axhausen K.W. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation. *Transp Res Part A Policy Pract.* 2020.137: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.04.011>

9. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem // *Public Transport.* 2022. Vol. 14, Iss. 1. P. 155–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00284-y>.

10. Farahani R.Z., Miandoabchi E., Szeto W.Y., Rashidi H. A review of urban transportation network design problems // *European Journal of Operational Research.* 2013. Vol. 229, Iss. 2. P. 81–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.

11. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey // *SORT.* 2014. Vol. 38, Iss. 2. P. 181–214.

12. Furth P.G., and Wilson N.H. M. Setting Frequencies on Bus Routes: Theory and Practice. In *Transportation Research Record* 818, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1981. pp. 1–7.

13. Sharma A., Parida M., Sekhar C.R., Kathuria A. Capacity analysis of Bhopal BRTS using empirical and simulation model // *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.* 2015. 11. 1575–1593.

14. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem // *Public Transp.* 2021. 14. 155–190.

15. Кулев А.В., Ломакин Д.О. Социально-ориентированный подход назначения подвижного состава на маршруты городского пассажирского транспорта // *Мир транспорта и технологических машин*, №4-1(87). 2024. С. 38–45.

16. BUBA, Ahmed & E, Lai. (2018). A Differential Evolution For Simultaneous Transit Network Design And Frequency Setting Problem. *Expert Systems with Applications.* 106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.011>.

17. Фадеев А.И., Фомин Е.В. Определение оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования с учетом взаимного влияния маршрутов // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2018. №8 (139) С. 189–198

18. Wang Yu-Lan & Chen, Ming-Li & Lin, Scott. A Formulated Approximated Solution for a Bus Transit System with Peak and Normal Periods. *Journal of Advanced Transportation.* 2023. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/9011415>.

19. Liu Huasheng & Zhao, Yuqi & Li, Jin & Li, Yu & Gao, Xiangtao. Optimization Model of Transit Route Fleet Size Considering Multi Vehicle Type. *Sustainability.* 2021; 14. 193. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010193>.

20. 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. Том 13, № 3. С. 180–202. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-180-202>

21. Паршакова К.А., Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Влияние характеристик пассажиропотоков на эффективность суточных планов интервалов движения городского транспорта // *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике.* 2024; (4): 43–46.

22. Потафеева Е.С., Огар Т.П., Панфилов А.Э., Харитонов И.М. Модель подвижного состава городского пассажирского общественного транспорта // *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2024. Вып. 3. С. 172–174.

23. Фадеев А.И., Фомин Е.В., Алхуссейни С. Определение предельно допустимого коэффициента использования вместимости городского пассажирского транспорта // *Вестник СибАДИ.* 2019; 16(3): 290–301. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-290-301>

24. Jara-Díaz, Sergio & Gschwender, Antonio The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services // *Transportation.* 2009. 36. 65–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-008-9182-8>.

25. Фадеев А.И., Ильянков А.М., Укадеров В.В. Распределение корреспонденций по сети в задачах проектирования перевозок городским пассажирским транспортом общего пользования // *Вестник СибАДИ.* 2023;20(3):362–386. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>. EDN: YNNWNU

REFERENCES

1. Guihaire V., Hao J-K. Transit network design and scheduling: A global review. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008; Vol. 42, Iss. 10: 1251–1273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.011>.

2. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis MG (2015) Sustainable urban transit network design. *Transp Res Part A Policy Pract.* 77: 276–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>

3. Duran-Micco J., Vermeir E., Vansteenwegen P. Considering emissions in the transit network design and frequency setting problem with a heterogeneous fleet. *Eur J Oper Res.* 2020; 282: 580–592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.050>

4. Owais M. Osman M.K. Complete hierarchical multi-objective genetic algorithm for transit network design problem. *Expert Syst Appl.* 2018; 114: 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.07.033>

5. Dryuchin D.A., Mayorov M.A. The main directions of improvement of quality of transport service of the population city passenger transport along regular routes. *Vestnik of the Orenburg State University.* 2015; 4 (179): 30–36. (in Russ.)

6. Driuchin D.A., Konovalova T.V., Lebedeva E.A. [i dr.] Optimization of the number of vehicles serving regular routes of urban agglomeration; *Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniia Rossiiskoi Federatsii, Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, Kubanskii*

gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet (KubGTU). Krasnodar: Izdatel'skii dom «IUg», 2024:177. (in Russ.)

7. Dryuchin D.A. Improvement of urban passenger ground transport structure based on coordinated development of subsystems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(1): 74–87. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-74-87>. EDN: TOXJIX

8. Manser P., Becker H., Hörl S., Axhausen K.W. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation. *Transp Res Part A Policy Pract.* 2020; 137: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.04.011>

9. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem. *Public Transport*. 2022; Vol. 14, Iss. 1: 155–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00284-y>.

10. Farahani R.Z., Miandoabchi E., Szeto W.Y., Rashidi H. A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*. 2013; Vol. 229, Iss. 2: 81–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.

11. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey. *SORT*. 2014; Vol. 38, Iss. 2: 181–214.

12. Furth P.G., and Wilson N.H. M. Setting Frequencies on Bus Routes: Theory and Practice. In *Transportation Research Record 818*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1981: 1–7.

13. Sharma A., Parida M., Sekhar C.R., Kathuria A. Capacity analysis of Bhopal BRTS using empirical and simulation model. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2015; 11: 1575–1593.

14. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem. *Public Transp.* 2021; 14: 155–190.

15. Kulev A.V., Lomakin D.O. Socially-oriented approach to assigning rolling stock to urban passenger transport routes. *World of transport and technological machines*. 2024; 4-1(87); 38–45.

16. BUBA, Ahmed & E. Lai. A Differential Evolution For Simultaneous Transit Network Design And Frequency Setting Problem. *Expert Systems with Applications*. 2018; 106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.011>.

17. Fadeev A.I., Fomin E.V. Determination of the optimal structure of the fleet of rolling stock of public urban passenger transport, taking into account the mutual influence of routes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018; 8 (139): 189–198. (in Russ.)

18. Wang Yu-Lan & Chen, Ming-Li & Lin, Scott. A Formulated Approximated Solution for a Bus Transit System with Peak and Normal Periods. *Journal of Advanced Transportation*. 2023; 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/9011415>

19. Liu Huasheng & Zhao, Yuqi & Li, Jin & Li, Yu & Gao, Xiangtao. Optimization Model of Transit Route

Fleet Size Considering Multi Vehicle Type. *Sustainability*. 2021; 14. 193. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010193>.

20. Rassokha V.I., Dryuchin D.A., Nadiryan S.L. Optimization of the structure of the fleet of trackless vehicles serving urban passenger routes based on the results of mathematical. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; Vol. 13, No. 3: 180–202. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-180-202>

21. Parshakova K.A., Yakunin N.N., Yakunina N.V. The influence of passenger flow characteristics on the efficiency of daily urban transport interval plans. *Transport of the Russian Federation*. 2024; (4): 43–46. (In Russ.)

22. Potafeeva E.S., Ogar T.P., Panfilov A.E., Kharitonov I.M. Model of the rolling stock of urban passenger public transport. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; Issue 3: 172–174. (In Russ.)

23. Fadeev A.I., Fomin Ye.V., Alhusseini S. URBAN PUBLIC TRANSPORT: MARGINAL VALUE OF THE CAPACITY FACTOR. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(3): 290–301. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-290-301>

24. Jara-Díaz, Sergio & Gschwender, Antonio. The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services. *Transportation*. 2009; 36: 65–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-008-9182-8>.

25. Fadeev A.I., Iliankov A.M., Ukaderov V.V. Correspondence distribution over a network in designing public urban passenger transportation tasks. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(3): 362–386. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>. EDN: YNNWNU

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А.И. Постановка задачи, разработка математической модели, анализ результатов, формулирование заключения.

Ильянков А.М. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, обзор литературных источников.

Поляков А.С. Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников, участие в подготовке исходных данных и расчетах.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Fadeev A.I. Problem statement, mathematical model development, analysis of results, formulation of conclusion

Ilyankov A.M. Participation in the preparation of initial data and calculations, review of literary sources

Polyakov A.S. Analysis of the issue status, review of literary sources, participation in the preparation of initial data and calculations

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN-код: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Ильянков Алексей Михайлович – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>,

e-mail: ilyankov3322@mail.ru

Поляков Андрей Сергеевич – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3860-5968>,

e-mail: polyak97@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Fadeev Alexander I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Transport, Siberian Federal University (26, Akademika Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN code: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Ilyankov Alexey M. – postgraduate student of the Department of Transport, Siberian Federal University, (26, Akademika Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>,

e-mail: ilyankov3322@mail.ru

Polyakov Andrey S. – postgraduate student of the Department of Transport, Siberian Federal University, (26, Akademika Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3860-5968>,

e-mail: polyak97@yandex.ru