
МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ПАССАЖИРОПОТОКА В ГОРОДЕ

Кулаков Игорь Евгеньевич,

аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет

Россия, Санкт-Петербург

ozerkispb@gmail.com

Аннотация

Быстрый рост и расширение агломераций сталкивается с ограниченными возможностями городских транспортных систем, недостаточностью маршрутов, что влечет за собой проблемы с удовлетворением потребности людей в передвижении. Вследствие этого часто возникают заторы, не соблюдаются графики движения транспорта, увеличиваются простои, особенно в утренние и вечерние часы пик. Для решения этой проблемы необходимым является разработка действенных мер управления городским транспортом на основе эффективной оценки пассажиропотока. В статье предложена модель формирования рационального пассажиропотока в городе, основанная на итерационном алгоритме.

Ключевые слова: город, транспорт, пассажиры, поток, модель, путь.

MODEL FOR FORMING A RATIONAL PASSENGER FLOW IN THE CITY

Igor E. Kulakov,

postgraduate student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Russia, Saint Petersburg

ozerkispb@gmail.com

ABSTRACT

The rapid growth and expansion of cities is hampered by the limited capacity of urban transport systems and insufficient routes, which together are no longer able to meet people's travel needs. As a result, traffic jams often occur, transport schedules are not adhered to, and downtime increases, especially during morning and evening rush hours. To solve this problem, it is necessary to develop effective urban transport management measures based on an efficient assessment of passenger flow. The article proposes a model for the formation of rational passenger flow in a city, based on an iterative algorithm

Keywords: city, transport, passengers, flow, model, route.

Высокие темпы урбанизации, наблюдаемые в последние годы, создают ряд серьезных проблем в сфере городского пассажирского транспорта, что, в свою очередь, приводит к увеличению пробок, росту выбросов углеродных соединений и общему снижению качества жизни населения [5]. Устойчивое развитие городов призвано решить эти проблемы путем создания эффективной, надежной и удобной системы общественного транспорта, а также внедрения адаптивных методов управления и рационального распределения пассажиропотока в городе.

В данном контексте очевидным является тот факт, что пассажирские транспортные узлы являются незаменимыми компонентами городской транспортной системы и представляют собой основополагающие условия для ее эффективного функционирования. Когда пассажирские транспортные узлы сталкиваются с внешними возмущениями, такими как внезапное увеличение плотности пассажиропотока в часы пик или снижение пропускной способности из-за неисправностей оборудования, это может легко привести к массовым заторам и даже к инцидентам с давкой [2]. Это в свою очередь выдвигает на первый задачи повышения эффективности пассажирских перевозок и обеспечения быстрого приёма и распределения потоков людей. О важности данной задачи наглядно свидетельствуют данные, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 Сравнительная характеристика рационального и нерационального пассажиропотока в городском транспорте¹

Показатель	Рациональный пассажиропоток	Нерациональный пассажиропоток	Комментарий
Средняя загрузка подвижного состава	60–85%	<30% или >110%	Оптимальный уровень загрузки подвижного состава обеспечивает экономичность эксплуатации транспорта и комфорт пассажиров
Коэффициент использования вместимости в пиковые часы	0,8–0,95	<0,6 или >1,1	Показатель равномерности распределения пассажиров
Среднее время ожидания на остановке	3–7 мин	>10 мин	Высокое время ожидания снижает привлекательность общественного транспорта
Средняя скорость сообщения (км/ч)	18–25	<12	Характеризует уровень организации движения
Коэффициент пересадки (среднее число пересадок на пассажира)	1,1–1,3	>1,5	Меньше пересадок – рациональнее структура маршрутов

¹ Составлено автором на основе данных ГОСТ Р 51019-97, Минтранс РФ (2014), UITP (2019) и обобщённых результатов научных исследований

Коэффициент неравномерности пассажиропотока ($K_n = Q_{\max} / Q_{\text{ср}}$)	$\leq 1,4$	$\geq 2,0$	Показывает разброс загрузки по времени суток
Доля пассажиров в стоячем положении	$\leq 25\%$	$> 50\%$	Превышение указывает на перегрузку маршрута
Плотность пассажиров в салоне (чел./м ²)	3–4	> 6	Превышение снижает комфорт и безопасность
Пропускная способность коридора (пасс/час в одном направлении)	4000–9000 (BRT), 15000+ (метро)	< 2000 при избыточных мощностях	Рациональность выбора вида транспорта
Энергоёмкость перевозок (кВт ч/пасс км)	0,05–0,08	$> 0,12$	Нерациональные маршруты увеличивают расход энергии

Неправильное реагирование на рискованные события в пассажирских транспортных узлах способно повлечь за собой серьезные экономические и социальные последствия. Поэтому моделирование динамического распределения пассажиропотока может помочь операторам своевременно корректировать стратегии и распределение ресурсов, тем самым повышая эффективность работы городского транспорта и уровень обслуживания населения. Кроме того, в случае непредвиденных событий это может эффективно решить проблемы скопления пассажиров, снижения рисков безопасности и т.д., обеспечив надежность и бесперебойность пассажирских перевозок.

Таким образом актуальность, научная и практическая значимость задачи исследования динамической закономерности изменения распределения пассажиропотока в городе и его объема, а также проектирования пропускной способности пассажирских транспортных узлов, предопределили выбор темы данной статьи.

Научные основы организации и контроля пассажиропотока в городском пространстве, а также характеристики движения и законы, регулирующие движение пассажиров в сложной среде современных мегаполисов, рассматривают в своих трудах Проскураева Е.А., Казанская Л.Ф., Легкий С.А., Корастелев Д.С., Коновалова Т.В., Надирян С.Л., Котенкова И.Н.

Изучение проблемы точного прогнозирования пассажиропотока для построения современных интеллектуальных транспортных систем в соответствии с концепцией «умного города», входит в круг научных интересов Ромаха Е.А., Карпачевского А.М., Халтурина Р.А., Никитина Д.В., Каштанова И.Ю., Постниковой А.А., Янучкова М.Р.

Несмотря на широкий спектр публикаций и активное внимание ученых к рассматриваемой тематике, необходимо отметить, что существующие модели пассажиропотока в городах по-прежнему имеют определенные ограничения при моделировании в транспортных, динамических узлах. Например, микроскопические модели сосредоточены на индивидуальном поведении и взаимодействиях, что делает их сложными и непригодными для описания движения больших толп. Существующие макроскопические модели, такие как модели континуума, обычно описываются в виде уравнений в частных производных или интегральных уравнений, что делает их построение и решение весьма сложными.

Таким образом, с учетом вышеизложенного, цель статьи заключается в рассмотрении подходов к построению модели формирования рационального пассажиропотока в городе.

Станции городского транспорта обычно имеют многоуровневую трехмерную пространственную структуру, включая зал станции, платформы, входы и выходы, каналы и

другие типы пространств. Кроме того, станции также оснащены инфраструктурой и оборудованием, таким как пункты досмотра, турникеты, лестницы и эскалаторы, чтобы предоставлять пассажирам транспортные услуги и распределять пассажиропоток [3]. В процессе поездки пассажиры пользуются услугами, предоставляемыми оборудованием и объектами на станции, или выполняют ряд действий в определенном порядке, формируя таким образом определенный процесс и маршрут движения, известный как линия пассажиропотока. Линия пассажиропотока определяет маршрут путешествия пассажира, а также служит основой для имитационного моделирования и проектирования процессов движения [4].

На платформе городского транспортного узла пассажиропоток можно разделить на поток пассажиров, сающихся в транспортное средство, и поток пассажиров, выходящих из транспортного средства; кроме того, его также можно разделить на поток пассажиров, совершающих пересадку, и поток пассажиров, не совершающих пересадку. Классификация пассажиропотока показана на рисунке 1. PF- i – упрощенный символ, обозначающий соответствующий пассажиропоток, $i=1,2,3,4$.



Рис. 1 Классификация пассажиропотока на платформе городского транспортного узла (составлено автором)

В существующих на сегодняшний день публикациях для прогнозирования, моделирования и формирования рационального пассажиропотока в городе используются различные статистические методы и методы машинного обучения, в том числе регрессионный анализ, методы опорных векторов, искусственные нейронные сети, байесовские модели, методы градиентного усиления и т.д. [5]. В рамках данной статьи будем использовать метод процессного моделирования (process modeling). Выбор данного метода объясняется тем, что он позволит наглядно показать:

Последовательность этапов формирования маршрутной сети.

Логические связи и поток управления пассажиропотоком.

Итерационные циклы (обратные связи для оптимизации и корректировки маршрутов).

На рис. 2 представлена разработанная автором модель формирования рационального пассажиропотока в городе.

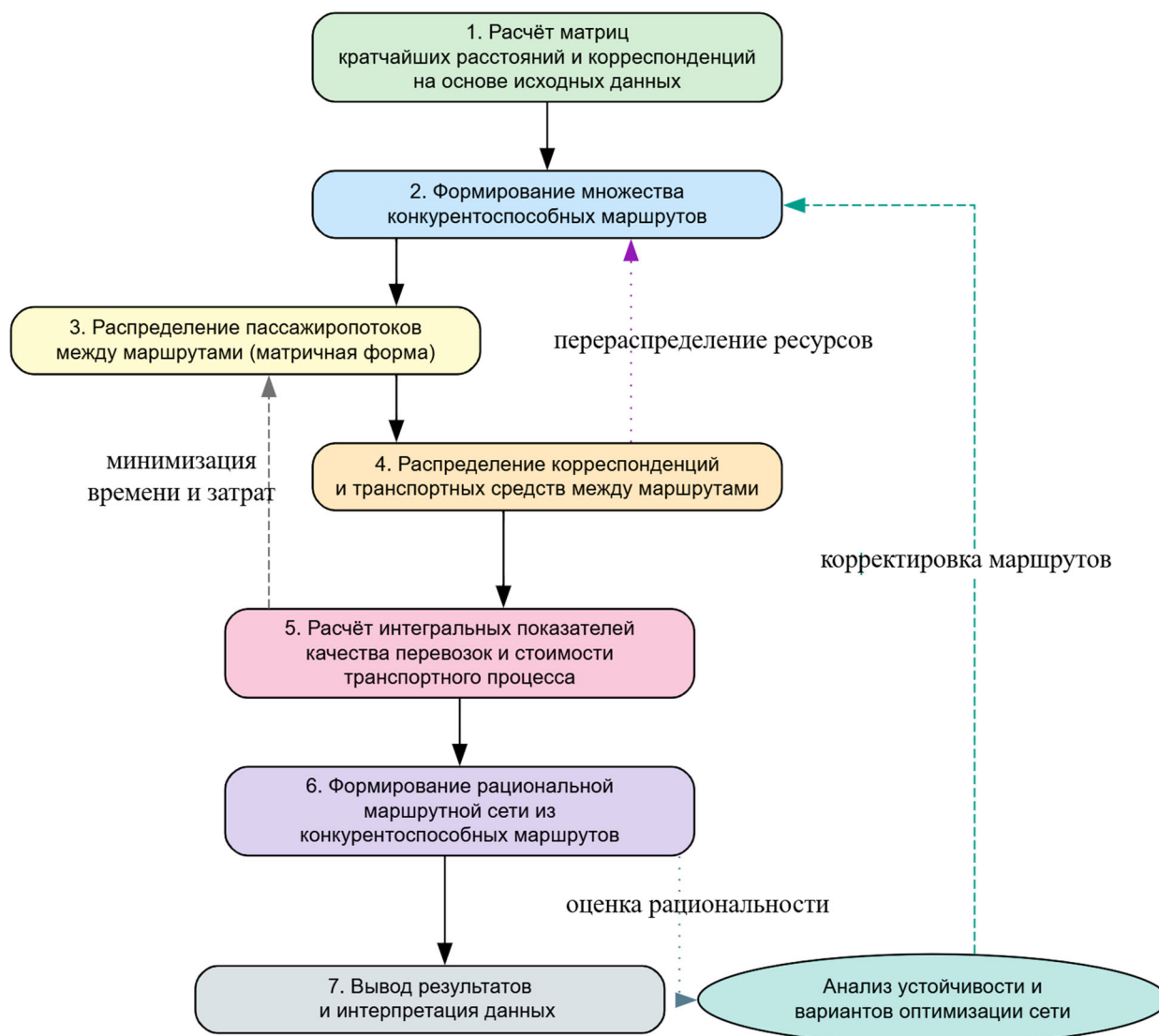


Рис. 2 Концептуальная модель формирования рациональной маршрутной сети городского пассажирского транспорта (составлено автором)

Основу концептуальной модели, показанной на рис. 2, составляет итерационный алгоритм. Опишем его более подробно.

Основной (линейный) поток: процесс начинается с этапа (1) - расчёт матриц, где на основе исходных данных определяются кратчайшие расстояния и существующие корреспонденции (пассажиропотоки между точками). С использованием этой информации на этапе (2) формируется начальное множество конкурентоспособных маршрутов. Далее модель последовательно распределяет пассажиропотоки (3) и транспортные средства между этими маршрутами (4). После этого (5) производится расчёт интегральных показателей (качества перевозок и стоимости) для полученной конфигурации сети. На основе этих расчетов (6) формируется итоговая рациональная маршрутная сеть, и (7) результаты выводятся для анализа.

Достоинством и отличительной особенностью, предложенной автором модели от уже существующих аналогов, является наличие нескольких контуров обратной связи, которые превращают линейный процесс в итерационный, а именно:

цикл оптимизации ($n_5 \rightarrow n_3$): после расчёта показателей (5), модель может вернуться к этапу (3) для перераспределения пассажиропотоков с целью минимизации времени и затрат движения;

цикл стратегической коррекции ($n_6 \rightarrow \text{анализ} \rightarrow n_2$): сформированная рациональная сеть (6) передается в блок (Анализ) для оценки ее устойчивости. По результатам анализа

модель может вернуться к этапу (2) для корректировки (изменения, добавления или удаления) набора конкурентоспособных маршрутов;

цикл перераспределения ресурсов ($n_1 \rightarrow n_2$): результаты распределения транспортных средств (4) также могут служить основанием для возврата к этапу (2) и изменения набора маршрутов.

Рассмотрим теперь постановку задачи формирования рационального пассажиропотока в городе с точки зрения математической формализации.

Итак, в качестве исходных данных для создания модели формирования рационального пассажиропотока могут выступать топологические схемы городов и величины емкости транспортных районов этих городов (по количеству отправленных и прибывших пассажиров). Для определения параметров необходимо проводить регулярный анализ пассажиропотоков. При этом важным условием является необходимость соблюдения сбалансированности матрицы корреспонденций по емкости транспортных районов:

$$\sum_{j=1}^n E_{Z_i} = \sum_{j=1}^n E_{Y_j}$$

где E_{Z_i} – объем отправления из транспортного района на протяжении расчетного периода времени, пас.;

E_{Y_j} – объем прибытия в транспортный район на протяжении расчетного периода времени, пас.

Исходные данные определяют потребность в перемещениях пассажиров в утренний и вечерний период «пик», продолжительность которого составляет 1–2 часа.

Целевая функция маршрутизации рационального пассажиропотока в городе, в соответствии с исходными данными, позволяет установить сумму затрат на эксплуатацию транспорта за рассматриваемый период времени и стоимостную оценку реализации транспортного процесса. Рассчитывается функция по формуле:

$$\sum_i^N \sum_j^N \sum_z^n \left(h_{ijz} \times \sum_K^M (A \times t_r + B \times t_d \times \gamma_l) \right) + \sum_i^G (C_{pi} \times V + C_{fi}) \times N_{ai} \times T_u \rightarrow \min$$

где N – количество транспортных районов в городе;

n – количество возможных вариантов маршрута из i в j ;

h_{ijz} – количество пассажиров, следующих по маршруту z из района i в район j ;

M – количество посадок (маршрутных поездок) на маршруте z ;

A, B – коэффициенты интенсивности дорожного движения;

t_r – время ожидания k -й посадки;

t_d – продолжительность k -й маршрутной поездки;

γ_l – динамический коэффициент использования вместимости;

G – количество марок транспортных средств, работающих на маршрутах;

C_{pi}, C_{fi} – переменные и постоянные затраты на эксплуатацию i -й марки транспортного средства соответственно;

N_{ai} – необходимое количество транспортных средств i -й марки;

T_u – продолжительность расчетного периода.

В целях повышения точности формирования рационального пассажиропотока в городе для разных видов транспортных систем (автомобильный, железнодорожный, метро и т.д.) в модель представляется целесообразным включить не только детерминированные временным фактором независимые переменные (час, день, месяц, день недели), но и

внешние условия, такие как школьные дни, государственные праздники и атмосферные показатели (температура, осадки, влажность, скорость ветра, облачность и снегопад), которые могут влиять на пассажиропоток.

Таким образом, подводя итоги, отметим, что рост плотности населения и урбанизации в городах привел к концентрации деловых центров, жилых массивов в определенных районах, что оказывает значительное давление на транспортную инфраструктуру. Эта нагрузка отрицательно влияет на эффективность систем общественного транспорта, способствует росту количества заторов на дорогах и увеличивает время в пути.

В статье для формирования рационального пассажиропотока в городе разработана модель, которая основана на итерационном алгоритме. Преимуществом предложенной модели является наличие нескольких контуров обратной связи, которые превращают линейный процесс в циклический и адаптивный.

Список литературы:

1. Казанцева Е.Ю., Демченко А.С., Даненова Г.Т., Яворский В.В. Построение программно-аналитической модели пассажирских корреспонденций в рамках городской агломерации // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. 2022. № 1. С. 78-91.
2. Калюжный Н.А., Лосин Л.А., Солодилов В.В. Выявление потенциальных городских центров на основе моделирования пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2024. № 2 (77). С. 144-155.
3. Александренко А.С. Имитационная модель оценки эффективности работы системы общественного транспорта в условиях изменения маршрута // Транспортное дело России. 2025. № 3. С. 164-166.
4. 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.
5. Шеховцов С.И., Скоробогатченко Д.А., Панфилов А.Э. Алгоритм поминутной генерации пассажиропотока в системе городского общественного электротранспорта // Известия Тульского государственного университета. 2024. № 12. С. 168-174.

References:

1. Kazantseva E.Yu., Demchenko A.S., Danenova G.T., Yavorsky V.V. Building a software and analytical model of passenger connections within an urban agglomeration // Bulletin of Almaty University of Energy and Communications. 2022. No. 1. Pp. 78-91.
2. Kalyuzhny N.A., Losin L.A., Solodilov V.V. Identification of potential urban centres based on passenger flow modelling (using the example of St. Petersburg) // Economics of the North-West: problems and prospects for development. 2024. No. 2 (77). Pp. 144-155.
3. Aleksandrenko A.S. Simulation model for assessing the efficiency of the public transport system in the context of route changes // Transport Business in Russia. 2025. No. 3. Pp. 164-166.

4. Rassokha V.I., Nadiryan S.L. Modelling of urban passenger transport efficiency indicators when serving non-stationary passenger flows // World of Transport and Technological Machines. 2023. No. 4-1 (83). Pp. 81-90.
5. Shekhovtsov S.I., Skorobogatchenko D.A., Panfilov A.E. Algorithm for minute-by-minute generation of passenger flows in the urban public electric transport system // News of Tula State University. 2024. No. 12. Pp. 168-174.