УДК 656.121

© Д. Т. Оспанов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: ospanovdt@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-4-138-144

© D. T. Ospanov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: ospanovdt@mail.ru

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

METHODOLOGY OF DESIGNING AN INTEGRATED ROUTE NETWORK OF MUNICIPAL PASSENGER TRANSPORT

Рассмотрен вопрос планирования маршрутов в системе городского пассажирского транспорта (ГПТ). Разработаны принципы распределения пассажиропотоков между маршрутами различных ГПТ. Предложен алгоритм выбора городских пассажирских маршрутов для системы, включающей более одного вида транспорта, различных по вместимости и скорости сообщения. За основу взята известная ранее методика выбора рациональной схемы автобусных маршрутов и развита в части порядка выполнения расчетов. Описан метод оценки оптимальности полученной маршрутной сети и введен новый показатель — «идеальное значение суммарных затрат времени пассажиров».

Ключевые слова: пассажирские перевозки, маршрутная сеть, планирование маршрутов, маршрутизация, интегральная маршрутная сеть.

The article considers the issue of planning routes in the system of urban passenger transport (UPT). Principles for the distribution of passenger flows between different UPT routes have been developed. An algorithm is proposed for selecting urban passenger routes for the system including more than one type of transport of various capacity and speed of communication. The previously known method of choosing a rational scheme of bus routes is used as a basis, and it is developed in terms of the order of calculations. The author proposes a method for assessing the optimality of the resulting route network and introduces a new indicator, «the ideal value of the total cost of passenger time».

Keywords: passenger transportation, route network, route planning, routing, integrated route network.

Среди задач по совершенствованию функционирования городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТ) проектирование маршрутной сети (МС) занимает центральное место. Именно рационально спроектированная маршрутная сеть позволяет существенно повысить качество услуг населению при одновременном улучшении эксплуатационных характеристик транспорта. Система ГПТ для наиболее полного удовлетворения разнообразного спроса населения на пассажирские перевозки должна включать разные виды транспорта, как по провозной способности, так и по скорости сообщения.

Подавляющее большинство известных методик проектирования МС ГПТ рассматривают МС, состоящую из автобусных маршрутов, т. е. для одного вида ГПТ. Целостные процедуры

проектирования автобусных маршрутов развиты на базе методики НИИАТ [8], где выбор схемы городских автобусных маршрутов представлен как экономико-математическая задача. Сущность методики НИИАТ заключается в следующем. Улично-дорожная сеть застроенной части города представляется схематически в виде математического плоского графа, состоящего из узлов (транспортных микрорайонов) и соединяющих их дуг (кратчайших расстояний по времени). Изначально рассматривается совокупность возможных маршрутов, связывающих каждый микрорайон со всеми остальными и исключающих какие-либо пересадки. При этом количество маршрутов m будет наибольшее:

$$m = ((n - 1)n)/2,$$

где n — число микрорайонов.

Так, при обслуживании 30 микрорайонов количество возможных маршрутов составит 435. Из них сначала назначаются беспересадочные маршруты по направлениям с наибольшими пассажиропотоками, обеспечивающими среднее время ожидания на остановочном пункте меньшее, чем время на пересадку при альтернативной поездке. Затем для микрорайонов, оставшихся без сообщений, назначаются короткие «участковые» маршруты и дополнительные беспересадочные маршруты. При отборе маршрутов могут быть заданы ограничения — интервал движения, коэффициент использования вместимости подвижного состава, минимальная и максимальная длина маршрута, разрешенные конечные пункты и т. д.). Общее количество возможных комбинаций маршрутов, то есть количество вариантов маршрутных схем определяется по выражению

$$2^{(n-1)n} - 1.$$

Это невероятно огромное число, даже несмотря на введение ограничений для маршрутов. Поэтому задача решается поэтапно и с применением метода комбинаторного анализа с направленным отбором вариантов, предложенного В. А. Паршиковым [14]. Следует отметить, что оптимальность результата решения задачи по отношению к схемам городских автомобильных маршрутов имеет, как правило, условный характер, поэтому наиболее корректно называть его рациональным.

В последующем эта методика послужила основой для исследований, в которых предложены несколько иные подходы к вопросу. Были предложены дополнительные ограничения: безусловное исключение маршрутов и ввод обязательных маршрутов, количество автобусов в наличии [19]. Выбраны другие критерии оптимизации — коэффициент пересадочности [2] и др. Предложено ввести в алгоритм расчета маршрутной сети эвристические корректировки экспертным путем [6]; учитывать влияние на скорость сообщения ГПТ технического состояния улично-дорожной сети города [4]; основать расчет на модели прогнозирования пассажиропотоков с учетом стоимости перемещения [7].

Сложным МС посвящены лишь отдельные труды, в которых:

1) обоснована целесообразность и возможность совмещения маршрутов, обслуживаемых

разными видами ГПТ с различной скоростью сообщения [15];

2) рассматриваются вопросы организации различных форм сообщения: обычные, экспрессные, полуэкспрессные, скоростные, укороченные и комбинированные [1, 3, 5, 10, 11, 16–19];

3) предложено при формировании рациональной маршрутной схемы комбинировать методы построения маршрутных схем для города в целом («методы общей маршрутизации») и методы, предназначенные для корректировки отдельно взятых маршрутов («методы локальной маршрутизации») [19];

4) предложен метод реконструирования существующей схемы маршрутов, основанный на последовательном формировании маршрутов из отдельных связей в случае совпадения начальных, конечных или промежуточных пунктов [9];

5) представлен метод распределения пассажиропотоков с помощью имитационного моделирования. Здесь различают три вида сетей ГПТ: сети независимых (недублируемых) маршрутов, сети с разделяющимися зависимыми пассажиропотоками и сложные сети [13];

6) предложены два разных подхода к планированию МС: «Портной» и «Готовый». Первый предусматривает функционирование различных маршрутных сетей в зависимости от дней недели и времени суток, второй — один вариант маршрутной сети с регулированием лишь частоты движения транспорта на маршрутах и считается предпочтительным [20];

7) предложено упрощать непрямолинейные маршруты и объединять дублирующие маршруты, заменяя их магистральными и подвозящими маршрутами [21].

Однако следует отметить недостатки и ограниченность всех ранее предложенных методов:

1) постановка задачи не всегда соответствует цели оптимизации МС — достижению минимальных суммарных затрат времени пассажиров на ожидание посадки, следование и пересадки при приемлемом уровне использования вместимости подвижного состава (ПС);

2) чрезмерно крайняя минимизация уровня пересадочности на маршрутах как критерия оптимальности [2] неизбежно приведет к увеличению затрат времени пассажиров на ожидание

или увеличение эксплуатационных затрат транспорта;

3) учитывать ограниченность наличия подвижного состава [19] нецелесообразно, так как должны быть перевезены все пассажиры;

4) в методе реконструкции МС [9] после нескольких этапов приближений возникает ситуация, когда результат объединения или разъединения маршрутов становится непредсказуемым и нужно перебрать все возможные варианты. Данный метод слишком трудоемкий и при этом ввиду отсутствия единого математического расчета не гарантирует получение оптимального решения;

5) затраты времени на поездки переводить в денежное выражение и рассчитывать вместе с эксплуатационными затратами автопредприятий [12] нерационально, так как ценность времени пассажиров относительна и субъективна;

6) разные виды ГПТ и режимы сообщения представлены как набор маршрутов, их параметры рассчитываются без учета взаимного влияния; даны зависимости отдельных показателей, но не определен приоритет и порядок расчета;

7) сформулированные эвристические принципы не выражены в математических зависимостях, разработка МС производится «карандашом на карте» [20, 21]. В целом они основаны на простых расчетах и экспертном руководстве.

Таким образом, несмотря на многочисленные исследования в данном направлении, большинство методик предполагает проектирование маршрутной сети для автобусов, ограничиваясь одним видом транспорта, без варьирования вместимости подвижного состава. Это не позволяет проектировать маршрутную сеть, в которую могут быть интегрированы виды ГПТ с различной вместимостью и тем более с различной технической скоростью. До сих пор никем не предложена методика планирования единой МС, включающей несколько видов ГПТ.

Между тем реализованы не все возможности известной методики НИИАТ, позволяющей исполнить следующие требования:

1) обслужить по кратчайшим путям прямолнейные маршруты;

2) обеспечить экономию времени пассажиров: малые интервалы движения, высокая скорость сообщения, удобные пересадки;

3) контролировать комфортность поездки (допустимый уровень наполнения салона) и уровень пересадочности на МС;

4) эффективно использовать ПС (динамический коэффициент использования вместимости);

5) предварительно назначать обязательные маршруты и запрещать нежелательные;

6) реализовать разнообразные режимы работы ГПТ — обычный, скоростной, полуэкспресс, экспресс.

Для предлагаемой методики в качестве прототипа выбрана методика НИИАТ. Интегральная маршрутная сеть должна быть такой, чтобы каждый вид ГПТ дополнял все остальные и был применен на тех маршрутах, где проявит свои преимущества. Поэтому направления с наибольшими пассажиропотоками должны обслуживаться транспортом, имеющим соответственно наибольшую провозную способность. При этом необходимо учесть, что на совмещенных участках маршрутов, где их дублируют другие маршруты, для пассажиров более привлекательными будут маршруты с меньшими затратами времени на поездку. В связи с этим назначенные маршруты должны быть максимально прямолинейными и скорость сообщения должна быть выше. И время ожидания (соответственно и интервал движения) на этих маршрутах должно быть наименьшим.

По мере перехода к рассмотрению меньших пассажиропотоков допускается снижение скорости сообщения. А для сохранения приемлемых интервалов движения возможна замена вида ГПТ на другой с ПС меньшей вместимости.

Все маршруты трассируются по кратчайшим (по времени) путям.

В методике-прототипе сначала ведется расчет по выбору сквозных маршрутов (связывающий центры трех и более микрорайонов) и затем, где для них недостаточные условия, — расчет участковых маршрутов (связывающих центры двух соседних микрорайонов).

В случае возможности варьирования вместимости ПС вместо участковых маршрутов можно назначить дополнительные сквозные маршруты, обслуживаемые другим видом ГПТ. Для этого необходимо методику развить и учесть особенности каждого вида ГПТ.

Рассмотрим расчет маршрутов для трех видов ГПТ с различной скоростью сообщения (при одинаковых потерях времени на остановочных пунктах скорость сообщения каждого ГПТ прямо пропорционально зависит от их технических скоростей). Необходимо сначала рассчитать кратчайшие пути и все сквозные, участковые и дополнительные сквозные маршруты для первого ГПТ (с наибольшей провозной способностью и скоростью сообщения). Затем, проанализировав насколько удовлетворен спрос пассажиров назначенными маршрутами ГПТ № 1 (пересчет корреспонденций) и пересчитав кратчайшие пути, следует повторить расчет маршрутов, но теперь для ГПТ № 2, а после него — для ГПТ № 3 аналогично (рис. 1). И завершается задача расчетом параметров МС.

Проектирование МС при равных технических скоростях упрощается, так как все виды ГПТ можно привести к единому показателю (вместимости), от которого главным образом зависит провозная способность в условиях заданных минимальных и максимальных интервалов движения (рис. 2):

- 1) расчет кратчайших путей;
- 2) приведение интервалов всех видов ГПТ к единой (наименьшей) вместимости ($q_{\min}$);
- 3) расчет сквозных маршрутов ГПТ № 3 ($q_{\min}$);

4) распределение маршрутов между видами ГПТ в зависимости от расчетных интервалов;

5) расчет участковых и дополнительных сквозных маршрутов (при необходимости);

6) расчет параметров МС.

Для оценки оптимальности маршрутной сети необходимо сравнить полученное значение суммарных затрат времени пассажиров на поездку с предельно достижимым минимальным (идеальным). Затраты времени пассажиров на поездку для обоих случаев складываются из затрат времени на ожидание, следование и пересадки. Различия лишь в расчете времени на следование и времени на пересадки.

Затраты времени всех пассажиров на следование и пересадки для полученной маршрутной сети рассчитываются исходя из назначенных маршрутов, для ряда сообщений — с учетом пересадок и не обязательно по кратчайшему пути.

В идеальном случае затраты времени на пересадки будут равны нулю, так как для каждой отдельной корреспонденции назначается беспересадочный маршрут.

Поэтому затраты времени всех пассажиров на следование и пересадки для идеального случая рассчитываются как сумма произведений кратчайших расстояний на объемы корреспонденций (по исходным данным):

$$T_{\text{след}} = \sum P_{ij} l_{ij}$$

Рис. 1. Алгоритм проектирования МС для трех видов ГПТ с различными вместимостью и технической скоростью

Рис. 2. Алгоритм проектирования МС для трех видов ГПТ с различной вместимостью и одинаковой технической скоростью

где P_{ij} — объем корреспонденции из i в j ; l_{ij} — кратчайшее расстояние из i в j .

Время ожидания всех пассажиров на одном маршруте в одном направлении, по которому следует большой пассажиропоток, не зависит от числа пассажиров и составляет [8]

$$T_{\text{ож}} = cqT_p,$$

где c — коэффициент, учитывающий неравномерность подхода пассажиров к остановочному пункту, равен 0,5; q — принятая пассажироместимость единицы подвижного состава; T_p — расчетный период времени, для которого производится расчет маршрутной сети, равен 60 мин;

Среднее время ожидания на одном маршруте зависит от различия пассажиропотоков в прямом и обратном направлениях и составляет

$$t_{\text{ож}} = cqT_p(1 + P_{\text{min}}/P_{\text{max}})/((P_{\text{min}} + P_{\text{max}})\rho),$$

где ρ — коэффициент внутрисетевой неравномерности пассажирского потока, равный 1,1; P_{min} — количество пассажиров, едущих в меньшем направлении данного маршрута; P_{max} — количество пассажиров, едущих в большем направлении данного маршрута.

Библиографический список

1. Антошвили, М. Е., Либерман С. Ю., Спиринов И. В. Оптимизация городских автобусных перевозок. М.: Транспорт, 1985. 102 с.
2. Блатнов М. Д. Пассажирские автомобильные перевозки. М.: Транспорт, 1981. 222 с.
3. Бунеев В. М., Новоселов В. И., Путилова Н. Н. Эффективность городского пассажирского транспорта: методы оценки и обоснования. Новосибирск: НГАСУ, 2008. 415 с.

порта: методы оценки и обоснования. Новосибирск: НГАСУ, 2008. 415 с.

4. Бурлуцкий А. А. Обеспечение эффективности функционирования дорожной сети крупного города на основе учета ее взаимодействия с потоками пассажирского транспорта (на примере г. Томска): дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Бурлуцкий Андрей Александрович. Томск, 2015. 196 с.
5. Варелопуло Г. А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. М.: Транспорт, 1990. 208 с.
6. Вейцман, В. М. Разработка рациональных схем городских автобусных маршрутов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. М., 1987. 20 с.
7. Володченко С. В. Моделирование распределения пассажирских потоков в крупных городах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальность 05.22.10. СПб.: СПбГАСУ, 2005. 17 с.
8. Геронимус Б. Л., Егорова А. И., Паршиков В. А. Математическая методика определения схемы автобусных маршрутов в городах // Совершенствование планирования и организации автомобильных перевозок. М.: Транспорт, 1965. С. 43–79.
9. Глик Ф. Г. Интерактивное конструирование маршрутной системы городского пассажирского транспорта // Градостроительство. Киев: Будивельник, 1987. Вып. 39. С. 100–106.
10. Горев А. Э., Оспанов Д. Т. Проектирование систем городского пассажирского транспорта. СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2018. 256 с. Сер.: «Библиотека транспортного инженера».
11. Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок. М.: Высшая школа, 1980. 535 с.

12. Коробов С. А. Совершенствование пассажиро-перевозок на основе выбора рациональной структуры внутригородских перемещений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальность 05.22.10. Тюмень, 2009.

13. Ольховский С. Ю., Яворский В. В. Моделирование функционирования и развития маршрутизированных систем городского пассажирского транспорта. Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. 138 с.

14. Паршиков В. А. Приближенное решение комбинаторной задачи размещения комплекса устройств // Материалы к конференции по опыту и перспективам применения математических методов и ЭВМ в планировании. Новосибирск, 1962. 8 с.

15. Садыхова О. С. Исследование некоторых вопросов координации метрополитена и уличного пассажирского транспорта в крупном городе: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.12. Ленинградский инженерно-строительный институт. СПб., 1973. 196 с.

16. Сафронов Э., Сафронов К., Киммель Д. Начало реформирования ГПТ — совершенствование маршрутных сетей городов // Автомобильный транспорт. 2004. № 5. С. 57–58.

17. Спири́н И. В. Перевозки пассажиров городским транспортом. М.: Академкнига, 2006. 415 с.

18. Спири́н И. В. Научные основы комплексной реструктуризации городского пассажирского транспорта. М.: ИКФ «Каталог», 2007. 200 с.

19. Хрущёв М. В. Методы общей и локальной маршрутизации автобусного транспорта в городах. М.: ГУУ, 1999. 168 с.

20. Nielsen G., Nelson J., Mulley C., Tegner G., Lind G. and Lange T. Public Transport - Planning the Networks - HiTrans Best Practice Guide 2 / Stavanger: HiTrans, 2005. 180 p.

21. Mees P. Transport for Suburbia: Beyond the Automobile Age. London: Earthscan. Center for Urban Transportation Research. University of South Florida, 2009.

References

1. Antoshvili M. E., Liberman S. Yu., Spirin I. V. *Optimizatsiya gorodskikh avtobusnykh perevozok* [Optimization of urban bus transportation]. Moscow, Transport Publ., 1985, 102 p.

2. Blatnov M. D. *Passazhirskie avtomobil'nye perevozki* [Passenger automobile transportation]. Moscow, Transport Publ., 1981. 222 p.

3. Buneev V. M., Novoselov V. I., Putilova N. N. *Ehffektivnost' gorodskogo passazhirskogo transporta: metody otsenki i obosnovaniya* [Efficiency of urban passenger transport: methods of evaluation and justification]. Novosibirsk, NGAVT Publ., 2008, 415 p.

4. Burlutskiy A. A. *Obespechenie ehffektivnosti funktsionirovaniya dorozhnoy seti krupnogo goroda na osnove ucheta ee vzaimodeystviya s potokami passazhirskogo transporta (na primere g. Tomska)*. Diss. kand. tekhn. nauk [Ensuring the efficiency of the road network of a large city on the basis of its interaction with the flow of passenger transport (on the example of Tomsk). PhD in Sci. Tech. diss.]. Tomsk, 2015. 196 p.

5. Varelopulo G. A. *Organizatsiya dvizheniya i perevozok na gorodskom passazhirskom transporte* [Organization of traffic and transport in urban passenger transport]. Moscow, Transport Publ., 1990, 208 p.

6. Veytsman V. M. *Razrabotka ratsional'nykh skhem gorodskikh avtobusnykh marshrutov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of rational schemes of urban bus routes. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1987, 20 p.

7. Volodchenko S. V. *Modelirovanie raspredeleniya passazhirskikh potokov v krupnykh gorodakh*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Modeling the distribution of passenger flows in large cities. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, SPBGASU Publ., 2005, 17 p.

8. Geronimus B. L., Egorova A. I., Parshikov V. A. *Matematicheskaya metodika opredeleniya skhemy avtobusnykh marshrutov v gorodakh* [Mathematical method of determining the scheme of bus routes in cities]. V kn.: *Sovershenstvovanie planirovaniya i organizatsii avtomobil'nykh perevozok* [In: Improvement of planning and organization of road transport]. Moscow, Transport Publ., 1965, pp. 43–79.

9. Glik F. G. *Interaktivnoe konstruirovaniye marshrutnoy sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta* [Interactive design of the route system of urban passenger transport]. Gradostroitel'stvo. Kiev, Budivel'nik, 1987, iss. 39, pp. 100–106.

10. Gorev A. Eh., Ospanov D. T. *Proektirovanie sistem gorodskogo passazhirskogo transporta* [Design of urban passenger transport systems]. St. Petersburg, KOSTA Publ., 2018, 256 p. Ser.: «Biblioteka transportnogo inzhenera» [Ser.: "Transport engineer library"].

11. Efremov I. S., Kobozev V. M., Yudin V. A. *Teoriya gorodskikh passazhirskikh perevozok* [Theory of urban passenger transport]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980, 535 p.

12. Korobov S. A. *Sovershenstvovanie passazhiro-perevozok na osnove vybora ratsional'noy struktury vnutrigorodskikh peremeshcheniy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of passenger traffic on the basis of the choice of a rational structure of the routes in the city. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Tyumen, 2009.

13. Ol'khovskiy S. Yu., Yavorskiy V. V. *Modelirovanie funktsionirovaniya i razvitiya marshrutizirovannykh sistem gorodskogo passazhirskogo transporta* [Modeling of

functioning and development of routed systems of urban passenger transport]. Omsk: SibADI Publ., 2001, 138 p.

14. Parshikov V. A. *Priblizhennoe reshenie kombinatornoy zadachi razmeshcheniya kompleksa ustroystv* [Approximate solution of the combinatorial problem of placing a complex of devices]. *V kn.: Materialy k konferentsii po opytu i perspektivam primeneniya matematicheskikh metodov i EVM v planirovanii* [In: Materials for the conference on experience and prospects of application of mathematical methods and computers in planning]. Novosibirsk, 1962, 8 p.

15. Sadykhova O. S. *Issledovanie nekotorykh voprosov koordinatsii metropolitena i ulichnogo passazhirskogo transporta v krupnom gorode. Diss. kand. tekhn. nauk* [Study of some issues of coordination of the metropolitan and street passenger transportation in a large city. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, Leningradskiy Ordena trudovogo Krasnogo знамени inzhenerno-stroitel'nyy institute Publ., 1973, 196 p.

16. Safronov Eh., Safronov K., Kimmel' D. *Nachalo reformirovaniya GPT —sovershenstvovanie marshrutnykh*

setey gorodov [Beginning of the reform of the GPT — improvement of route networks of cities]. *Avtomobil'nyy transport — Road transport*, 2004, no. 5, pp. 57–58.

17. Spirin I. V. *Perevozki passazhirov gorodskim transportom* [Public passenger transport]. Moscow, Akademkniga Publ., 2006, 415 p.

18. Spirin I. V. *Nauchnye osnovy kompleksnoy restrukturalizatsii gorodskogo passazhirskogo transporta* [Scientific bases of complex restructuring of urban passenger transport]. Moscow, Katalog Publ., 2007, 200 p.

19. Khrushchyov M. V. *Metody obshchey i lokal'noy marshrutizatsii avtobusnogo transporta v gorodakh* [Methods of general and local routing of bus transport in cities]. Moscow, GUU Publ., 1999, 168 p.

20. Nielsen G., et al. *PublicTransport. Planning the Networks. HiTransBestPracticeGuide 2*, Stavanger, HiTrans, 2005, 180 p.

21. Mees P. *Transport for suburbia: beyond the automobile age*. London, Earthscan. Center for Urban Transportation Research, University of South Florida, 2009.