УДК 711:656.2

© Н. А. Калюжный, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: nicholaskalyuzhny@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-5-142-148

© N. A. Kalyuzhnyy, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: nicholaskalyuzhny@gmail.com

ОБОСНОВАНИЕ ПРИОРИТЕТНОСТИ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ В СТРУКТУРЕ АГЛОМЕРАЦИИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

SUBSTANTIATION OF THE PRIORITY OF PLACING THE CITY TRANSPORT HUBS IN THE STRUCTURE OF THE AGGLOMERATION BY THE MATHEMATICAL MODELING METHOD

Предложена методика, позволяющая определить приоритетность мест размещения транспортно-пересадочных узлов на базе метрополитена или железнодорожных станций пригородного сообщения. Данная методика основана на сравнительной количественной оценке прогнозируемых пассажиропотоков и выборе мест размещения транспортно-пересадочных узлов с учетом ряда факторов.

Ключевые слова: математическое моделирование, пассажиропоток, транспортно-пересадочный узел.

The paper offers a method for determining the priority of the placing the city transport hubs with due account of location of the subway or railway stations of the suburban communication. The proposed methodology is based on a comparative quantitative assessment of the forecast passenger traffic and selection of the transport hubs' placement, taking into account a number of factors.

Keywords: mathematical modeling, passenger traffic, transport hub.

К настоящему моменту вопрос необходимости научного обоснования размещения транспортно-пересадочных узлов в городах приобрел особую актуальность, что связано, в частности, с внесением понятия «транспортно-пересадочный узел» (ТПУ) в Градостроительный кодекс РФ.

В отечественной и мировой науке вопросы формирования и функционирования ТПУ стали широко исследоваться еще с 60–70-х годов прошлого века. За это время научно-теоретическая база исследований разрослась и представляет собой несколько взаимосвязанных групп. Теоретическая основа исследований включает в себя труды таких ученых, как А. А. Агасьянц, З. В. Азаренкова, А. П. Артынов, Д. Н. Власов, Ф. П. Кочнев, Н. В. Левадная, Л. А. Лосин, А. Ю. Михайлов, М. Л. Петрович, М. А. Пиир, Д. С. Самойлов, В. П. Федоров, М. С. Фишельсон.

В Санкт-Петербурге к настоящему моменту принят ряд документов, определяющих направ-

ления развития ТПУ. Так, согласно Стратегии развития транспортной системы, организация удобных пересадочных комплексов является одним из основных приоритетов транспортной политики в целях обеспечения устойчивого развития территорий. При этом возникает ряд вопросов, которые необходимо проработать для детализации подходов к размещению ТПУ:

- приоритетность типов пересадки между видами транспорта;
- методы выбора мест размещения ТПУ на территории агломерации;
- оценка социально-экономической эффективности проектируемых ТПУ.

В настоящей работе авторы предлагают методику, позволяющую определить приоритетность мест размещения транспортно-пересадочных узлов на базе метрополитена или железнодорожных станций пригородного сообщения (многие работы [2–6] посвящены обоснованию этих видов транспорта как ТПУ-образующих). Данная

методика основана на сравнительной количественной оценке прогнозных пассажиропотоков.

Описываемая методика опирается на работы зав. лабораторией Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН канд. физ.-мат. наук В. П. Федорова, который разработал ряд математических моделей для исследования функционально-пространственного развития крупных городов [1, 7, 8]. В используемом нами информационно-программном комплексе применяется *двухэтапная схема* формирования пассажирских и транспортных потоков. На первом этапе рассчитываются *матрицы межрайонных корреспонденций*, на втором этапе — *корреспонденции распределяются* по сети городского пассажирского транспорта. Основной содержательной предпосылкой описываемой модели расчета пассажиропотоков является следующая гипотеза: *выбор участниками движения пути следования определяется, в основном, затратами времени на передвижение* и осуществляется последовательным выбором в каждой промежуточной вершине направления движения, обеспечивающего минимальные затраты времени. Причем этот выбор всякий раз производится без согласования с другими участниками.

В нашем исследовании принято, что определяющим фактором, влияющим на очередность формирования ТПУ, является величина пассажиропотока. Чтобы понять, какие из существующих станций в первую очередь претендуют на роль ТПУ-образующих, были проведены серии расчетов с различными значениями времени посадки (пересадки) на метро или железную дорогу. Это сделано для того, чтобы выявить узлы со стабильным пассажиропотоком, слабо связанным с изменением затрат времени на посадку (пересадку), так как устройство ТПУ предполагает значительный и стабильный спрос (это гипотеза для последующих выборов).

Особое внимание следует уделить тому, что в предлагаемой серии расчетов матрица корреспонденций рассчитывается один раз при условии стандартных задержек на входе на станции метрополитена и железной дороги. Иначе говоря, на первом этапе рассчитывается матрица корреспонденций, на втором этапе *только эта матрица* распределяется с учетом задаваемых задержек в узлах.

Для решения этой задачи на дугах графа транспортной сети создавались искусственные задержки на вход для метрополитена в диапазоне от 3 до 30 мин (от 3 до 15 мин с шагом 2 мин), для железнодорожного транспорта задержки

Таблица 1

Сводная таблица коэффициентов влияния величины задержек на размер входного (б) и выходного (а) пассажиропотока станций метрополитена

а)

Название станции	$K_{\text{пасс}}$	
	При задержках метро	При задержках ж/д
Нарвская	0,71	0,98
Площадь Ленина	0,71	0,90
Площадь Восстания	0,86	0,96
Черная речка	0,82	0,99
Выборгская	0,77	0,99
Садовая	0,85	1,01
Невский проспект	0,84	1,04
Горьковская	0,88	1,00
Петроградская	0,71	1,02
Василеостровская	0,85	0,94
Спортивная	0,86	0,98
Адмиралтейская	0,82	1,01

б)

Название станции	$K_{\text{пасс}}$	
	При задержках метро	При задержках ж/д
Проспект Ветеранов	0,40	0,70
Академическая	0,54	1,13
Гражданский пр.	0,72	0,73
Купчино	0,58	0,84
Пионерская	0,63	0,92
Пр. Просвещения	0,63	1,06
Приморская	0,53	0,98
Ладжская	0,30	1,00
Проспект большевиков	0,43	1,03
Улица Дыбенко	0,54	0,99
Комендантский пр.	0,70	0,95
Международная	0,52	1,17

Таблица 2

Сводная таблица коэффициентов влияния величины задержек на размер входного (б) и выходного (а) пассажиропотока станций пригородной железной дороги

а)

Название станции	$K_{\text{пасс}}$	
	При задержках метро	При задержках ж/д
Витебский вокзал	1,19	0,62
Балтийский вокзал	1,15	0,64
Броневая	1,00	0,35
Старый Петергоф	1,00	0,64

б)

Название станции	$K_{\text{пасс}}$	
	При задержках метро	При задержках ж/д
Лисий Нос	0,99	0,97
Купчино	0,76	1,00
Ораниенбаум I	1,00	0,76
Ладужская	0,70	1,19

Таблица 3

Сводная таблица потенциально значимых узлов

№ п/п	Название станции	$K_{\text{пасс}}$		Виды транспорта, взаимодействующие в узле
		При задержках метро	При задержках ж/д	
1	Нарвская	0,71	0,98	Метрополитен ↔ НГПТ
2	Площадь Ленина	0,71	0,90	Ж/д ↔ метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
3	Площадь Восстания	0,86	0,96	Ж/д ↔ метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
4	Черная речка	0,82	0,99	Метрополитен ↔ НГПТ
5	Выборгская	0,77	0,99	Метрополитен ↔ НГПТ
6	Садовая	0,85	1,01	Метрополитен ↔ НГПТ
7	Невский проспект	0,84	1,04	Метрополитен ↔ НГПТ
8	Горьковская	0,88	1,00	Метрополитен ↔ НГПТ
9	Петроградская	0,71	1,02	Метрополитен ↔ НГПТ
10	Василеостровская	0,85	0,94	Метрополитен ↔ НГПТ
11	Спортивная	0,86	0,98	Метрополитен ↔ НГПТ
12	Адмиралтейская	0,82	1,01	Метрополитен ↔ НГПТ
13	Проспект Ветеранов	0,40	0,70	Метрополитен ↔ НГПТ
14	Академическая	0,54	1,13	
15	Гражданский проспект	0,72	0,73	Метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
16	Пионерская	0,63	0,92	Метрополитен ↔ НГПТ
17	Проспект Просвещения	0,63	1,06	Метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
18	Приморская	0,53	0,98	Метрополитен ↔ НГПТ
19	Проспект Большевиков	0,43	1,03	Метрополитен ↔ НГПТ
20	Улица Дыбенко	0,54	0,99	Метрополитен ↔ НГПТ
21	Комендантский проспект	0,70	0,95	Метрополитен ↔ НГПТ
22	Международная	0,52	1,17	Метрополитен ↔ НГПТ
23	Витебский вокзал	1,19	0,62	Ж/д ↔ метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
24	Балтийский вокзал	1,15	0,64	Ж/д ↔ метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
25	Броневая	1,00	0,35	Ж/д ↔ личный а/м ↔ НГПТ
26	Старый Петергоф	1,00	0,64	Ж/д ↔ личный а/м ↔ НГПТ
27	Лисий Нос	0,99	0,97	Ж/д ↔ личный а/м ↔ НГПТ
28	Купчино	0,76	1,00	Ж/д ↔ метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
29	Ораниенбаум I	1,00	0,76	Ж/д ↔ личный а/м ↔ НГПТ
30	Ладужская	0,70	1,19	Ж/д ↔ метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ

Рис. 1. Зависимость величины задержек на выходной (а, в) и входной (б, г) пассажиропоток узлов при изменении времени ожидания: а, б — на метрополитене; в, г — на станциях железной дороги

Рис. 2. Зависимость величины задержек на входной (а, в) и выходной (б, г) пассажиропоток узлов при изменении времени ожидания: а, б — метрополитена; в, г — на железной дороге

составляли 10, 20, 40 и 110 мин. Это позволило классифицировать станции по востребованности в зависимости от затрат времени на ожидания, чтобы выявить ряд узлов, претендующих на роль ТПУ (табл. 1–3, рис. 1, 2).

Таким образом, одним из критериев выборки является коэффициент влияния величины задержки на размер пассажиропотока:

$$K_{\text{пасс.30}} = \frac{x_{30}}{x_3},$$

где x_3 и x_{30} — значения величины пассажиропотока в эксперименте при крайних значениях задержек.

Физический смысл такого критерия — величина изменения пассажиропотока. Этот критерий введен для решения поставленной задачи: классифицировать станции по степени зависимости от изменения потока. Этот коэффициент также является показателем устойчивости (востребованности при сложившемся расселении) узла, т. е. станций со значительным, максимально стабильным потоком, на базе которых целесообразно формирование транспортно-пересадочных узлов.

Следует отметить, что в качестве пассажиропотока узла рассматривается сумма всех пассажиропотоков на посадках/высадках и пересадках, включая посадку/высадку на наземный общественный транспорт.

Решив аналогичную задачу для станций пригородной железной дороги, мы сможем определить приоритетные места формирования ТПУ ж/д.

Итак, методами математического моделирования было выявлено 30 потенциально значимых узлов (см. табл. 3), в которых пассажиропоток значителен и постоянен («устойчивые» станции). Величина коэффициентов влияния величины задержки времени может быть использована как один из факторов приоритетности формирования ТПУ.

Однако не весь представленный в табл. 3 ряд станций может быть оборудован под ТПУ. Помимо представленных расчетов, существует еще ряд факторов, влияющих на формирование ТПУ.

В табл. 4 представлены определяющие факторы, от которых зависит физическое устройство транспортно-пересадочного узла:

- градостроительный фактор — местоположение в городе, влияние функциональной струк-

туры городской среды, условия зрительного восприятия, морфология окружающей застройки, композиционно-художественные особенности окружающей застройки; такой фактор выбора необходим для того, чтобы проектируемый узел, который, несомненно, является доминантой на транспортной сети города, находился в территориальной «гармонии» с окружающей средой;

- территориальный фактор — это возможность физического размещения узла на заданной территории с наименьшими затратами на его устройство;

- пересадочность — необходимость пересадки для достижения конечной цели поездки.

Автор выражает искреннюю благодарность генеральному директору ЗАО «Петербургский НИПИГрад» канд. техн. наук Лосину Л. А. и ст. науч. сотр. СПб ЭМИ РАН Булычевой Н. В. за помощь в проведении исследований и подготовке текста данной публикации.

Выводы

1. Зависимость величины выходного пассажиропотока узлов метрополитена при изменении времени ожидания на входе метрополитена носит линейный характер, не позволяющий классифицировать станции по степени влияния их положения в структуре города на необходимость размещения ТПУ (см. рис. 1, а).

2. Выборка станций узлов метрополитена по входному пассажиропотоку также показывает линейную зависимость, при этом можно выделить станции с «пиковыми» значениями пассажиропотоков (т. е. при определенных временных задержках происходит перераспределение потока на другие линии и виды транспорта), позволяющими сделать выводы о целесообразности размещения ТПУ, например станции метро «Комендантский проспект», «Гражданский проспект» и др. (см. рис. 1, б).

3. Зависимость величины выходного пассажиропотока узлов метрополитена от времени задержки на железной дороге также является линейной, однако следует заметить, что пассажиропоток при увеличении задержек непрерывно увеличивается или остается постоянным. Это происходит вследствие того, что метрополитен берет на себя значительную часть пассажиропотока железной дороги (станции метро «Балтийская», «Старая деревня»).

Таблица 4

Наличие факторов, определяющих устройство ТПУ по устойчивым станциям

№ п/п	Название станции	Градостроительный фактор	Территориальный фактор	Пересадочность
1	Нарвская	+	+	–
2	Площадь Ленина	+	+	+
3	Площадь Восстания	+	+	+
4	Черная речка	+	–	+
5	Выборгская	–	–	–
6	Садовая	+	+	+
7	Невский проспект	–	–	+
8	Горьковская	–	+	+
9	Петроградская	–	–	+
10	Василеостровская	+	+	+
11	Спортивная	+	–	+
12	Адмиралтейская	–	–	+
13	Проспект Ветеранов	+	+	+
14	Академическая	+	+	+
15	Гражданский проспект	+	+	+
16	Пионерская	+	+	+
17	Проспект Просвещения	+	+	+
18	Приморская	+	+	+
19	Проспект Большевиков	+	+	+
20	Улица Дыбенко	+	+	+
21	Комендантский проспект	+	+	+
22	Международная	+	+	+
23	Витебский вокзал	+	+	+
24	Балтийский вокзал	+	+	+
25	Броневая	+	+	+
26	Старый Петергоф	+	+	+
27	Лисий Нос	+	+	+
28	Купчино	+	+	+
29	Ораниенбаум I	+	+	+
30	Ладжская	+	+	+

4. При анализе зависимости величины входного пассажиропотока узлов метрополитена от времени задержки на железной дороге выявлено, что уменьшающийся пассажиропоток характерен для станций, тесно связанных с пригородным железнодорожным сообщением (вокзалы). В целом входной пассажиропоток в метро увеличивается с ростом временных задержек на вход станций железной дороги.

5. Коэффициент влияния величины задержки на размер пассажиропотока узла $K_{\text{пасс}}$ является важным численным критерием при выборе места размещения ТПУ. Согласно нашей гипотезе, для выявления мест размещения ТПУ на-

хождение данного показателя в диапазоне $0,7 < K_{\text{пасс}} < 1,2$ при задержках метрополитена и пригородной железной дороги показывает места мало изменяющегося пассажиропотока (пассажирооборота), что является одной из важных характеристик ТПУ.

6. Введено понятие «устойчивость узла» — это востребованность станции при сложившемся расселении при введении временных задержек на вход, т. е. узлы со значительным, практически постоянным потоком, на базе которых целесообразно формирование транспортно-пересадочных узлов. Основным показателем устойчивости станции принят коэффициент

влияния величины задержки на размер пассажиропотока $K_{\text{пасс}}$.

7. Помимо коэффициента влияния величины задержки на размер пассажиропотока узла $K_{\text{пасс}}$, при физическом устройстве ТПУ необходимо учитывать ряд факторов: градостроительный фактор, территориальный фактор, пересадочность (см. табл. 4).

Библиографический список

1. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии: сб. трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. Вып. 9: Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. СПб.: Нестор-История, 2015. 84 с.

2. Азаренкова З. В. Транспортно-пересадочные узлы в планировке городов. М.: Типография «Новости», 2011. 93 с.

3. Власов Д. Н. Приоритетные направления развития системы транспортно-пересадочных узлов агломерации // Academia. Архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 86–89.

4. Калужный Н. А., Шестеров Е. А. Об использовании рельсового транспорта во внутригородских пассажирских перевозках в транспортных системах крупнейших городов // Транспортное планирование и моделирование: сб. тр. науч.-практ. конф. СПб., 2016.

5. Калужный Н. А. Об использовании скоростного рельсового транспорта в транспортных системах крупнейших агломераций мира // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 5 (58). С. 150–162.

6. Пиир М. А. Пересадочность в системе пассажирского транспорта и принципы решения пересадочных узлов // Комплексное развитие городского пассажирского транспорта. Л., 1970. С. 1.

7. Федоров В. П. Математическая модель формирования пассажиропотоков // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1974. № 4. С. 17–26.

8. Федоров В. П., Пахомова О. М., Лосин Л. А., Булычева Н. В. Анализ проблем транспортной системы центра крупного города: опыт применения методов математического моделирования // Управление развитием территории. 2009. № 4. С. 18–25.

[Economic-mathematical investigations: mathematical models and information technologies]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo ehkonomiko-matematicheskogo instituta RAN. Vyp. no. 9: Matematicheskie modeli v issledovanii protsessov razvitiya gorodskoy sredy* [Proc. of the St. Petersburg economic-mathematical institute of RAS. Iss. no. 9: "Mathematical models in a research of developments of the urban environment"]. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2015, 84 p.

2. Azarenkova Z. V. *Transportno-peresadochnye uzly v planirovke gorodov* [Transport hubs in the planning of cities]. Moscow, Novosti Publ., 2011, 93 p.

3. Vlasov D. N. *Prioritetnye napravleniya razvitiya sistemy transportno-peresadochnykh uzlov aglomeratsii* [Priority directions of transport hubs system development in agglomerations]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and construction*, 2013, no. 3, pp. 86–89.

4. Kalyuzhnyy N. A., Shestеров E. A. *Ob ispol'zovanii rel'sovogo transporta vo vnutrigorodskikh passazhirskikh perevozkakh v transportnykh sistemakh krupneyshikh gorodov* [About using the rail transport in the intra-city passenger traffic in the transport systems of the largest cities]. *Trudy nauch.-prakt. konf. «Transportnoe planirovanie i modelirovanie»* [Proc. of the sci.-pract. conf. "Transport planning and modeling"]. St. Petersburg, 2016.

5. Kalyuzhnyy N. A. *Ob ispol'zovanii skorostnogo rel'sovogo transporta v transportnykh sistemakh krupneyshikh aglomeratsiy mira* [About the use of high-speed rail transport in transport systems of the world largest agglomerations]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, [2016, no. 5 (58), pp. 150–162.

6. Piir M. A. *Peresadochnost' v sisteme passazhirskogo transporta i printsipy resheniya peresadochnykh uzlov* [Transfer possibilities in the system of passenger transport and the principles of the solution of transfer hubs]. *Kompleksnoe razvitie gorodskogo passazhirskogo transporta – Complex development of city passenger transport*, 1970, p. 1.

7. Fedorov V. P. *Matematicheskaya model' formirovaniya passazhiropotokov* [Mathematical model of passenger traffic formation]. *Izv. AN SSSR – Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, 1974, no. 4, pp. 17–26.

8. Fedorov V. P., Pakhomova O. M., Losin L. A., Bulycheva N. V. *Analiz problem transportnoy sistemy tsentra krupnogo goroda: opyt primeneniya metodov matematicheskogo modelirovaniya* [Analysis of problems of the transport system located in the center of the large city: experience of applying the methods of mathematical modeling]. *Upravlenie razvitiem territorii – Territory development management*, 2009, no. 4, pp. 18–25.

References

1. *Ehkonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii*