УДК 711:656.2

© Н. А. Калюзный, ассистент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: nicholaskalyuzhny@gmail.com
© А. И. Лисененков, научн. сотрудник
© Л. А. Лосин, канд. техн. наук, зав. лабораторией
(Институт проблем региональной экономики РАН)
E-mail: a.lisenenkov@yandex.ru, nipigrad@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-174-181

© N. A. Kalyuzhnyy, assistant lecturer
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: nicholaskalyuzhny@gmail.com
© A. I. Lisenenkov, research worker
© L. A. Losin, PhD in Sci. Tech., laboratory head
(Institute for Regional Economics Studies RAS)
E-mail: a.lisenenkov@yandex.ru, nipigrad@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС CITRAF И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ

SOFTWARE COMPLEX "CITRAF" AND ITS APPLICATION FOR SOLVING THE TASK OF DETERMINING THE LOCATION OF TRANSPORT-TRANSFER HUBS

Описывается использование информационно-программного комплекса Citraf для решения задач транспортно-градостроительного проектирования, расчетов потоков пассажиров и транспорта, а также потоков грузового транспорта. Рассмотрено применение программного комплекса как инструмента для реализации методики выбора мест транспортно-пересадочных узлов в структуре агломерации. Предложены теоретические закономерности изменения скорости пассажиропотока от его величины и провозной способности рассматриваемых видов транспорта для учета затрат времени пассажиров на передвижениях, а также дано сравнение таких зависимостей с эмпирическими.

Ключевые слова: информационно-программный комплекс, затраты времени пассажиров на передвижения, транспортно-пересадочный узел.

The paper presents a description of using the software complex «CITRAF» for solving the task of the transport and urban management, passenger and traffic flow calculation, and freight traffic flows. The application of the software package as a tool for the implementation of the method of determining the transport hubs location in the structure of the agglomeration is considered. The authors propose using some theoretical regularities of change in the speed of passenger-traffic flow depending on its size and carrying capacity of the considered modes of transport for taking into account the time spent by passengers for transportation, as well as for making a comparison of such dependencies with the empirical ones.

Keywords: software application complex, time spent by passengers for transportation, transport hub.

Востребованность моделей, адекватно описывающих функционирование транспортных систем (ТС) городов, а также позволяющих решать задачи долгосрочного планирования в транспортно-градостроительной деятельности, является на сегодняшний день актуальной как для специалистов, так и для органов государственной и муниципальной власти, а также

для инвесторов. В частности, в работах, посвященных формированию методики определения мест транспортно-пересадочных узлов (ТПУ) в структуре агломерации [2, 3], говорится о применении программного комплекса (ПК) Citraf [6] для решения подобных задач. Рассматриваемый программный комплекс позволяет решать задачи расчета потоков пассажиров и автомобильно-

го (в том числе грузового) транспорта по классической четырехступенчатой модели. Расчет потоков осуществляется в следующей последовательности (рис. 1).

Рассмотрим подробно каждый из этих этапов расчета.

Построение графа ТС

Современные транспортные системы крупных городов представлены, как правило, несколькими видами транспорта. Для учета распределения пассажиров по видам транспорта в рассматриваемом комплексе линии (маршруты) различных видов общественного транспорта, а также пешеходные пути представляются отдельными подграфами, где вершины представляют, как правило, остановочные пункты, а дуги (ребра графа) — перегоны (участки маршрутов).

Объединение подграфов в единую модель ТС осуществляется с помощью введения подграфа пересадочных связей (дуг), множество вершин которого соответствует вершинам подграфов видов общественного транспорта, в которых возможны пересадки между ними. А множество дуг этого подграфа соответствует возможным вариантам пересадок и переходов между указанными вершинами. Наличие же подграфа пешеходных передвижений обеспечивает возмож-

ность моделирования переходов между любыми вершинами наземной сети. Таким образом, сеть городского общественного транспорта описывается графом, представляющим собой объединение подграфов всех видов общественного транспорта и подграфа пересадок. Естественно, предполагается, что такой граф связан.

Граф улично-дорожной сети для моделирования потоков автомобильного транспорта представляет собой множество вершин, которые соответствуют, в частности, перекресткам, при этом множество дуг соответствует участкам улиц между перекрестками. Таким образом, объединение графа общественного пассажирского транспорта и графа улично-дорожной сети описывает всю транспортную систему города. А их пересечение описывает те участки улично-дорожной сети, которые использует безрельсовый наземный общественный транспорт.

Моделирование транспортных потоков происходит с учетом ряда факторов, задаваемых на подграфах соответствующих ТС: пропускной способности улиц и дорог, максимально разрешенных скоростей передвижения на участках, полосности и др.

Учет затрат времени на передвижения

Величины затрат времени на передвижения по дугам графа в зависимости от X — потока пассажиров общественного транспорта и Y — потока экипажей автомобильного транспорта определяются как

$$t_{ij} = t_{ij}(X, Y) = f_{ij}(x_{ij}) + F_{ij}(R_{ij}), \quad (1)$$

где $f_{ij}(x_{ij})$ — дополнительные затраты времени пассажира (время ожидания + простои транспорта на остановках и т. д.); $F_{ij}(R_{ij})$ — зависимость времени проезда экипажа по дуге (i, j) от суммарного потока транспортных средств R_{ij} на ней, как общественного (приведенного к экипажам), так и индивидуального.

Рассмотрение функции $F_{ij}(R_{ij})$ для индивидуального транспорта наиболее полно отражено в работах М. Л. Петровича [5], алгоритм которого реализован в описываемом программном комплексе. Дополнительные же затраты времени пассажиров $f_{ij}(x_{ij})$ зависят от величины пассажирского потока x_{ij} по дуге (i, j) . На практике такие зависимости являются эмпирическими и определяются путем хронометражных обследований.

Рис. 1. Порядок расчета потоков пассажиров и транспорта в ПК Citraf

В программном комплексе для определения $F_{ij}(R_{ij})$ для каждого вида общественного транспорта с учетом режимов движения задаются соответствующие графики (рис. 2).

Такие зависимости были получены в результате калибровки модели на основе многолетних наблюдений за функционированием ТС Санкт-Петербурга.

Графики, представленные на рис. 3, являются результатом теоретического описания изменения скорости пассажирского транспорта в зависимости от величины пассажиропотока. Основной теоретической предпосылкой указанных расчетных зависимостей является предположение о том, что скорость пассажиропотока имеет прямую зависимость от скорости пассажирского транспорта, количества пассажиров, нуждающихся в передвижениях, и провозной способ-

ности рассматриваемого вида транспорта, таким образом

$$\begin{cases} V_n(N) = V_{кр} = V_0; & \frac{N}{P} \leq 1; \\ V_n(N) = V_{n-1} \left(1 - \frac{D}{N}\right); & \frac{N}{P} > 1, \end{cases} \quad (2)$$

где $V_n(N)$ — скорость рассматриваемой группы пассажиров; $n = 1, 2 \dots K$, где $N = lK$, l — шаг ряда разбиения потока для определения коэффициента изменения скорости в зависимости от величины потока; $V_{кр}$ — крейсерская скорость рассматриваемого вида транспорта в час пик; N — количество пассажиров в час пик, чел.; P — провозная способность рассматриваемого вида транспорта, чел./ч; D — провозная способность

Рис. 2. Некоторые графики изменения скорости в зависимости от величины пассажиропотока, используемые в Citraf

Рис. 3. Некоторые теоретические графики изменения скорости в зависимости от величины пассажиропотока

одной единицы рассматриваемого вида транспорта.

Для практических расчетов и обоснования принятых решений более удобна и понятна зависимость изменения средневзвешенной скорости пассажиропотока:

$$V^{cp}(N) = \frac{PV_{кр} + (N - P)V_n(N)}{N}. \quad (3)$$

На самом деле представленные зависимости (2) и (3) могут являться более сложными, так как существует ряд факторов, например неравномерность распределения пассажиров по входам в вагоны (для метрополитена и пригородной железной дороги), задержки при посадке и высадке пассажиров и др., которые могут незначительно влиять на конечный вид графиков (см. рис. 3). Для учета таких критериев необходимо проводить дополнительные специальные обследования на конкретных ТС.

Полученные таким образом теоретические кривые достаточно точно описывают зависимости, полученные хронометражными обследованиями. В этом можно убедиться, если обратить внимание на сравнение аппроксимационных функций эмпирических кривых с теоретическими графиками, которые имеют вид полиномов третьей степени (рис. 4).

Различия между теоретическими и эмпирическими кривыми обусловлены взаимовлиянием различных видов транспорта на ТС, поэтому эмпирические зависимости носят уникальный характер для рассматриваемой ТС, а теоретические зависимости могут применяться для расчетов ТС, где невозможно определение изменения скорости в зависимости от величины пассажиропотока натурными обследованиями.

Выбор параметров транспортных районов

Основную сложность при расчете потоков составляет тот факт, что объекты системы расселения и мест приложения труда распределены по территории города неравномерно, при этом основной объем передвижений совершается между ними. Расчетные транспортные районы — это агрегированные системы таких объектов, которые в модели могут быть представлены условными точками-фокусами потокообразования и потокопоглощения.

Для связи транспортных районов с транспортной системой строится подграф между

фокусами районов и графом пешеходных передвижений с помощью фиктивных дуг. Затраты времени на каждой из этих дуг представляют собой средние затраты времени на передвижения между объектами района и точками выхода на сеть (остановки общественного транспорта или места сопряжения внутриквартальной сети с магистральной УДС).

В результате каждый транспортный район оказывается привязанным к вершинам объединенного графа.

Расчет целевых корреспонденций

Первым этапом задачи формирования потоков пассажиров и транспорта является расчет

Рис. 4. Сравнение аппроксимационных функций эмпирических кривых с теоретическими графиками изменения скорости в зависимости от величины пассажиропотока

матриц пассажирских корреспонденций, осуществляемых на общественном и легковом индивидуальном транспорте соответственно.

Используемый для этого метод представляет в описываемом программном комплексе модификацию широко распространенного в практике транспортно-градостроительных расчетов метода Шелейховского — Шацкого. Как было доказано, решение некоторой экстремальной задачи, использующей «принцип максимизации взвешенной энтропии», является соответствующим естественным обобщением алгоритма Шелейховского — Шацкого [4].

Сформированные таким образом матрицы корреспонденций являются основой для дальнейших расчетов как элементы спроса на межрайонные передвижения.

Прогноз потокораспределения

Основной содержательной предпосылкой описываемой модели прогноза потокораспределения является следующая гипотеза. Выбор каждым участником движения пути следования определяется, в основном, затратами времени на передвижение и осуществляется последовательным выбором в каждой промежуточной вершине направления дальнейшего движения, обеспечивающего минимальные затраты времени, причем этот выбор всякий раз производится без согласования с другими участниками движения. Если дуга нагружена потоком, стремящимся в не-

который район k , то она является оптимальным направлением движения для этого потока.

Для поиска таких равновесных потоков в рассматриваемой модели используется итеративный алгоритм, который предполагает решение двух вспомогательных задач для определения условно-равновесного потока $\bar{X}(Y)$ (равновесного по X потока при фиксированном и неизменном потоке Y) и аналогичного условно-равновесного потока $\bar{Y}(X)$. Идея нахождения равновесия заключается в учете взаимного влияния потоков X и Y : того, что они пользуются (частично) одной транспортной системой и при этом «стесняют» друг друга. Алгоритм позволяет расчленив задачу построения совместного равновесного потока $(\bar{X}, \bar{Y})$ на последовательность подзадач, в каждой из которых строится условно-равновесный поток одного типа при фиксированном потоке другого типа, поочередным «уравновешиванием» потоков X и Y приближаясь к ситуации совместного равновесия [1].

Поиск мест устройства и дальнейшего развития ТПУ

Гипотезой при постановке задачи поиска мест устройства и дальнейшего развития ТПУ было предположение о том, что ТПУ является пунктом значительного пассажирооборота, поэтому устройство ТПУ должно осуществляться на линиях городского пассажирского транспорта (ГПТ) с большой провозной способностью. Для решения этой задачи вводились искусственные

Рис. 5. Расчет потоков пассажиров и транспорта в ПК Citraf для решения задачи поиска точек на ТС с маломеняющимся пассажиропотоком

временные задержки на вход для станций метрополитена и станций пригородной железной дороги, так как эти виды ГПТ обладают наибольшей провозной способностью, и формирование ТПУ на основе таких станций является более предпочтительным [3].

Вводимые в $f_{ij}(x_{ij})$ задержки должны «искажать» расчетный пассажиропоток по видам транспорта, тем самым проявляя точки маломеняющегося пассажиропотока в транспортной системе.

Таким образом, механизм расчета задачи потоков пассажиров и транспорта, показанный на рис. 1, принимает вид задачи для поиска мест устройства и формирования перспективных ТПУ (рис. 5).

Выводы

1. Показана возможность применения алгоритма, описанного в [1], для решения транспортно-градостроительных задач, в частности, поиска и формирования мест устройства ТПУ.

2. Обосновано графоаналитическим методом применение формулы (2) для учета скорости пассажиропотока в общем случае для различных видов городского пассажирского транспорта.

3. Показана возможность применения формулы (3) для практических расчетов и обоснования принятых решений.

4. Математически обоснована методика, описанная в [2, 3].

Библиографический список

1. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии // Сб. тр. Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. СПб.: Нестор-История, 2015. 84 с.
2. Булычева Н. В., Калюжный Н. А., Лосин Л. А. Модели размещения транспортно-пересадочных узлов городского пассажирского транспорта // Финансы и бизнес. 2018. № 1. С. 54–63.
3. Калюжный Н. А. Обоснование приоритетности мест размещения транспортно-пересадочных узлов в структуре агломерации методом математического моделирования // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 142–148.

4. Питтель Б. Г. Одна простейшая вероятностная модель коллективного поведения // Проблемы передачи информации. 1967. Т. 3, вып. 3. С. 37–52.

5. Отчет о научно-исследовательской работе «Прогноз интенсивности автотранспортных потоков на входах в город и центр по вариантам развития структуры региональных магистралей, выполненным в концепции Генерального плана Санкт-Петербурга». ЗАО «Петербургский НИПИГрад»; ген. директор В. Ф. Назаров, В. А. Маслак; исполн.: М. Л. Петрович [и др.]. СПб., 2004.

6. Свид. 2018611770 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс для прогнозирования потоков пассажиров и транспорта в городах Citraf / В. П. Федоров; заявитель и правообладатель Федоров В. П. (RU). № 2018611770; заявл. 04.10.2017; опубл. 06.02.2018, Реестр программ для ЭВМ.

7. Схема развития сети метрополитена в привязке к пассажирообразующим узлам Санкт-Петербурга. Т. 1. Уточнение схемы развития сети метрополитена на основе анализа градостроительной ситуации: ан. отчет: 60-64 / ЗАО «Петербургский НИПИГрад», ОАО «Ленметрогипротранс»; ген. директор В. Ф. Назаров, В. А. Маслак; исполн.: М. Л. Петрович [и др.]. СПб., 2011. 94 с.

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

9. 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.

10. Лосин Л. А. Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XXIII Междунар. (XXVI Екатеринбургской, I Минской) науч.-практ. конф. Минск, 2016.

11. Калюжный Н. А., Лосин Л. А. Применение методов математического моделирования для определения мест размещения объектов транспортной инфраструктуры городов (на примере транспортно-пересадочных узлов в Санкт-Петербурге) // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XXIV Междунар. (XXVI Екатеринбургской, II Минской) науч.-практ. конф. Минск, 2018.

12. Калюжный Н. А., Лосин Л. А. Обоснование приоритетности мест размещения транспортно-

пересадочных узлов в структуре агломерации методом математического моделирования // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии: материалы Всерос. конф. СПб., 2017.

13. Калюжный Н. А., Лосин Л. А. Исследование затрат времени на пересадках в целях обоснования приоритетности мест размещения транспортно-пересадочных узлов // 71-я Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2018.

14. Шелейховский Г. В. Транспортные основания композиции городского плана. Л.: Б. и., 1936. 150 с.

15. Шацкий Ю. А. Методы расчета расселения в генеральном плане города // Вопросы городского транспорта. Вып. 3. Киев: Будівельник, 1970. С. 71–84 (В помощь проектировщику-градостроителю).

References

1. *Ehkonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii* [Economic and mathematical research: mathematical models and information technologies]. Sb. tr. Sankt-Peterburgskogo ehkonomiko-matematicheskogo instituta RAN [Coll. of works St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics, RAS]. No. 9. Matematicheskie modeli v issledovanii protsessov razvitiya gorodskoy sredi [Mathematical models in the study of urban environment development]. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2015, 84 p.

2. Bulycheva N. V., Kalyuzhnyy N. A., Losin L. A. *Modeli razmeshcheniya transportno-peresadochnykh uzlov gorodskogo passazhirskogo transporta* [Models of positioning the transport-transfer hubs of urban transport]. *Finansy i biznes – Finance and Business*, 2018, no. 1, pp. 54–63.

3. Kalyuzhnyy N. A. *Obosnovanie prioritnosti mest razmeshcheniya transportno-peresadochnykh uzlov v strukture aglomeratsii metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Substantiation of the priority of transport hubs location in the structure of agglomeration by the method of mathematical modeling]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 142–148.

4. Pittel' B. G. *Oдна простейшая вероятностная модель коллективного поведения* [One of the simplest probability models of collective behavior]. *Problemy peredachi informatsii – Problems of information transfer*, 1967, no. 3 (3), pp. 37–52.

5. Nazarov V. F., et al. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Prognoz intensivnosti avtotransportnykh potokov na vkhodakh v gorod i tsentr po variantam razvitiya struktury regional'nykh magistralei, vypolnennym v kontseptsii General'nogo plana Sankt-Peterburga»* [Report

on the research work “Forecast of the intensity of traffic flows at the entrances to the city and the center for options for the development of the structure of regional highways, made in the concept of the master plan of St. Petersburg.”]. St. Petersburg, 2004.

6. Fedorov V. P. *Svidetel'stvo 2018611770 Rossiyskaya Federatsiya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EhVM. Programmnyy kompleks dlya prognozirovaniya potokov passazhirov i transporta v gorodakh CITRAF* [Certificate no. 2018611770 RF. Certificate of the state registration of computer programs. Software complex for forecasting the passenger flows and transport in cities CITRAF]. UD. 2018611770 Russian Federation, 2018.

7. Nazarov V. A., et al. *Skhema razvitiya seti metropolitena v privyazke k passazhiroobrazuyushchim uzlam Sankt-Peterburga* [The scheme of development of the subway network in relation to passenger-forming nodes of St. Petersburg]. T 1. *Utochnenie skhemy razvitiya seti metropolitena na osnove analiza gradostroitel'noy situatsii* [Vol. 1. Clarification of the scheme of development of the metro network based on the analysis of the urban situation]. St. Petersburg, 2011, 94 p.

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

9. 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 in transport system of a major city: the experience of application of methods of mathematical modeling]. *Upravlenie razvitiem territorii – Management of territory development*, 2009, no. 4, pp. 18–25.

10. Losin L. A. *Peterburgskiy opyt postroeniya informatsionno-programmnogo kompleksa dlya resheniya transportno-gradostroitel'nykh zadach* [St. Petersburg experience of the development of the information and software complex for the solution of transport and urban planning challenges]. *Trudy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Sotsial'no-ehkonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya»* [Proc. of the XXIII Intern. conf. “Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities and their zones of influence”]. Minsk, 2016.

11. Kalyuzhnyy N. A., Losin L. A. *Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya opredeleniya mest razmeshcheniya ob'ektov transportnoy infrastruktury gorodov (na primere transportno-peresadochnykh uzlov v Sankt-Peterburge)* [Application of mathematical modeling methods for determining the location of transport

infrastructure of cities (in the example of transport hubs in St. Petersburg)]. *Trudy XXIV Mezhdunar. nauch.-prakt.konf. «Sotsial'no-ehkonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya»* [Proc. of the XXIII Intern. conf. "Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities and their zones of influence"]. Minsk, 2018.

12. Kalyuzhnyy N. A., Losin L. A. *Obosnovanie prioritnosti mest razmeshcheniya transportno-peresadochnykh uzlov v strukture aglomeratsii metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Substantiation of prioritization of transport hubs location in the structure of the agglomeration by the method of mathematical modeling]. *Trudy Vseros. konf. «Ehkonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii»* [Proc. of the All-Russia conf "Economic-mathematical studies: mathematical models and information technologies"]. St. Petersburg, 2017.

13. Kalyuzhnyy N. A., Losin L. A. *Issledovanie zatrat vremeni na peresadkakh v tselyakh obosnovaniya prioritnosti mest razmeshcheniya transportno-peresadochnykh uzlov* [The study of the time spent on transfer in transport for justifying the priority of transport hubs locations]. *Trudy 71-oy Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proc. of the 71-st All-Russia sci-pract. conf. of students, postgraduates and young scientists]. St. Petersburg, 2018.

14. Sheleykhovskiy G. V. *Transportnye osnovaniya kompozitsii gorodskogo plana* [Transport base of the urban plan composition]. Leningrad, B. I. Publ., 1936, 150 p.

15. Shatskiy Yu. A. *Metody rascheta rasseleniya v general'nom plane goroda* [Methods of resettlement in the General plan of the city] *Voprosy gorodskogo transporta – Issues of urban transport*, vol. 3. Kiev, Budivel'nik Publ., 1970, pp. 71–84.