

**Применение методов математического моделирования
для определения мест размещения объектов транспортной
инфраструктуры городов (на примере
транспортно-пересадочных узлов в Санкт-Петербурге)**

Л.А. Лосин, Н.А. Калюжный

В статье представлено описание применения методов математического моделирования для решения задач функционально-пространственного развития городов на примере разработанной авторами методики выбора мест размещения транспортно-пересадочных узлов в плане города.

The article describes the application of mathematical modeling methods to solve the problems of cities functional and spatial development using the method developed by the authors of choosing the transport hubs location in the city plan.

При разработке транспортно-градостроительной документации различных уровней, так же как и при исследовании процессов функционально-пространственного развития городов и агломераций, применяются математические модели. При этом в настоящее время на фоне развития программных средств транспортно-градостроительного моделирования наметился определенный понятийно-идеологический кризис. Мощные программные комплексы с эффективным графическим интерфейсом, доступные на открытом рынке, расширили круг пользователей и породили иллюзию простоты и всеохватности моделей. И зачастую на второй план отходят вопросы, связанные с целями и задачами моделирования, интерпретацией его результатов. Например, наработанный математический аппарат используется далеко не в полной мере для решения всего спектра задач, возникающих в транспортно-градостроительном проектировании. Одной из таких задач является задача размещения транспортно-пересадочных узлов на базе станций метрополитена и пригородной железной дороги. В настоящей статье представлена методика определения приоритетных мест размещения транспортно-пересадочных узлов на базе станций метрополитена и пригородной железной дороги.

Описываемая методика опирается на работы канд. ф.-м. наук Федорова В.П., который разработал ряд математических моделей для исследования функционально-пространственного развития крупных городов в частности, для прогнозирования пассажиропо-

токов [1]. Эксперимент проводился на базе имеющейся в нашем распоряжении откалиброванной модели системы городского общественного транспорта Санкт-Петербургской агломерации.

В нашем исследовании определяющими факторами, влияющими на рекомендуемую очередность формирования транспортно-пересадочных узлов (ТПУ), являются величина пересадочного пассажиропотока и показатель его устойчивости (стабильности). Для классификации существующих станций были проведены серии расчетов с различными значениями времени посадки (пересадки) на метро или железную дорогу.

Таким образом, в качестве исходной гипотезы предполагалось, что экономическая эффективность ТПУ зависит от величины и стабильности спроса. При такой постановке задачи сравнительный анализ величины пересадочного пассажиропотока в зависимости от затрат времени на посадку (пересадку) является основой для определения эффективности мест размещения ТПУ [2], в качестве которых понимаются комплексы объектов недвижимого имущества, включающего в себя земельный участок либо несколько земельных участков с расположенными на них, над или под ними объектами транспортной инфраструктуры, а также другими объектами, предназначенными для обеспечения безопасного и комфортного обслуживания пассажиров в местах их пересадок с одного вида транспорта на другой без пересечения пассажиропотоков. Особо следует обратить внимание на то, что в предлагаемом эксперименте матрица межрайонных пассажирских корреспонденций рассчитывается один раз при условии стандартных интервалов (затрат времени на вход) на станциях метрополитена и железной дороги, т.е. предполагается, что население не меняет районы тяготения в зависимости от работы транспорта, а только варьирует свой маршрут движения. Иначе говоря, на первом этапе рассчитывается матрица корреспонденций, на втором этапе только эта матрица распределяется с учетом задаваемых задержек в узлах. Алгоритм выбора потенциально значимых узлов изображен на рисунке 1.

В рамках эксперимента на дугах графа транспортной сети создавались искусственные задержки на вход для станций метрополитена в диапазоне от 3 до 30 мин (от 3 до 15 мин с шагом 2 мин), для железнодорожных станций аналогичные задержки составляли 10, 20, 40 и 110 мин. Такой подход позволил классифицировать станции по

востребованности в зависимости от затрат времени на ожидание, чтобы выявить ряд узлов, претендующих на роль ТПУ (таблица 1).

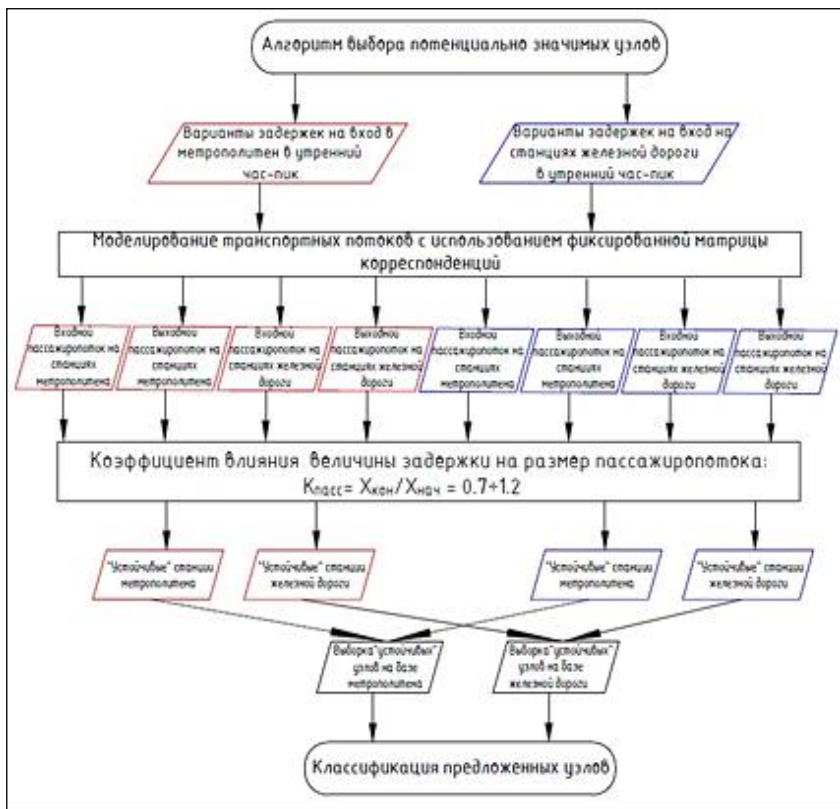


Рисунок 1 – Алгоритм выбора потенциально значимых узлов для размещения ТПУ

Таким образом, одним из критериев выборки является коэффициент влияния величины задержки на размер пассажиропотока («показатель устойчивости»):

$$K_{\text{пасс}} = \frac{x_{\text{кон}}}{x_{\text{нач}}};$$

Где $x_{нач}$ и $x_{кон}$ – значения величины пассажиропотока в эксперименте при крайних значениях времени задержки на входах станций метро и пригородной железной дороги.

Этот коэффициент можно интерпретировать как показатель устойчивости (востребованности при сложившемся расселении и размещении районов тяготения) узла, т.е. станций со значительным, максимально стабильным потоком, на базе которых целесообразно формирование транспортно-пересадочных узлов. Следует отметить, что в качестве пассажиропотока в узле рассматривается сумма всех пассажиропотоков на посадках/высадках и пересадках, включая посадку/высадку на наземный общественный транспорт.

Как указано выше, на дугах графа сети ГОТ создавались искусственные задержки на вход для станций метрополитена в диапазоне от 3 до 30 мин (от 3 до 15 мин с шагом 2 мин). Это позволило классифицировать станции по востребованности в зависимости от затрат времени на ожидание, чтобы выявить ряд станций, претендующих на роль ТПУ-образующих (таблица 1). Решив аналогичную задачу для станций пригородной железной дороги, с учётом задержек на вход, равных 10, 20, 40 и 110 мин., мы смогли определить приоритетные места формирования ТПУ на базе железнодорожных станций (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Сводная таблица потенциально значимых узлов для размещения ТПУ, образуемых на базе станций метрополитена и станций пригородной железной дороги (значения $K_{пасс}$ находятся в диапазоне от 0,7 до 1,2)

№ п/п	Название станции метро или железной дороги	$K_{пасс}$		Виды транспорта, взаимодействующие в узле
		при задержках метро	при задержках ж.д.	
1	2	3	4	5
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

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
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	Метрополитен ↔ НГПТ
15	Гражданский пр.	0,72	0,73	Метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
16	Пионерская	0,63	0,92	Метрополитен ↔ НГПТ ↔ личный а/м
17	Проспект Просвещения	0,63	1,06	Метрополитен ↔ личный а/м ↔ НГПТ
18	Приморская	0,53	0,98	Метрополитен ↔ НГПТ
19	Пр. Большевиков	0,43	1,03	Метрополитен ↔ НГПТ
20	Улица Дыбенко	0,54	0,99	Метрополитен ↔ НГПТ
21	Комендантский пр.	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

Итак, с помощью предложенной методики было выявлено 30 потенциально значимых узлов (см. таблицу 1), в которых пассажиропоток значителен и постоянен («устойчивые» станции). Для выявления мест размещения ТПУ, нахождение «показателя устойчиво-

сти» в диапазоне от 0,7 до 1,2 показывает места слабо изменяющегося пассажиропотока (пассажирооборота), что является одной из основных характеристик мест размещения ТПУ, указывающих на стабильный востребованный спрос [3].

Введенное понятие «устойчивость» узла – это уровень востребованности станции при сложившемся расселении и размещении районов тяготения, слабо зависящий от временных задержек на вход, т.е. «устойчивые» узлы – 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 («показатель устойчивости») $K_{\text{пасс}}$.

Сравнительные расчеты показывают, какие потери может нести тот или иной вид транспорта при неблагоприятных для населения условиях движения, обусловленных временными задержками. Рост задержек на метрополитене или на пригородной железной дороге увеличивает, как показывают расчеты, пассажирооборот на смежных видах транспорта, что приносит дополнительный доход последним за счет перераспределения потока. Проведенное натурное обследование ряда транспортных узлов показывает, какие потери времени наблюдаются у пассажиров на пересадках при нерациональной организации передвижений в узле.

Для проверки применимости разработанной методики и обоснования социально-экономической эффективности организации ТПУ осенью 2017 года было проведено натурное хронометражное обследование затрат времени на пересадку выбранных пересадочных пунктов силами студентов Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета [4]. В составе этой работы были выполнены натурные измерения затрат времени на пересадку в будние дни (кроме понедельника и пятницы) в утренний час-пик (8:00–9:00) для всех возможных путей пересадки между наземными видами ГОТ, станциями метро и пригородной железной дороги. Общие результаты проведенного обследования и сравнение затрат времени при пересадке с нормативными показателями представлены в таблице 2.

Из представленной выборки только две станции «попали» в вышеуказанный норматив [5]. Однако, оптимизировав организацию

передвижения в узле с помощью рационального устройства ТПУ, можно повысить эффективность его использования (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Показатели экономической эффективности при оптимизации затрат времени на пересадку в узлах

№ п/п	Название узла	Нормативные затраты времени на пересадку t_n , с	Средневзвешенные затраты времени на пересадку по обследованию t , с	Стоимость сэкономленного времени одного пассажира, р	Стоимость сэкономленного времени пассажиров в узле, р
1	Площадь Восстания	300	477	13,9	89083
2	Пушкинская	300	426	9,9	30459
3	Балтийская	300	613	24,5	243565
4	Ладужская	300	639	26,6	282997
5	Спортивная	300	989	54,0	78205
6	Гражданский проспект	300	354	4,2	50582
7	Приморская	300	347	3,7	28264
8	Купчино	300	498	15,5	219001
9	Нарвская	300	286	Значение затрат времени при пересадке нормативно	
10	Черная речка	300	424	9,7	52102

Оценка социально-экономической эффективности предлагаемых мероприятий произведена на основании стоимостной оценки затрат времени населения.

Стоимость сэкономленного времени одного пассажира находится как:

$$P = \frac{t_n - t}{60} S,$$

где t_n – нормативные затраты времени на пересадку [7], с;

t – средневзвешенные затраты времени на пересадку по обследованию, с; S – стоимость минуты рабочего времени, руб.

Стоимость сэкономленного времени всех пассажиров в узле находится путем умножения величины пассажиропотока на стоимость сэкономленного времени одного пассажира (см. таблицу 2).

Результаты хронометражного обследования затрат времени при пересадке позволяют говорить о целесообразности преобразования существующих пересадочных пунктов в полноценные транспортно-пересадочные узлы. Оценочная стоимость сэкономленного времени пассажиров при устройстве ТПУ только в указанных узлах составит более 1 млн. рублей в утренний час-пик.

Литература

1. Человеко-машинные системы обеспечения социально-экономических исследований / отв. ред. И.В. Клокачев, Б.Л. Овсевич. – Л.: Наука, 1987. – 252 с.
2. Рейцен, Е.А. О развитии теории городского движения / Е.А. Рейцен // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы V международной научно-практ. конф. – Екатеринбург: Комвакс, 1999. – С. 110–113.
3. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии: сборник трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. – № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. – СПб.: Нестор-История, 2015. – 84 с.
4. Булычева, Н.В., Калюжный Н.А., Лосин Л.А. Методика размещения транспортно-пересадочных узлов на основе формирования социально-экономических показателей функционирования системы городского пассажирского транспорта / Н.В. Булычева, Н.А. Калюжный, Л.А. Лосин // Финансы и бизнес. – 2018. – № 1.
5. Калюжный, Н.А. Обоснование приоритетности мест размещения транспортно-пересадочных узлов в структуре агломерации методом математического моделирования / Н.А. Калюжный // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 5. – С. 142–148.
6. Калюжный, Н.А. Исследование затрат времени на пересадках в целях обоснования приоритетности мест размещения транспортно-пересадочных узлов / Н.А. Калюжный // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 1.
7. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений [Текст]: свод правил: актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89: издание официальное: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1034/пр : [взамен СП 42.13330.2011]; дата введения 2017-07-01 / исполнитель – ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России при участии Москомархитектуры» [и др.], [принят] Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2017. – IV, 85 с.: табл.; 29 см.

Окончательно поступила 18.01.2018 г.