

На правах рукописи



Леонова Светлана Александровна

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ
ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ**

Специальность 05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС)

Научный руководитель: **ЖЕЛЕЗНОВ Дмитрий Валерианович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **ПАЗОЙСКИЙ Юрий Ошарович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Железнодорожные станции и транспортные узлы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта»

ЖУРАВСКАЯ Марина Аркадьевна
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится 15 мая 2020 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.02 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) в ауд. Б2-15 (зал диссертационных советов) по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте УрГУПС по адресу: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан « 2 » апреля 2020 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по почте в адрес диссертационного совета Д 218.013.02.

Тел./факс: +7 (343) 221-24-44. E-mail: NSirina@usurt.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук



Н. Ф. Сирина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последнее время проблемы развития транспортных систем городов приобретают все большее значение. Это связано с ростом городов и агломераций, непрекращающимся процессом урбанизации, повышением уровня автомобилизации населения, загруженностью улично-дорожной сети (УДС), несанкционированными парковками. Затраты времени на передвижение превышают нормативные значения, что снижает производительность труда работающего населения.

Вопросы обеспечения транспортной доступности, повышения качества транспортных услуг для населения, увеличения роли городского общественного транспорта, сокращения среднего времени поездки (что возможно за счет создания системы транспортно-пересадочных узлов) отмечены как одни из наиболее важных в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г.

Необходимость создания транспортно-пересадочных узлов обусловлена возможностью повышения эффективности организации пассажиропотоков в системе городского общественного транспорта и улучшения качества обслуживания населения.

Строительство пересадочных узлов должно быть целесообразным и экономически оправданным. Оптимальный выбор мест расположения транспортно-пересадочных узлов позволит повысить спрос на городской общественный транспорт, сократить время поездки, обеспечить комфортную, быструю, безопасную пересадку и возможность дополнительного обслуживания пассажиров.

Транспортно-пересадочный узел (ТПУ) – это ключевой элемент системы городского общественного транспорта, обеспечивающий перераспределение пассажиропотоков по направлениям движения и между видами транспорта. В связи с постоянно расширяющимися границами городов пассажирам становится сложно воспользоваться беспересадочными маршрутами для поездки. Поездка через ТПУ может оказаться быстрее и комфортнее, чем поездка прямым маршрутом. Поэтому вопросу создания ТПУ следует уделить особое внимание, поскольку система таких узлов является частью всей городской транспортной системы и от того, где будут расположены и как будут функционировать ТПУ, зависит качество предоставляемых транспортных услуг, эффективность организации пассажиропотоков, состояние городской транспортной системы в целом. Этим подтверждается актуальность выбранной темы диссертационного исследования.

Степень разработанности темы диссертации. В рамках диссертационной работы выполнен анализ отечественных и зарубежных источников, посвященных вопросам развития городских транспортных систем и ТПУ.

Городские процессы, способствующие росту и развитию мегаполисов, рассматривались А.В. Коротаевым, Ю.Л. Пивоваровым, Е.Ю. Прокофьевой.

Вопросы формирования и развития городских транспортных систем были изучены В.В. Зотовым, Ю.К. Поносовым, И.Н. Пугачевым, Я.А. Селиверстовым, А.А. Сорокиным, С.В. Федоровым, Я. Цибулка, М.Р. Якимовым и другими.

В отдельную группу научных трудов можно выделить работы А.П. Артынова, Р.Л. Бранзия, А.А. Бычковой, С.П. Вакуленко, В.Г. Галабурды, В.Н. Голоскокова, П.В. Голубева, К.М. Епишкиной, Н.А. Ковалевой, Ф.П. Кочнева, Н.В. Левадной, Ю.О. Пазойского, В.А. Персианова, Г.П. Петракова, С.М. Резера, П.В. Самарцева, В.И. Терзи, В.Г. Шубко, В.Н. Шумилова, в которых отмечена особая роль железнодорожного транспорта в организации городских и пригородных перевозок.

Особенности развития и проектирования современной транспортной системы мегаполисов, ее инфраструктуры изучены Ха Дуи Ань, Ань Дун, Ю.С. Калашниковой, Д.Ю. Ломакиной, М.А. Маташовой, Е.А. Солнцевым, Б.П. Усановым, М.С. Фишельсоном, В.А. Шемякиной, Го Юнцзюнь.

Особое значение имеют научные труды, связанные с формированием и развитием ТПУ как важного ключевого элемента городской транспортной инфраструктуры. Это работы И.В. Белинской, Н.В. Булычевой, Д.Н. Власова, О.С. Глозмана, М.А. Дорофеевой, Н.Ю. Еврееновой, Д.В. Железнова, М.А. Журавской, Н.А. Калюжного, Н.Н. Кучеренко, Е.П. Левковской, Д.В. Ломотько, А.Ю. Михайлова, М.А. Пиира, Е.А. Рейцена, Е.И. Семенова, А.А. Хомицкой, А.А. Шагимуратовой, Д.С. Шишова, В.А. Щуровой, М. Яп.

Вопросы строительства и проектирования транспортных узлов рассматривались З.В. Азаренковой, Е.А. Булгаковой, Г.Е. Голубевым, Н.В. Данилиной, И.М. Смоляром, Г.Ю. Смыковской, О.Ш. Тер-Восканяном.

Особое внимание уделено изучению пассажирских потоков (в том числе и в ТПУ) в работах В.С. Гвоздякова, В.В. Доенина, В.Я. Негрея, Н.В. Правдина, Д. Харни, Д. Хелбинга, В.В. Холщевникова.

Однако во всех этих научных исследованиях не полностью раскрыты вопросы, связанные с выбором количества и мест формирования пересадочных узлов с точки зрения сокращения среднего времени поездки по городу и величины пассажиропотока, что является определяющей характеристикой ТПУ.

Цель исследования: разработка методики определения оптимального количества и мест размещения транспортно-пересадочных узлов.

В диссертации поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных научных трудов в области формирования и функционирования городских транспортных систем с наличием ТПУ.

2. Разработана оптимизационная математическая модель для решения задачи выбора мест расположения ТПУ по критерию среднего времени поездки при ограничениях. Введено понятие «эффективного пересадочного узла». Предложен метод оптимального выбора системы ТПУ на основе эффективных пересадочных узлов.

3. Разработана методика определения количества и мест размещения транспортно-пересадочных узлов на основе предложенной оптимизационной математической модели.

4. Разработана методика определения количества транспортно-пересадочных узлов в зависимости от площади города и зоны влияния каждого ТПУ без определения места размещения узла. Установлены зависимости числа пересадочных узлов от среднего по городу коэффициента пользования транспортом, развития городской транспортной сети и коэффициента пересадочности.

5. Выполнена реализация методики определения количества и мест размещения ТПУ на примере городского округа Самара. Получена зависимость сокращения среднего времени поездки по городу от числа транспортно-пересадочных узлов.

Объект исследования: городская транспортная система с наличием ТПУ.

Предмет исследования: процессы функционирования объектов городской транспортной системы с наличием ТПУ, закономерности распределения пассажиропотоков.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем.

1. Разработана оптимизационная математическая модель для решения задачи выбора мест расположения ТПУ по критерию среднего времени поездки при ограничениях и метод оптимального выбора системы ТПУ на основе эффективных пересадочных узлов.

2. Разработана методика определения оптимального количества и мест размещения ТПУ на основе предложенной оптимизационной математической модели.

3. Получила дальнейшее развитие методика определения количества ТПУ (без определения мест их размещения) в зависимости от площади города и зоны влияния пересадочных узлов за счет ввода дополнительных параметров (средний по городу коэффициент пользования транспортом, плотность городской транспортной сети, численность населения города, коэффициент пересадочности). Установлены зависимости числа транспортно-пересадочных узлов от среднего по городу коэффициента пользования транспортом, плотности городской транспортной сети и коэффициента пересадочности.

4. На основании разработанной методики сформирована система ТПУ городского округа Самара; получена зависимость сокращения среднего времени поездки по городу от числа транспортно-пересадочных узлов.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке методических основ размещения ТПУ в системе городского пассажирского транспорта.

Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности использования полученных научных результатов в программах и проектах развития городских транспортных систем. Результаты диссертационного исследования могут стать основой разработки основных требований к формированию системы транспортно-пересадочных узлов на городской транспортной сети.

Методы исследования, использованные в диссертации: системный анализ, графоаналитический метод, количественные методы моделирования процессов перевозок, метод математической статистики, математическое программирование, метод оптимизации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оптимизационная математическая модель для решения задачи выбора мест расположения ТПУ по критерию среднего времени поездки при ограничениях и метод оптимального выбора системы ТПУ на основе эффективных пересадочных узлов.

2. Методика определения оптимального количества и мест размещения ТПУ на основе предложенной оптимизационной математической модели.

3. Методика определения количества транспортно-пересадочных узлов с учетом площади города и зоны влияния каждого узла; зависимость числа ТПУ от среднего по городу коэффициента пользования транспортом, плотности городской транспортной сети и коэффициента пересадочности.

4. Результаты реализации разработанной методики на примере городского округа Самара; зависимость сокращения среднего времени поездки по городу от числа транспортно-пересадочных узлов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждена строгостью применяемых методов математического моделирования, методов оптимизации; реализацией разработанной методики выбора мест размещения ТПУ на примере городского округа Самара с использованием реальных значений величины пассажиропотоков; обобщением отечественного и мирового опыта развития городских транспортных систем с наличием транспортно-пересадочных узлов.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждены на российских и международных научно-практических конференциях: «Научные исследования и разработки молодых ученых» (г. Но-

восибирск, 2015); «Транспортно-логистическая интеграция Забайкальского края в условиях российско-китайско-монгольского трансграничья» (г. Чита, 2016); «Наука и образование – транспорту» (г. Самара, 2016); «Железнодорожный транспорт: наука, техника, образование» (г. Самара – Рузаевка, 2016); «Наука и образование – транспорту» (г. Самара, 2017); «Наука и образование: достижения и перспективы» (Самара – Саратов, 2018); «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов» (г. Гомель, 2018); «Наука и образование – транспорту» (г. Самара, 2018); «Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике» (г. Ростов-на-Дону, 2019); «Технологии, материалы, транспорт и логистика: перспективы развития-ТМТЛ'19» (г. Луганск, 2019); «Самара цифровая» (г. Самара, 2019).

Личный вклад соискателя состоит в разработке оптимизационной математической модели выбора мест размещения городских ТПУ при ограничениях, метода определения мест расположения ТПУ на основе эффективных пересадочных узлов, методики определения оптимального количества и мест размещения транспортно-пересадочных узлов.

Теоретические и методические положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в работе, получены в результате самостоятельной работы соискателя.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 14 научных работ, из них 4 работы входят в список реферируемых изданий ВАК РФ по специальности (2 из них без соавторства).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы, 7 приложений. Основной текст диссертации написан на 146 страницах, который включает 39 формул, 9 таблиц, 30 рисунков. Библиографический список литературы состоит из 181 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, обозначены цели и задачи, определена теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, выделены основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе «Анализ исследований в области формирования городских транспортных систем с наличием транспортно-пересадочных узлов» выполнен анализ имеющихся научных работ в области формирования и развития городских транспортных систем с наличием ТПУ. Отмечена необходимость создания ТПУ как важного ключевого элемента городской транспортной инфраструктуры.

В диссертационной работе выделены основные принципы создания и функционирования ТПУ в зарубежных странах: формирование ТПУ вокруг станций городских железных дорог и метрополитена, интеграция с системой ТПУ скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта, правильная организация пространства узла для рационального распределения пассажиропотоков, наличие в структуре ТПУ экологически чистых видов транспорта, монорельсовых дорог, строительство транспортных узлов с учетом сохранения архитектурно-планировочной структуры города.

С каждым годом все большее внимание уделяется созданию и развитию ТПУ в мегаполисах России. Известны реализованные и предлагаемые к внедрению проекты таких узлов в Москве, Санкт-Петербурге, Сочи, Самаре, в городах Сибири и Дальнего Востока. Отечественные ТПУ формируются на базе имеющихся железнодорожных вокзальных комплексов, станций городских железных дорог, метрополитена и характеризуются недостаточным уровнем развития.

В Самаре и Самарской области существует множество транспортных проблем, для решения которых предлагается комплекс мероприятий, направленных на улучшение качественных показателей перевозок пассажиров. При этом важно сформировать систему ТПУ с целью сокращения времени поездки в системе городского общественного транспорта, повышения качества транспортного обслуживания населения, совершенствования организации пассажиропотоков.

За рубежом и в России ТПУ проектируются вокруг станций железных дорог и метрополитена с учетом величины пассажиропотока в узле. Однако такие ТПУ охватывают только часть территории города и городской транспортной сети. Требуется дальнейшего исследования вопрос определения оптимального количества и мест размещения ТПУ регионального, межрегионального значения, обеспечивающих связь внешнего, пригородного и городского транспорта, а также ТПУ городского значения.

Во второй главе «Исследование проблем формирования транспортно-пересадочных узлов в системе городского общественного транспорта» выделен ряд известных методик в области формирования, развития и функционирования ТПУ. Особое внимание уделено методике определения количества и мест размещения ТПУ, поскольку состояние системы ТПУ определяет состояние и уровень развития всей городской транспортной инфраструктуры.

Рассмотрена методика М.А. Пиира, определяющая количество ТПУ (без определения мест их размещения) в зависимости от площади города и зоны влияния пересадочных узлов, в которую были введены дополнительные параметры (численность населения, коэффициент пользования транспортом, плотность городской транспортной сети и коэффициент пересадочности). Составлен

алгоритм определения количества региональных, межрегиональных и городских ТПУ в зависимости от зоны влияния (площади тяготения) каждого узла (рисунок 1).

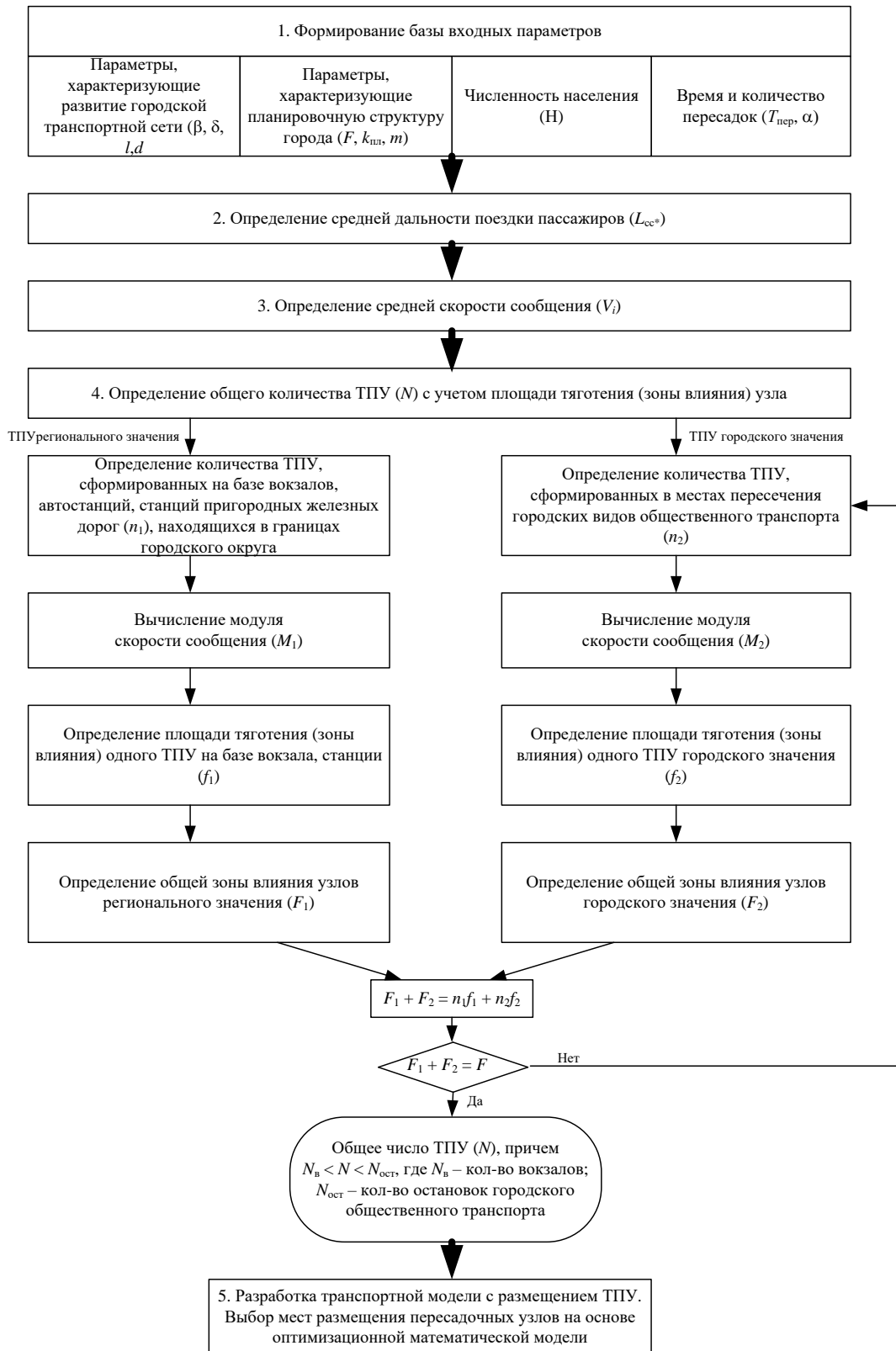


Рисунок 1 – Алгоритм определения количества ТПУ в зависимости от зоны влияния (площади тяготения) каждого узла

Транспортно-пересадочные узлы межрегионального и регионального значения определяются количеством вокзалов и станций одновременно с оценкой величины прогнозируемого пассажиропотока в каждом узле. Основными критериями для принятия решения о создании регионального, межрегионального ТПУ является пересечение различных видов транспорта, обеспечивающих перевозку пассажиров в городском, пригородном, междугородном, международном сообщении, а также наличие достаточно обширной территории, что связано со строительством большого количества зданий и сооружений, обеспечивающих пересадку пассажиров с одного вида транспорта на другой, созданием «перехватывающих» парковок, развитой социальной инфраструктурой. Такие ТПУ располагаются, как правило, на окраине города.

Для городских ТПУ главным критерием является обеспечение минимального времени поездки пассажиров, поскольку они обслуживают абсолютное большинство трудовых передвижений. Такие узлы формируются в местах пересечения различных видов городского общественного транспорта, характеризуются значительным городским пассажиропотоком. Основная цель создания таких узлов – обеспечение быстрой и безопасной пересадки пассажиров между различными видами городского транспорта с целью сокращения времени поездки.

Важно сформировать систему ТПУ таким образом, чтобы охватить всю территорию города, подлежащую транспортному обслуживанию, все виды пассажиропотоков, перемещающихся в городском, пригородном и междугородном сообщении, с учетом развития городской транспортной сети, численности населения, коэффициента пользования транспортом, коэффициента пересадочности. При этом важно обеспечить быструю и безопасную пересадку пассажиров в самом ТПУ. Система ТПУ сокращает время поездки пассажиров в системе городского общественного транспорта и при этом повышается качество транспортного обслуживания.

Установлены зависимости числа транспортно-пересадочных узлов от среднего по городу коэффициента пользования транспортом, плотности городской транспортной сети и коэффициента пересадочности (рисунок 2).

Отмечается тенденция увеличения количества пересадочных узлов с увеличением среднего коэффициента пользования транспортом, коэффициента пересадочности. С увеличением плотности городской транспортной сети отмечается незначительное снижение прогнозного значения необходимого количества пересадочных узлов.

Рассчитано число ТПУ Самары в зависимости от площади города, подлежащей транспортному обслуживанию, и зоны влияния (тяготения) каждого узла.

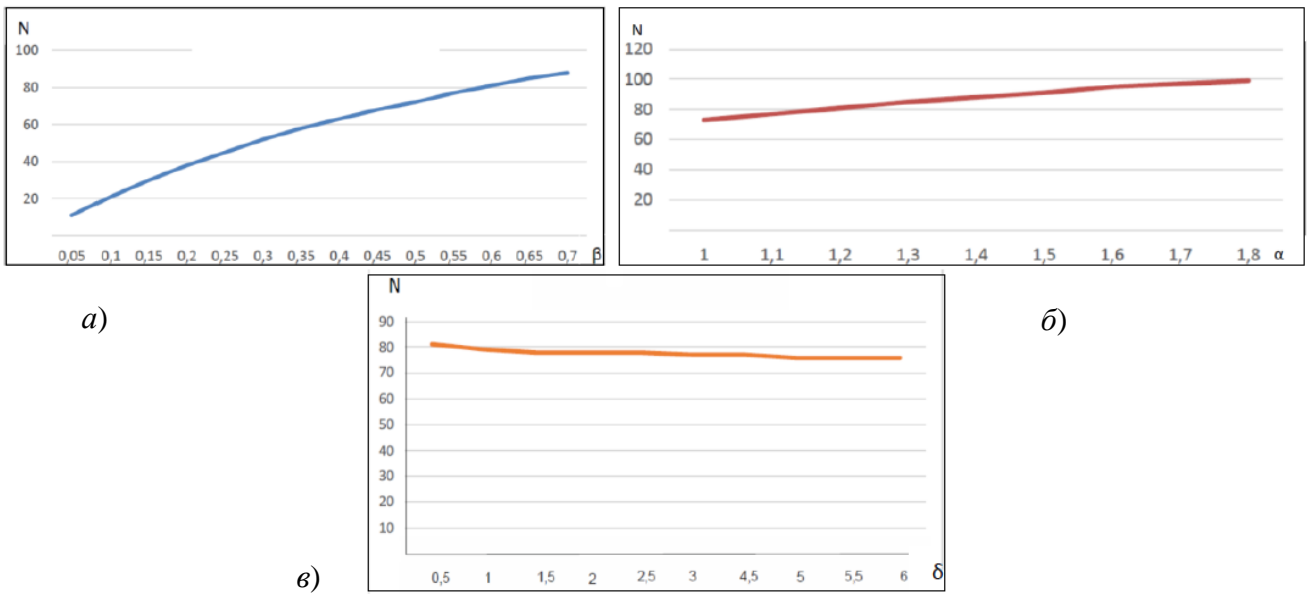


Рисунок 2 – Зависимость количества ТПУ N :

a – от коэффициента пользования транспортом β ; $б$ – коэффициента пересадочности α ; $в$ – развития городской транспортной сети δ , км/км²

Определены места размещения ТПУ регионального, межрегионального значения. Для выбора мест расположения ТПУ городского значения необходим комплексный анализ городской транспортной сети и потребностей пассажиров, определение основных критериев, которые позволят сформировать систему ТПУ любого города с целью совершенствования организации пассажиропотоков.

В третьей главе «Разработка математической модели для решения задачи выбора мест размещения транспортно-пересадочных узлов» рассмотрен системный анализ процессов на городском пассажирском транспорте, обоснован критерий среднего времени поездки пассажиров в системе городского общественного транспорта (ГОТ) для выбора мест размещения ТПУ городского значения. Большую роль при этом играет значение величины пассажиропотока.

Разработана модель оптимального выбора системы городских ТПУ в виде задачи математического программирования. Для данной задачи исходными данными являются упрощенный граф сети городского транспорта (полученный путем объединения части остановок, лежащих на линии одного маршрута, в так называемые концевые блоки) с маршрутами общественного пассажирского транспорта; матрица межостановочных корреспонденций $C^0 = \{c^0(i,j)\}$, которая показывает среднее значение количества пассажиров, перемещающихся от остановки i до остановки j за определенный промежуток времени. Это время включает и нормативное время ожидания общественного транспорта.

Общая постановка задачи оптимального выбора мест расположения пересадочных узлов из условия заданного пассажиропотока и с целью сокращения затрат времени на перевозку всех пассажиров в системе городского пассажирского транспорта:

$$\bar{T} = \frac{1}{Nn^2} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} t_{ij} x_{ij} + \frac{1}{K} \sum_k^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ikj} t_{ikj} x_{ikj} + \frac{1}{KL} \sum_k^K \sum_l^L \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{iklj} t_{iklj} x_{iklj} + \dots \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где \bar{T} – среднестатистическое время одной поездки; c_{ij} , c_{ikj} , c_{iklj} – матрицы корреспонденций; t_{ij} – среднее время поездки из i в j по прямой линии; t_{ikj} – среднее время поездки из i в j через пересадочный узел k ; t_{iklj} – среднее время поездки из i в j через пересадочные узлы k и l ; N – общее количество поездок пассажиров за базовый период; n – общее число остановок транспортной сети; K , L – максимально возможное число пересадочных узлов.

При этом заданы ограничения. Перевозка из i в j с одной пересадкой осуществляется только через один выбранный пересадочный узел:

$$\sum_k^K x_{ikj} = 1, \forall i, j; (i \neq j). \quad (2)$$

Перевозка из i в j с двумя пересадками осуществляется только через одну выбранную пару пересадочных узлов:

$$\sum_{k,l} x_{iklj} = 1, \forall i, j; (i \neq j). \quad (3)$$

Объём k -го пересадочного узла (из всех возможных K узлов) ограничен величиной D_k :

$$\sum_{i=1}^n c_{ik} x_{ik} + \sum_{j=1}^n c_{kj} x_{kj} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ikj} x_{ikj} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{iklj} x_{iklj} \leq D_k, \forall k = (1, K). \quad (4)$$

В формуле (4) учтены пассажиры, уезжающие из k , приезжающие в k и пересаживающиеся в k .

С другой стороны, пересадочный узел должен быть достаточно крупным, чтобы, например, окупить затраты на дополнительное строительство инфраструктуры узла. Поэтому

$$\sum_{i=1}^n c_{ik} x_{ik} + \sum_{j=1}^n c_{kj} x_{kj} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ikj} x_{ikj} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{iklj} x_{iklj} \geq d_k, \forall k = (1, K). \quad (5)$$

Получена задача (1)–(5) линейного булева программирования, которая для масштаба крупного, крупнейшего города и мегаполиса имеет сверхбольшую размерность. В диссертационной работе предлагается упростить решение данной задачи для получения практических вариантов её решения. Для этого задача оптимального выбора мест расположения ТПУ решается в два этапа.

1) Для каждого пересадочного маршрута (i, k, j) найдены такие пересадочные узлы r , которые обеспечивают кратчайший по времени путь из i в j через пересадочный узел r :

$$r = \arg \min_k (t_{ikj}). \quad (6)$$

Следует отметить, что в дальнейшем выражение для одной пересадки будет записываться под номером k , хотя можно считать k вектором пересадок и тогда выражение (6) справедливо и для случая многих пересадок.

Пересадочные узлы r названы в диссертационной работе «эффективными пересадочными узлами». Для решения задачи выбора ТПУ в дальнейшем рассматриваются только эффективные пересадочные узлы, что радикально сужает область допустимых решений и упрощает алгоритмы решения задачи.

2) Найдено множество эффективных пересадочных узлов $R=(1,2,3,\dots,r,\dots,N_r)$, где r – номер эффективного пересадочного узла; N_r – общее количество пересадочных маршрутов. То есть в случае двух и более пересадок в качестве пересадки может выступать и вектор пересадки (k, l, \dots, q, p) , имеющий свой номер. Вводится в рассмотрение булева переменная: $x_r = 1$, если r -й эффективный узел будет ТПУ, $x_r = 0$ – в противном случае.

Тогда множество ТПУ определяется вектором нулей и единиц размерности N_r . $X=(x_1, x_2, \dots, x_{N_r})$, $X \in R$.

При этом при выборе оптимального X^* автоматически определяется и оптимальное количество ТПУ в проекте n :

$$\sum_{r=1}^{N_r} x_r^* = n. \quad (7)$$

Таким образом, если ввести понятие «эффективный пересадочный узел» и вектор значительно меньшей размерности, определяющий решение, можно упростить описание математической модели.

Алгоритм вычисления эффективных пересадочных узлов представлен на рисунке 3.

Прямые и пересадочные оптимальные маршруты определяются по критерию времени поездки из i в j . Пересадочных узлов может быть несколько, поэтому осуществляется поиск такого $k = r$, поездка через который позволит проехать из i в j за минимальное время.

$$t_{i,r,j} = \min_k t_{i,k,j}. \quad (8)$$

Для вычисления эффективных пересадочных узлов разработан программный продукт «Эффективные пересадки» на языке программирования C#, с помощью которого определяется множество эффективных пересадочных узлов с величиной возможного пассажиропотока в узле c_r .

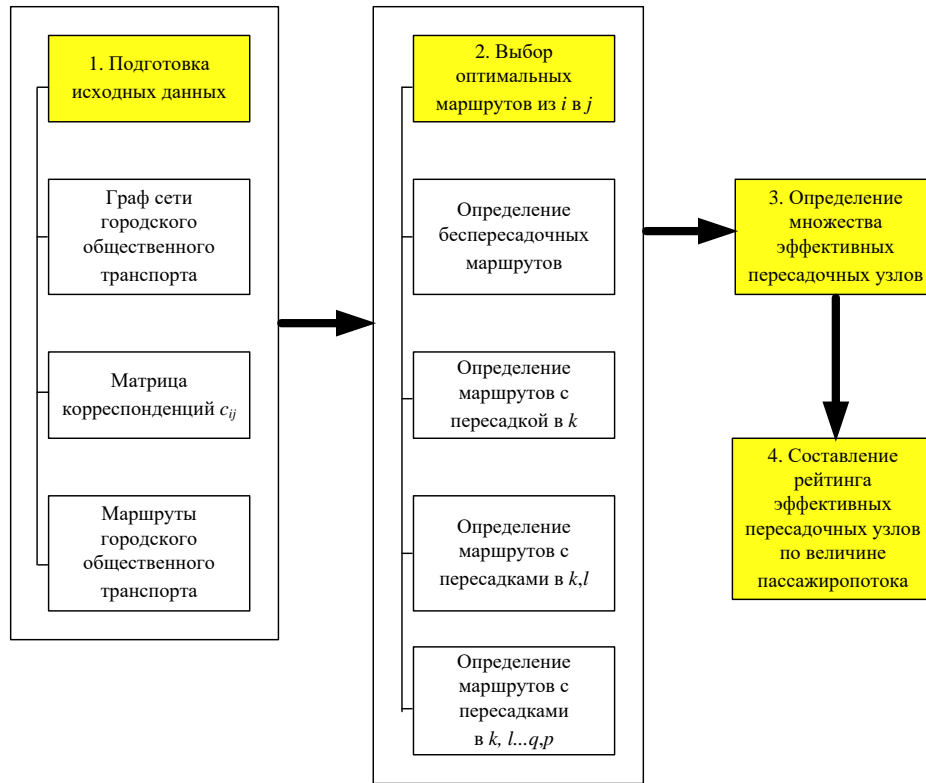


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета эффективных пересадочных узлов

Прогнозируемое число пассажиров, которые будут пользоваться этим r -м пересадочным узлом:

$$c_r = \sum_{i,j} c_{i,r,j} + \sum_i c_{ir} + \sum_j c_{rj}, r = 1, 2, \dots, R, \quad (9)$$

где $\sum_{i,j} c_{i,r,j}$ – количество пассажиров, пересеживающихся в r -м пересадочном узле (ТПУ); $\sum_i c_{ir}$ – количество пассажиров, приезжающих в ТПУ; $\sum_j c_{rj}$ – количество пассажиров, уезжающих из ТПУ.

Далее рассматривается решение задачи оптимального выбора мест расположения ТПУ при экономических ограничениях или ограничении среднего нормативного времени одной поездки.

При решении задачи выбора мест размещения ТПУ при экономических ограничениях максимизируется величина сокращения среднего времени одной пересадочной поездки за счет создания системы ТПУ:

$$\Delta T = \frac{1}{\sum_r c_r} \sum_r c_r \left(\frac{1}{N_r} \sum_{i,j} \Delta t_{ij} \right) x_r \rightarrow \max \quad (10)$$

при выполнении ограничения

$$\sum_r S_r x_r \leq E_0, \quad (11)$$

где Δt_{ij} – сокращение времени поездки через эффективный пересадочный узел r за счет создания системы ТПУ, N_r – величина, показывающая общее число маршрутов с пересадкой через узел r ; S_r – затраты на создание ТПУ; E_0 – заданные средства для создания некоторой системы ТПУ.

Если сокращение времени поездки при формировании системы ТПУ не зависит от продолжительности поездки, но зависит от конкретного пересадочного узла $\Delta t_{ij} = \Delta t_r$, то

$$\Delta T = \frac{1}{\sum_r c_r} \sum_r c_r \Delta t_r x_r \rightarrow \max, \quad (12)$$

$$\sum_r S_r x_r \leq E_0. \quad (13)$$

С использованием алгоритма решения «задачи о ранце» упорядочение выбора мест размещения транспортно-пересадочных узлов определяется отношением

$$\beta_r = \frac{c_r \Delta t_r}{S_r}. \quad (14)$$

Считая, что сокращение времени одной поездки за счет формирования системы ТПУ не зависит ни от продолжительности поездки, ни от конкретного узла, то есть $\Delta t_{ij} = \Delta t$, тогда оптимальный выбор определяется с использованием отношения:

$$\beta_r = \frac{c_r}{S_r}. \quad (15)$$

Выбор оптимального варианта размещения ТПУ осуществляется на основании минимального времени поездки через выбранные ТПУ и максимального количества пассажиров, которые будут пользоваться этими пересадочными узлами. Это позволит максимально сократить среднее время поездки пассажиров через выбранные ТПУ.

Рассматривая решение задачи оптимального выбора мест расположения ТПУ при ограничении среднего нормативного времени одной поездки $T_{\text{норм}}$, важно учесть, что система ТПУ позволит уменьшить время пересадочных поездок, что, в свою очередь, уменьшит среднее время одной (не важно какой) поездки.

$$T' = \frac{1}{\sum_r c_r + \sum_{i,j} c_{ij}} \sum_r c_r \left(\frac{1}{N_r} \sum_{i,j} t_{ij} - \Delta t_r \right) x_r \leq T_{\text{норм}}, \quad (16)$$

где $\sum_{i,j} c_{ij}$ – пассажиры, которые едут прямыми (беспересадочными) маршрутами.

При этом можно потребовать, чтобы это неравенство выполнялось при наименьшем количестве ТПУ, поэтому

$$\sum_r x_r \rightarrow \min. \quad (17)$$

С использованием алгоритма решения «задачи о ранце» список перебираемых вариантов упорядочивается по убыванию величин

$$\beta_r = c_r \left(\frac{1}{N_r} \sum_{i,j} t_{ij} - \Delta t_r \right). \quad (18)$$

Кроме вышеизложенных постановок оптимизационных задач можно рассмотреть выбор мест расположения ТПУ с точки зрения максимального сокращения среднего времени поездки по городу Δt_{cp} :

$$\Delta t_{cp} = \frac{1}{\sum_{ij} c_{ij} + \sum_r c_r} \sum_r c_r \Delta t_r x_r \rightarrow \max. \quad (19)$$

Величина сокращения среднего времени одной поездки является основным, но не единственным критерием выбора системы городских ТПУ. Поэтому дальнейшая многокритериальная оценка подоптимальных вариантов системы ТПУ осуществляется на основе алгоритма получения множества Парето и выбора единственного варианта по критерию интегральной суммы с весами критериев.

В четвертой главе «Разработка методики выбора ТПУ на примере городского округа Самара» на основе предложенных математических моделей сформирована методика определения количества и мест размещения ТПУ, которая включает несколько этапов:

1. Изучение потребностей пассажиров в части транспортного обслуживания, расчет величины пассажиропотока, составление матрицы корреспонденций.

2. Выбор оптимальных маршрутов следования пассажиров в системе городского общественного транспорта. Определение эффективных пересадочных узлов, в которых осуществляются пересадки, составление их рейтинга по величине пассажиропотока.

3. Определение количества и мест размещения ТПУ на основе оптимизационной математической модели при экономических ограничениях и ограничении среднего нормативного времени поездки.

На первом этапе выполнен анализ городской транспортной системы, рассчитана матрица межостановочных корреспонденций $C^0 = \{c^0(i,j)\}$ на упрощенной городской транспортной сети общественного транспорта, которая показывает среднесуточное число пассажиров, перемещающихся от остановки i до остановки j .

На втором этапе выбраны оптимальные маршруты следования пассажиров по критерию минимального времени поездки и определено 272 эффективных пересадочных узла, которые являются потенциальными кандидатами на создание в них ТПУ. Составлен рейтинг эффективных пересадочных узлов по величине пассажиропотока. На основании этого рейтинга выбраны места размещения городских ТПУ, число которых определено во второй главе настоящего исследования (в зависимости от площади города, подлежащей транспортному обслуживанию, и зоны влияния узла).

На третьем этапе осуществлен выбор мест размещения ТПУ на основе оптимизационной математической модели при экономических ограничениях и ограничении среднего нормативного времени поездки. Получен список ТПУ, рекомендованных к строительству при ограниченных денежных средствах с учетом величины сокращения времени поездки и количества пассажиров, пользующихся этими ТПУ. Рассматривая выбор мест размещения ТПУ при ограничении среднего нормативного времени поездки, важно оценить величину сокращения среднего времени поездки пассажиров по городу за счет формирования системы ТПУ. Выбраны такие ТПУ, которые позволяют максимально сократить среднее время одной пересадочной поездки по городу. За счет сокращения времени пересадочных поездок уменьшается и среднестатистическое время одной (не важно, какой) поездки. Установлена зависимость сокращения среднего времени одной поездки $\Delta t_{\text{ср}}$ от числа ТПУ N (рисунок 4).

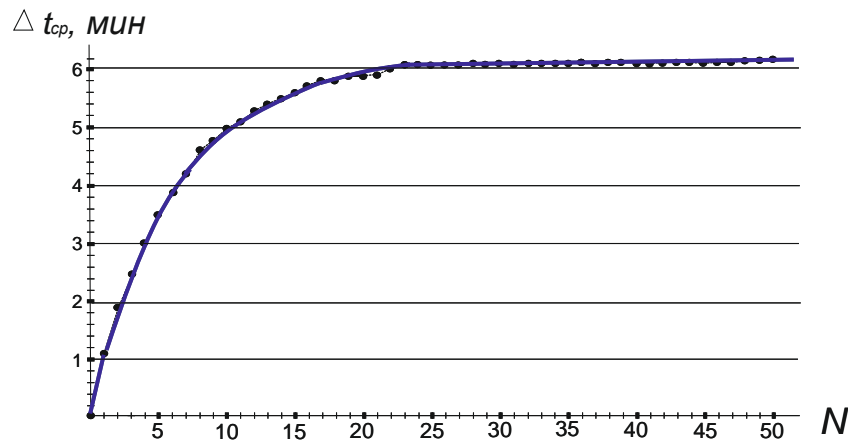


Рисунок 4 – Зависимость сокращения среднего времени одной поездки по городу от числа ТПУ

Исходя из полученной зависимости следует, что предельным значением для городского округа Самара является сокращение среднего времени поездки на 6 мин. Далее величина $\Delta t_{\text{ср}}$ меняется незначительно.

При решении задачи выбора мест размещения ТПУ может получаться несколько подоптимальных вариантов. Для получения оптимального варианта

предложен алгоритм получения множества Парето и выбора единственного варианта по критерию интегральной суммы с весами критериев. В качестве дополнительных критериев отмечены градостроительно-планировочные условия развития узла, наличие торгового центра и других крупных объектов социальной инфраструктуры на территории ТПУ (возможность организации попутного обслуживания пассажиров), количество видов транспорта в узле (ресурсные возможности транспортной инфраструктуры). Расчет выполняется с использованием программы PARETOSet.

Таким образом, в четвертой главе определено количество и выбраны места размещения ТПУ городского округа Самара. Оценена эффективность системы ТПУ Самары путем оценки сэкономленного времени пассажиров в пути следования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе разработана оптимизационная математическая модель для решения задачи выбора мест расположения городских ТПУ по критерию среднего времени поездки при ограничениях.

2. Введено понятие «эффективного пересадочного узла». Разработан программный продукт для поиска эффективных пересадочных узлов. Предложен метод оптимального выбора системы ТПУ на основе эффективных пересадочных узлов.

3. Разработана методика определения количества и мест размещения городских транспортно-пересадочных узлов на основе предложенной оптимизационной математической модели. Получив множество подоптимальных вариантов размещения ТПУ оптимальный вариант выбирается на основании многокритериального выбора.

4. Получила дальнейшее развитие методика определения необходимого числа пересадочных узлов (без определения мест их размещения) в зависимости от площади города, подлежащей транспортному обслуживанию, и зоны влияния ТПУ за счет ввода дополнительных параметров. Составлен алгоритм определения количества ТПУ в зависимости от зоны влияния (площади тяготения) каждого узла. Установлены зависимости числа пересадочных узлов от среднего по городу коэффициента пользования транспортом, плотности городской транспортной сети и коэффициента пересадочности.

5. Выполнена реализация методики определения количества и мест размещения городских транспортно-пересадочных узлов на примере городского округа Самара. Установлена зависимость сокращения среднего времени поездки по городу от числа транспортно-пересадочных узлов.

Рекомендуется использовать полученные научные результаты в программах и проектах развития городских транспортных систем при разработке основ-

ных требований к формированию системы ТПУ на городской транспортной сети. Необходимым является дальнейшее исследование вопросов взаимодействия видов транспорта в узле, развития инфраструктуры, согласования движения всех видов транспорта и повышения качества предоставляемых транспортных услуг для населения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Железнов, Д. В. Определение необходимого количества транспортно-пересадочных узлов в городах России [Текст] / Д. В. Железнов, С. А. Леонова // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 4 (64). – С. 53–59.
2. Железнов, Д. В. Значение транспортно-пересадочных узлов для жителей района «Кошелев-проект» в Самаре [Текст] / Д. В. Железнов, С. А. Леонова // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 3 (69) – С. 46–51.
3. Леонова, С. А. О формировании системы транспортно-пересадочных узлов городского округа Самара [Текст] / С.А. Леонова // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 8. – С. 58–61.
4. Леонова, С.А. Выбор мест расположения пересадочных узлов сети городского пассажирского транспорта [Текст] / С.А. Леонова // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 101–105.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

1. Леонова, С.А. Развитие транспортной системы Самары [Текст] / С.А. Леонова // Научные исследования и разработки молодых ученых: сборник материалов VII Международной молодежной научно-практической конференции / под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – С.113–116.
2. Железнов, Д.В. Развитие транспортно-пересадочных узлов [Текст] / Д. В. Железнов, С.А. Леонова // Транспортно-логистическая интеграция Забайкальского края в условиях российско-китайско-монгольского трансграничья: материалы Международн. научн.-практ. конф., Чита, 22 апр. 2016 г. / под науч. ред. Л.Б. Ковальчук. – Иркутск: Изд-во БГУ, 2016. – С. 58–63.
3. Леонова, С.А. Проблемы и перспективы развития ТПУ в России [Текст] / С.А. Леонова // Материалы международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту». – Самара: Изд-во СамГУПС, 2016. – №1. – С. 109–112.
4. Леонова, С.А. Научные исследования в области транспортно-пересадочных узлов с участием железнодорожного транспорта в Самарском регионе [Текст] / С.А. Леонова // «Железнодорожный транспорт: наука, техника,

образование»; VI Всероссийская научно-практическая конференция 25 ноября 2016 г. – Самара; Рузаевка: филиал СамГУПС в г. Рузаевке. – 2016. – С. 8–11.

5. Леонова, С.А. Подходы и методы в области создания, развития и функционирования транспортно-пересадочных узлов [Текст] / С.А. Леонова // Материалы Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту». – Самара: Изд-во СамГУПС, 2017. – №1. – С. 99–101.

6. Леонова, С.А. Транспортно-пересадочный узел «Пятилетка-Кировская» [Текст] / С.А. Леонова // Наука и образование: достижения и перспективы (2018, Саратов): Материалы I Международной научно-практической конференции, 30 мая 2018 / редкол. Л.И. Чирикова [и др.]. – Самара; Саратов: филиал СамГУПС в г. Саратове, 2018. – С. 26–30.

7. Леонова, С.А. О роли транспортно-пересадочного узла Смышляевка в системе городского пассажирского транспорта [Текст] / С.А. Леонова // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: Материалы IV Междунар. науч.- практ. конф.: в 2 ч.; Ч. 2 / Министерство трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ. – 2018. – С. 286–288.

8. Леонова, С.А. Транспортно-пересадочные узлы в местах пересечения кольцевой железной дороги и других видов наземного городского общественного транспорта в Казани [Текст] / С.А. Леонова // Материалы Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту». – Самара: Изд-во СамГУПС, 2018. – С. 93–95.

9. Леонова, С.А. Математическое моделирование сетей городского транспорта [Текст] / С.А. Леонова // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции «Технологии, материалы, транспорт и логистика: перспективы развития – ТМТЛ'19». – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2019. – №6(24). – С.111–115.

10. Леонова, С.А. Оптимальный выбор мест расположения транспортно-пересадочных узлов [Текст] / С.А. Леонова // Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике / Сб. научных трудов III Международной научно-практ. конференции. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 214–216.