

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТНЫХ СЕТЕЙ ГОРОДОВ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ

Статья посвящена оптимизации маршрутных сетей городов с целью снижения конфликтных ситуаций на остановочных пунктах, обусловленных эффектами синхронного движения маршрутного общественного транспорта по участкам маршрутной сети городов. В статье анализируются известные способы и направления решения данной проблемы, приводятся сведения о способах оптимизации маршрутных сетей.

Ключевые слова: общественный транспорт, дублирующие маршруты, маршрутная сеть, остановочные пункты.

Современный городской пассажирский транспорт является важнейшей системой, обеспечивающей экономическое развитие городов, социальное благополучие населения. Несмотря на стремительное увеличение количества личного автотранспорта, по оценкам многих специалистов, городской транспорт обеспечивает около 80% трудовых и бытовых поездок граждан. В этих условиях от состояния и качества работы городского пассажирского транспорта в значительной степени зависит уровень комфортных условий проживания людей в населенных пунктах всей страны. Доступность и качество работы городского транспорта во многом определяют и реальный уровень жизни населения, социальный климат и мнение людей об эффективности органов власти.

Основными элементами транспортной инфраструктуры маршрутных систем городов кроме сети дорог являются сетевые узлы. На пассажирском транспорте выделяют два вида сетевых узлов: остановочные и узловые пункты. К последнему виду относят автостанции и автовокзалы. Пропускная способность промежуточных остановочных пунктов, аналогично пропускной способности дорог, является основным фактором, который способен существенно ограничить провозные способности пассажирского транспорта. Кроме этого, остановочные пункты являются местом взаимодействия маршрутной транспортной системы с пассажирами, где они осуществляют посадку-высадку в маршрутное транспортное средство, а также местом взаимодействия нескольких маршрутных транспортных средств, как правило, различных маршрутов (на практике в редких случаях наблюдаются ситуации «догона» друг дру-

га транспортными средствами, работающими на одном маршруте). В этой связи к остановочным пунктам, их обустройству и параметрам предъявляются серьезные требования. Однако в последнее время остановочные пункты становятся существенным фактором, сдерживающим эффективность работы маршрутных систем городов, из-за большого скопления транспорта на остановочных пунктах не обеспечиваются условия безопасной посадки-высадки пассажиров, транспортные средства вынуждены терять время в ожидании свободного места на остановочной площадке, создают помехи движения транспортных потоков как в попутном направлении, так и на пересечениях дорог. Поэтому задача повышения эффективности функционирования городского пассажирского транспорта с учетом конфликтов на остановочных пунктах является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

В прежние годы были разработаны достаточно хорошие методы оптимизации работы городского пассажирского транспорта. Однако во многих случаях решение задач сводилось к определению обоснованных объемов транспортной работы для условий, когда отсутствует реальная конкуренция между независимыми перевозчиками на маршрутах в пределах маршрутной сети одного муниципального образования. Другими словами, решались задачи оптимального распределения наличного парка пассажирского транспорта по маршрутам с учетом транспортных затрат в условиях, когда весь транспорт и вся маршрутная сеть обслуживались одним собственником. В современных условиях свободной конкуренции при организации новых маршрутов, которые в идеальной ситуации позволяют населе-

нию совершать поездки в более комфортных условиях (с меньшими затратами времени на ожидание транспортного средства, при низкой наполняемости салона и пр.), важное значение для решения вопроса о целесообразности открытия маршрута и определения его параметров приобретает критерий наличия конфликтов подвижного состава на остановочных пунктах для смежных участков маршрутной сети.

Проблема оптимизации маршрутных сетей с учетом инфраструктурных ограничений недостаточно раскрыта не только в работах отечественных ученых, но и в работах представителей зарубежной школы городского общественного пассажирского транспорта. По данным [8], в зарубежных странах, в том числе странах Европейского союза и США, данные вопросы недостаточно исследованы, так как там основное внимание уделяется выбору способа перемещения населения (личным или общественным транспортом), а количество маршрутов, проходящих по одной и той же части улично-дорожной сети, сведено до минимума за счет высокого коэффициента пересадочности.

Как показывают исследования, потребности населения в передвижении за последние годы существенно не изменились. Кроме того, в связи со структурными изменениями в экономике увеличилась доля «дальних» поездок пассажиров, о чем свидетельствуют меньшие темпы снижения пассажирооборота по видам транспорта по сравнению с объемами перевозок, а также рост абсолютных значений средней дальности поездки пассажиров, рассчитанных через отношение пассажирооборота к объему перевозок. За период с 2000 по 2009 г. объем перевозок на автомобильном транспорте снизился на 56,2%, а пассажирооборот снизился только на 43%, за тот же период средняя дальность поездки пассажиров, наоборот, увеличилась на 29,6% [9].

Анализ статистических данных [9] показывает, что увеличение количества маршрутного пассажирского транспорта не сопровождается соразмерным увеличением провозных возможностей маршрутных сетей. При среднем приросте количества пассажирского транспорта в Челябинской области в 66,3% (по отдельным муниципальным образованиям, прежде всего крупным городам, прирост составил свыше 100%) прирост провозных возможностей составил 15%. Данное обстоятельство обусловлено

непропорциональным изменением структуры парка подвижного состава, наибольшая доля нового транспорта приходится на автобусы малой вместимости.

Наиболее интенсивно автобусы приобретаются гражданами для ведения индивидуальной предпринимательской деятельности. За период с 2000 по 2009 г. количество автобусов в собственности граждан увеличилось в 3,7 раза. Причем в основном граждане приобретали автобусы особо малой вместимости марки «Газель». Их количество в собственности граждан увеличилось почти в 26 раз [9]. Соответственно, если десять лет назад в структуре автобусного парка преобладали автобусы марки ПАЗ и ЛиАЗ, то сейчас свыше 30% приходится на автобусы марки «Газель». Общее количество автобусов марки «Газель» (с учетом собственности граждан и юридических лиц) увеличилось в 10,8 раза. Доля автобусов большой вместимости (марки ЛиАЗ) на рынке пассажирских перевозок в Челябинской области в последние годы стремительно снижается и составляет около 3%. Причем этот подвижной состав в основном принадлежит юридическим лицам. Однако обновление парка автобусов марки ЛиАЗ отмечается за счет их приобретения в собственность граждан (индекс роста 133,3%), а количество ЛиАЗов в собственности юридических лиц сократилось на 48,3%. Таким образом, сегодня на рынке пассажирских перевозок в муниципальных образованиях Челябинской области преобладают (свыше 50%) автобусы общей вместимостью до 40 пассажиров.

В связи с увеличением на улицах городов количества автомобильного транспорта, в том числе пассажирского, для решения проблем, связанных с дорожным движением наземного транспорта, в том числе с низкой скоростью перевозок населения общественным пассажирским транспортом, в последнее время достаточно часто встречаются публикации о необходимости интенсивного развития объектов транспортной инфраструктуры населенных пунктов.

На наш взгляд, не следует упрощать задачу, полагая, что только наличие «хороших» автодорог позволит обеспечить высокий уровень транспортного обслуживания населения. По мнению американского ученого В. Вучека, даже самые совершенные сети автомобильных дорог не способны кардинально улучшить условия

транспортных передвижений населения в современных городах. Наоборот, при совершенствовании условий транспортного обслуживания населения приоритет должен отдаваться организационным и технологическим решениям [3]. Другими словами, компенсировать недостаточный уровень развития улично-дорожной сети возможно путем оптимизации, координации и организации согласованной работы действующих маршрутных сетей муниципальных образований.

В ряде современных работ [2, 4, 7, 8 и др.] авторами разрабатываются математические модели, алгоритмы и методики распределения пассажирских потоков в городах, минимизации числа пассажирских транспортных средств на маршрутах, определения рациональных параметров маршрутной сети городского пассажирского транспорта, выбора способа перемещения населением и решаются другие задачи совершенствования маршрутных сетей городов. Однако данные модели и методы не учитывают динамику движения пассажирского транспорта при работе на дублирующих маршрутах, возможные конфликты на остановочных пунктах.

Уточним используемые понятия предметной области исследования. Совмещенный участок маршрутов – участок пути (сеть дорог) который совместно используется транспортными средствами с дублирующими или смежными маршрутами. На данном участке могут располагаться совмещенные либо нет промежуточные остановочные пункты. Смежные маршруты – маршруты, имеющие различные трассы движения, но совместно использующие некоторые участки дорожной сети или остановочные пункты на совмещенных участках маршрутов. Дублирующими являются маршруты, у которых трассы движения транспорта (совокупность используемых для движения уличных дорог) в целом или в части (как правило, более 50% от общей протяженности трассы маршрутов) совпадают и у которых на совмещенных участках маршрутов совместно используются одни и те же остановочные пункты (как правило, более 50% от общего количества остановочных пунктов маршрута). Совмещенный интервал – это промежуток времени между началом движения двух следующих друг за другом транспортных средств по дублирующим маршрутам.

Наличие смежных участков на маршрутах может создавать определенную проблему в работе маршрутного транспорта и, как правило,

приводит к синхронному (от греч. *synchronos* – одновременный) входу подвижного состава на смежные участки сети и синхронному прибытию на смежные остановочные пункты. Термином «синхронность» обычно обозначают группирование двух или более событий вокруг одного смыслового центра. Для того чтобы быть синхронными, два или более события должны произойти одновременно и иметь большое влияние друг на друга, но при этом они не должны иметь причинно-следственную связь друг с другом.

Предлагается рассматривать два типа конфликтных ситуаций на смежных или дублирующих маршрутах. Первый тип: конфликты при движении. Для конфликтов данного типа характерно совершение одним (быстрым) маршрутным транспортным средством вынужденных обгонов или опережений другого (медленного) маршрутного транспортного средства. Второй тип: конфликты на остановочных пунктах. Для конфликтов на остановочных пунктах характерно образование очередей из ожидающих места на них для посадки-высадки пассажиров маршрутных транспортных средств в количестве, превышающем возможности таких остановочных пунктов для их одновременного размещения.

Решение задачи совершенствования маршрутной сети с учетом инфраструктурных ограничений включает математическую модель загрузки остановочных пунктов и определения конфликтных ситуаций. Данная модель позволяет оценить степень конфликтности маршрутной сети и принять решение о необходимости ее оптимизации. На основе модели образования конфликтных ситуаций на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта возможно осуществить постановку математической задачи оптимизации маршрутной сети с учетом объемов пассажиропотоков и пропускной способности остановочных пунктов.

Основные теоретические и методологические положения имитационной модели загрузки остановочных пунктов общественного транспорта изложены в [5]. Число конфликтных ситуаций N_A на маршрутах рассчитывается по следующей формуле:

$$N_A = \begin{cases} (T_{1n} - t_{k1}) / I_2, & \text{при } N_I \leq n_{p2} \\ n_{p2}, & \text{при } N_I > n_{p2} \end{cases}, \quad (1)$$

где I_2 – интервал движения транспортных средств по второму маршруту; T_{1n} – время дви-

жения транспортных средств с первого маршрута по смежному участку; t_{k1} – время движения транспортного средства с первого маршрута от момента начала движения по маршруту до наступления конфликта; n_{p2} – количество рейсов транспортного средства по второму маршруту за период T_{1n} ; N_I – возможное число конфликтных ситуаций за период T_{1n} , определяется из выражения:

$$N_I = (T_{1n} - t_{k1}) / I_2.$$

На основе модели (1) разработана компьютерная программа, которая имитирует движение пассажирского транспорта по внутримunicipальным маршрутам и позволяет оценивать конфликты на остановочных пунктах. Данная модель учитывает следующие параметры движения транспорта по маршруту: время начала движения транспорта по каждому маршруту с начальных пунктов, скорость движения транспорта по участкам маршрута, время посадки-высадки пассажиров, интервалы движения по маршрутам. Данная программа не только позволяет оценивать работу существующей маршрутной сети, но также может использоваться для выявления потенциальных конфликтов при открытии новых маршрутов. На основе результатов имитационного моделирования могут приниматься решения о необходимости реконструкции остановочных пунктов или оптимизации параметров маршрутной сети в целом или отдельных маршрутов.

Задача оптимизации маршрутной сети городов должна формулироваться с учетом ограниченности пропускной способности остановочных пунктов, однако в существующих работах данное условие не учитывается. Например, в методике определения рационального количества подвижного состава различных типов на маршрутах [1] в качестве ограничения целевая функция учитывает пропускную способность как улиц, так и остановочных пунктов. Однако разработанная в [1] модель не учитывает возникновение возможных конфликтов на остановочных пунктах между транспортными средствами с дублирующими и смежных маршрутов. В работе [7] в качестве ограничения при оптимизации количества подвижного состава различной вместимости используется пропускная способность дороги, но не учитываются ограничения пропускной способности остановочных пунктов, что является, на наш взгляд, более важным, так как пропускная способность ли-

ний маршрутного транспорта ограничивается прежде всего пропускной способностью остановочных пунктов. Например, если для нормальных условий движения (то есть при соблюдении правил посадки-высадки пассажиров) пропускная способности остановочного пункта с габаритами остановочной площади для одного транспортного средства не превышает 200 ед./час, то пропускная способность полосы автодороги на порядок выше.

В идеальном случае отсутствие конфликтных ситуаций наблюдается при условии, что величина совмещенной частоты (интенсивности) движения v_{si} пассажирского транспорта на всех маршрутах, проходящих через остановочный пункт s_i , не превышает его пропускной способности p_{si} :

$$v_{si} \leq p_{si}, s_i \in S (i = 1, \dots, n),$$

где n – количество остановочных пунктов маршрутной сети, $n = 1 \dots N$.

Величина совмещенной частоты движения v_{si} на i -м остановочном пункте s_i может быть рассчитана по формуле:

$$v_{si} = \sum_{j=1}^m \frac{1}{t_j(s_i)}, s_i \in S, t_j(s_i) \in I (j = 1, \dots, m),$$

где $t_j(s_i)$ – интервал движения пассажирского транспорта по j -му маршруту, проходящего через остановочный пункт s_i , ч.

Если данное условие выполняется, то конфликтных ситуаций на остановочном пункте не будет. Ситуация, когда значение совмещенной частоты движения v_{si} превышает пропускную способность остановочного пункта p_{si} , свидетельствует о дефиците пропускной способности, величина которой определяется по следующей формуле:

$$\omega_{si} = v_{si} - p_{si}.$$

Показатель дефицита пропускной способности ω_s всех остановочных пунктов выступает в качестве критерия оптимальности параметров маршрутной сети:

$$F(\omega_s) = \sum_{i=1}^n \omega_{si} \longrightarrow \min, \omega_{si} \in \Omega. \quad (2)$$

Величина интервалов движения t_j пассажирского транспорта по j -му маршруту определяется с учетом заданного пассажиропотока по маршруту (для расчетов используется значение максимальной мощности пассажиропотока Q_j на участках j -го маршрута), средней вместимости q_k пассажирского транспорта k -го типа (типо-

логия производится с учетом структуры парка), коэффициента использования вместимости γ_k , количества транспортных средств (данный параметр отражает качество обслуживания пассажиров, в условиях конкуренции не рекомендуется устанавливать свыше 0,7):

$$t_j = \frac{q_k \gamma_k}{Q_j}.$$

Следовательно, основной экзогенной переменной модели оптимизации параметров маршрутной сети с учетом ограничений пропускной способности остановочных пунктов является вместимость q_k ($k = 1, 2, \dots, g$) подвижного состава k -го типа. Изменение вместимости для заданного пассажиропотока приводит к изменению количества транспорта x_{kj} на маршруте, интервалов его движения и, как следствие, к изменению частоты движения по маршрутам v_j и совмещенной частоты движения по отдельным остановочным пунктам v_{si} .

Использование при расчетах максимальной мощности пассажиропотока Q_j на участках маршрута представляется более удобным, так как для корректности расчетов с использованием других значений пассажиропотока (например, за рейс, в час пик, за сутки и др.) последние показатели должны учитывать коэффициент сменяемости пассажиров по маршруту и коэффициенты неравномерности пассажиропотока по участкам маршрутов и направлениям движения.

На практике, как правило, при формировании параметров маршрутной сети городов следует учитывать ограниченные возможности по выбору структуры парка, то есть задавать условия оптимизационной задачи на вычисление оптимального количества пассажирского транспорта определенного типа (вместимости) без учета наличного количества транспортных средств будет некорректно. Так как можно получить решение, при котором, например, потребуются полная замена транспортных средств малой вместимости на подвижной состав большой вместимости, что не всегда возможно в условиях ограничений финансовых ресурсов перевозчиков или муниципальных образований.

Поэтому к условиям оптимизационной задачи (2) рекомендуется добавлять ограничения, учитывающие существующую структуру парка транспортных средств:

$$\sum_{j=1}^m x_{kj} \leq X_k, \quad (3)$$

где x_{kj} – количество транспортных средств k -го типа, работающих на j -м маршруте, ед.; X_k – общее количество транспортных средств k -го типа в структуре парка, ед.; k – количество типов транспортных средств, $k=1 \dots N$.

Кроме того, для маршрутов с небольшими объемами пассажиропотока, чтобы исключить значительные интервалы движения транспорта по маршрутам, которые снижают качество транспортного обслуживания населения (интервалы в небольших городах устанавливаются в 30 и более минут, для крупных городов не рекомендуется превышать 20 минут), могут вводиться дополнительные ограничения по величине интервалов:

$$t_j \leq t_{j0} \quad (4)$$

либо, в зависимости от конкретных условий:

$$t_j \leq t_0,$$

где t_{j0} и t_0 – максимально допустимые интервалы движения маршрутного транспорта на отдельном j -м маршруте и для всех маршрутов сети соответственно.

Если в задаче учитываются ограничения по структуре парка и допустимым интервалам движения, то решение (2) может быть не оптимальным, а рациональным.

Таким образом, для решения задачи формирования рациональных параметров маршрутной сети, обеспечивающих нивелирование возможных конфликтных ситуаций на остановочных пунктах, следует определить такие интервалы движения пассажирского транспорта на всей совокупности маршрутной сети, при которых совмещенная частота движения на остановочных пунктах v_{si} не будет превышать пропускную способность соответствующих остановок p_{si} , либо это превышение сохранится, что может быть обусловлено существующей структурой парка пассажирского транспорта X_k или допустимыми интервалами движения маршрутного транспорта t_{j0} , но будет минимальным.

Запишем в общем виде модель формирования оптимальных параметров маршрутной сети с соблюдением ограничений к неотрицательности переменных:

$$u(\omega_s) = \{q_k, t_j, p_i\} \longrightarrow \text{Opt}, \quad (5)$$

при $q_k \in G$, $q_k \geq 0$; $t_j \in I$, $t_j \geq 0$; $p_i \in P$, $p_i \geq 0$, где $u(\omega_s)$ – вектор оптимальных параметров маршрутной сети, обеспечивающих исключение или максимальное снижение возможных конф-

ликтов на сети за счет минимального значения общего дефицита пропускной способности остановочных пунктов ω_{si} .

Задача оптимизации параметров маршрутной сети формулируется следующим образом: необходимо найти такой вектор u^* из множества параметров маршрутной сети U , чтобы величина общего дефицита пропускной способности $\omega_s^* = F(u^*, \Omega(u^*))$ была меньше, чем $\omega_s = F(u, \Omega(u))$ для любого другого $u \in U$:

$$\omega_s^* = F(u^*, \Omega(u^*)) \longrightarrow \min.$$

С учетом (3), (4), (5) запишем математическую модель оптимизации параметров маршрутной сети (2) следующим образом:

$$F(\omega_s) = \sum_{i=1}^n \omega_{si} \longrightarrow \min, \quad (6)$$

при $q_k \in G, q_k \geq 0; \tau_j \in I, \tau_j \geq 0; p_i \in P, p_i \geq 0,$

$$\sum_{j=1}^m x_{kj} \leq X_k, \tau_j \leq \tau_{jo}.$$

Задача (6) является типичной задачей линейного программирования и может быть решена известными методами. Для решения формируется база данных о параметрах маршрутной сети, движения транспортных средств по маршрутам, мощности пассажиропотоков, пропускной способности остановочных пунктов.

Приведенные модели (1) и (6) рекомендуются к использованию для выявления конфликтных ситуаций на остановочных пунктах, представляющих собой «узкие места» в маршрутной сети, и формирования рациональных параметров маршрутных сетей, обеспечивающих эффективные и безопасные условия работы маршрутного транспорта и посадки–высадки пассажиров на остановочных пунктах.

5.05.2011

Список литературы:

1. Власов, Ю.Л. Обоснование и рациональное распределение по маршрутам парка городского пассажирского транспорта: дис. ... канд. тех. наук / Ю.Л. Власов. – Оренбург, 2006. – 170 с.
2. Володченко, С.В. Моделирование распределения пассажирских потоков в крупных городах: дис. ... канд. тех. наук / С.В. Володченко. – СПб., 2005. – 184 с.
3. Вучек, В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / В.Р. Вучек. – М.: Территория будущего, 2011. – 576 с.
4. Коробов, С.А. Совершенствование пассажирских перевозок на основе выбора рациональной структуры внутригородских перемещений: дис. ... канд. тех. наук / С.А. Коробов. – Тюмень, 2009. – 133 с.
5. Ларин, О.Н. Вопросы образования конфликтных ситуаций на маршрутных сетях муниципальных образований / О.Н. Ларин, А.А. Кажаяев // Вестник БрГТУ. – 2010. – №5 (65): Физика, математика, информатика. – С. 60–63.
6. Ларин, О.Н. Особенности управления пассажирскими перевозками в муниципальных образованиях / О.Н. Ларин, В.Н. Смолин // Транспорт Урала. – 2009. – №2 (21). – С. 9–10.
7. Пыталева, О.А. Анализ и систематизация факторов, влияющих на параметры городских транспортных потоков // Транспорт Урала. – 2009. – Вып. 4(23). – С. 19–21.
8. Семенова, О.С. Математическое моделирование в задачах оптимизации движения городского пассажирского транспорта с учетом наложения маршрутных схем: дис. ... канд. тех. наук / О.С. Семенова. – Новокузнецк, 2009. – 127 с.
9. Транспорт в Челябинской области: Стат. сб. / ред. Н.С. Колотова. – Челябинск: Челябинскстат, 2010. – 112 с.

**Научная статья подготовлена при поддержке Федеральной целевой программы
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы»
(№16.740.11.0520).**

Сведения об авторах:

Ларин Олег Николаевич, заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, доцент
Кажаяев Андрей Александрович, соискатель, инженер кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета
г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, тел. (351)267-94-16, e-mail: larin_on@mail.ru; trans@susu.ac.ru

UDC 656.13

Larin O.N., Kazhaev A.A.

South Ural state university, e-mail: trans@susu.ac.ru

OPTIMIZATION OF BLOCK NETWORKS OF CITIES GIVEN THE BANDWIDTH LIMITATIONS STOP POINTS

The article is devoted to optimizing the route networks of cities to reduce conflict situations on the stop points arising from the effects of synchronous traffic route public transport stations route network of cities. This article analyzes the known ways and directions of the problem, provides information about how to optimize routing networks.

Key words: public transport, overlapping routes, destinations served.