

УДК 656. 072

УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПАССАЖИРСКИХ
ПЕРЕВОЗОК В ГОРОДАХ КУРОРТНЫХ ЗОН В ЛЕТНИЙ
ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ Г. ГЕЛЕНДЖИКА)

В. П. Белокуров (ФГОУ ВПО ВГЛТА)

Развитие транспортной системы в направлении совершенствования пассажирских перевозок в городах курортных зон непосредственно связано с сезонным ростом численности пассажиров. Задачи, которые при этом приходится решать – это повышение эффективности использования пассажирского автотранспорта с одновременным улучшением качества и комфортабельности поездок. Эти задачи приобретают в настоящее время исключительную актуальность, а их решение требует применения самих современных методов и подходов.

Оптимальное распределение дополнительно выделенного пассажирского транспорта по маршрутам в период увеличения пассажиропотоков целесообразно проводить после выбора типа пассажирского автотранспорта (с учетом его вместимости), определения его количества по каждому маршруту, интервалов движения и других показателей характеризующих качество перевозок.

Выбор типа пассажирского транспортного средства основывается на увеличении интенсивности пассажиропотока в летний период времени, пропускной способности улично-дорожной сети (УДС) и отдельных направлений (магистралей) в городах курортных зон. Так, в случае больших пассажиропотоков на улицах и магистралях целесообразно использовать пассажирские транспортные средства большой вместимости, что будет предотвращать перегрузку маршрутов пассажирским транспортом малой вместимости. Однако, в этом случае, происходит увеличение интервалов движения пассажирского автотранспорта. Кроме этого, следует отметить, что при выборе типа пассажирского автотранспорта, важным является себестоимость перевозки пассажиров и, соответственно, рентабельность перевозок. Таким образом, в качестве функции цели при поиске оптимальных управляющих планов перевозки пассажиров выступает обобщенный показатель эффективности и качества обслуживания, учитывающий требования пассажиров и стоимость перевозок [1-6].

Определение оптимальных маршрутов движения пассажирских автотранспортных средств сводится, как правило, к задаче максимизации средней

скорости движения при заданных пропускных способностях звеньев транспортной сети, количествах пассажирского автотранспорта, их типоразмерах, условиях посадки и высадки пассажиров.

Решение задачи управления пассажирскими перевозками требует использование матрицы норм времени, в которой каждый элемент матрицы $\|t_{f,g}^{cn}\|$ представляет собой время следования пассажира от остановки с номером f к остановке с номером g . Кроме этого используются матрицы корреспонденций пассажиропотоков, элементы которых могут быть выражены в форме следующих равенств:

$$\begin{aligned} R_f &= \sum_{g=f+1}^N Q_{f,g} & f = \overline{1, N}, \\ P_g &= \sum_{f=1}^{g-1} Q_{f,g} & g = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Q_{f,g}$ – количество пассажиров, следующих от остановки f к остановке g ; R_f – количество пассажиров, входящих в пассажирское автотранспортное средство на остановке f ; P_g – количество пассажиров, выходящих из пассажирского автотранспортного средства на остановке g ; N – общее количество остановок на маршруте.

Загрузка пассажирских автотранспортных средств на маршруте, в предположении того, что их количество достаточное, может быть записано неравенством:

$$\sum_{g=1}^f (R_{i,g} - P_{i,g}) \leq q_i, \quad f = \overline{1, N_i}, \quad (2)$$

где q_i – вместимость пассажирского автотранспортного средства, используемого на маршруте i ; N_i – количество остановок на маршруте i .

Неравенство (2) устанавливает, что количество пассажиров, заполняющих пассажирское автотранспортное средство на любой остановке $\sum_{g=1}^f (R_{i,g} - P_{i,g})$, не должно превышать вместимость автобуса q_i . При использовании коэффициента наполняемости $\gamma_{i,f}$ имеем неравенство:

$$\gamma_{i,f} \leq 1; \quad f = \overline{1, N_i}. \quad (3)$$

Исходя из максимальной загрузки пассажирского автотранспортного средства представляется возможность определить их оптимальное количество на маршруте. Для этого необходимо определить как минимальное, так и максимальное допустимое количество пассажирского автотранспорта на том или ином маршруте.

Для вычисления *min*-го количества пассажирского автотранспорта на маршруте может быть использована зависимость [7]:

$$A_{\min}^i = \frac{T_{об}^i \cdot \gamma_{i,j}}{\Delta \tau_i}, \quad (4)$$

а *max*-е количество пассажирских автотранспортных средств может быть вычислено по формуле:

$$A_{\max}^i = \frac{L_i}{V_i \cdot \tau_i} + N_i, \quad (5)$$

где $T_{об}^i$ – время оборота пассажирского автотранспортного средства на маршруте i , мин. / об.; $\Delta \tau_i$ – интервал времени входа – выхода пассажиров, с; L_i – длина i -го маршрута в обоих направлениях, км; V_i – эксплуатационная скорость пассажирского автотранспортного средства на i -ом маршруте, км. / ч; τ_i – среднее время стоянки пассажирского автотранспортного средства на i -ом маршруте, мин; N_i – количество остановок на i -ом маршруте; $\gamma_{i,j}$ – величина загрузки пассажирского автотранспорта внутри i -го маршрута на остановке с номером f в момент времени τ .

Для определения минимального числа пассажирского автотранспорта на маршруте необходимо выбрать такой момент времени τ и такую остановку f , при которой загрузка пассажирского автотранспорта будет максимальной ($\gamma_{i,j} \rightarrow \max$), то есть

$$\gamma_{i,f}^{\max} = \max_{\tau, f} \left\{ \sum_{g=1}^f [R_{i,g}(\tau) - P_{i,g}(\tau)] \right\} / q_i = \max_{\tau, f} [\gamma_{i,f}(t)]. \quad (6)$$

Оптимальное количество пассажирских автотранспортных средств на маршруте i заключено в интервале количества пассажирского автотранспорта между A_{\min}^i и A_{\max}^i , то есть:

$$\frac{T_{об}^i \cdot \gamma_{i,j}}{\Delta \tau_i} \leq A_i \leq \frac{L_i}{V_i \cdot \tau_i} + N_i. \quad (7)$$

Целевая функция в этом случае примет следующий вид [7]:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{T_{об}^i}{2A_i} + \frac{\tau_i}{2} \right] \cdot Q_i + \frac{R_{i,f} \cdot \tau_{i,f}}{2} \right\}, \quad (8)$$

где Q_i – пассажиропоток на i -ом маршруте, пасс. / ч.; $\tau_{i,f}$ – среднее время стоянки пассажирского автотранспортного средства на f -ой остановке i -го маршрута, ч.; $R_{i,f}$ – количество пассажиров, входящих в пассажирское автотранспортное средство на f -ой остановке на i -ом маршруте, пасс;

Так как величина $\tau_i = const$, $\tau_{i,f} = const$ и не зависят от числа пассажирских автотранспортных средств A_i на маршруте i , то целевая функция (8) может быть упрощена и примет вид:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{T_{об}^i \cdot Q_i}{2A_i}. \quad (9)$$

Согласно полученной целевой функции φ (9) представляется возможность оптимально распределить пассажирские автотранспортные средства по маршрутам и решить такие важные задачи, как рациональное использование имеющегося пассажирского автотранспорта, обеспечить его ритмичность движения на маршрутах, уменьшить время ожидания автотранспорта и нахождения пассажиров в пути при поездке из пункта f в пункт g и т.д.

При оптимальном распределении пассажирских автотранспортных средств по маршрутам в целевой функции (9) единственным управляющим воздействием является количество автотранспорта A_i на маршруте i , так как параметры, входящие в зависимость (9), за исключением A_i , являются характеристиками непосредственно маршрута и инвариантны по отношению к числу пасса-

жирского автотранспорта на маршруте.

Для минимизации целевой функции (9) использовался метод динамического программирования. Согласно принципу оптимальности по Р. Беллману [8], проводилась пошаговая минимизация целевой функции φ . При этом предполагается, что на очередном шаге оптимизации имеем количество пассажирских автотранспортных средств характерных предыдущему шагу.

В этом случае очередной шаг оптимизации по распределению дополнительного пассажирского автотранспорта на имеющихся маршрутах должен минимально увеличивать целевую функцию φ . Так как целевая функция монотонно убывает и выпукла, то распределив определенным образом пассажирские автотранспортные средства на очередном k -ом шаге оптимизации, получаем окончательно полную оптимизацию. После этого отпадает необходимость дальнейшего перераспределения пассажирских автотранспортных средств на последующем $(k + 1)$ -ом шаге оптимизации, так как \min целевой функции φ будет уже пройден.

Решение задачи оптимизации методом динамического программирования основывается на построении функции Р. Беллмана [8, 9].

При этом предполагается

$$\varphi_k = \min_{\{A_i\}} [\varphi(A_1, \dots, A_i)], \quad (10)$$

где $[\varphi(A_1, \dots, A_i)]$ – функция, определяемая по формуле (9); k – порядковый номер k -й оптимизации по Р. Беллману.

Для функции (10) должно соблюдаться при решении следующее ограничение

$$\sum_{i=1}^n A_i \leq A, \quad (11)$$

где n – количество пассажирских автотранспортных маршрутов; i – i -й маршрут; A – общее количество пассажирских автотранспортных средств.

Уменьшение целевой функции φ на i -ом маршруте в результате дораспределения на него дополнительно B_i пассажирских автотранспортных средств может быть определено с учетом (9) по зависимости

$$\varphi_i(A_i, B_i) = \frac{T_{об}^i \cdot Q_i}{2A_i} - \frac{T_{об}^i \cdot Q_i}{2(A_i + B_i)} = \frac{T_{об}^i \cdot Q_i \cdot B_i}{2A_i \cdot (A_i + B_i)}. \quad (12)$$

Доказано, что величина $\{\varphi_k\}$ связана рекуррентным выражением [7]:

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} - \max_i [\varphi_i(A_i, 1)], \quad (13)$$

согласно которому на каждом последовательном шаге оптимизации лучший результат достигается при дополнительном добавлении только одного распределяемого автотранспортного средства на маршруте.

Таким образом, оптимальное распределение дополнительного пассажирского автотранспорта в летний период в городах курортных зон на каждом k -ом шаге оптимизации необходимо увеличивать на одну единицу на маршруте, достигая при этом минимум функции φ . Пошаговая оптимизация распределения дополнительного пассажирского автотранспорта по маршрутам транспортной сети городов курортных зон в летний период времени обеспечивается за счет использования метода динамического программирования.

Нижнее ограничение (7) при решении данной задачи оптимизации может быть выбрано в качестве начальных приближений для получения оптимального количества пассажирских автотранспортных средств A_i на маршруте i .

Используемый способ динамического программирования позволяет наметить оптимальную стратегию распределения дополнительных пассажирских автотранспортных средств на маршрутах в летний период времени в курортных городах при увеличении пассажиропотоков с любого шага оптимизации. Иначе говоря, представляется возможность произвести оптимальное дораспределение вновь поступившей партии пассажирского автотранспорта B_i только лишь на период летнего сезона. В качестве начального плана распределения пассажирского автотранспорта по маршрутам целесообразно использовать рассчитанные для каждого i -го маршрута минимальное количество автотранспорта, необходимого для перевозки пассажиров во вне сезонное время массовых отпусков и отдыха жителей страны. К закрепленному за маршрутами пассажирскому автотранспорту во вне сезонное время происходит пошаговое оптимальное дораспределение партии автотранспорта B_i на период летнего сезона.

Минимизировать целевую функцию φ в случае оптимального распределения дополнительного пассажирского автотранспорта B_i можно так же с помощью метода множителей Лагранжа при определении условного экстремума целевой функции [10]. Однако, результаты, полученные с помощью этого метода, являются нецелочисленными, что требует дополнительных вычислений и

способов их округления. Поэтому рассмотренный выше метод динамического программирования является более предпочтительным по сравнению с методом множителей Лагранжа.

На основании предложенного выше метода динамического программирования по Р. Беллману рассмотрим добавление и распределение по маршрутам автобусов большой вместимости НЕФАЗ-5300 в количестве 5 шт. на летний период в городе-курорте Геленджик. Пассажирский автотранспорт НЕФАЗ-5300 имеет 23 места для сидения и позволяет при этом перевозить 89 пассажиров стоя, то есть всего может перевести 112 пассажиров. Оптимальное распределение 5-ти единиц пассажирского автотранспорта рассматривается между двумя наиболее «напряженными» маршрутами № 3 и № 5. Маршрут № 3 «ул. Молодежная – Голубая бухта» имеет следующие характеристики: нулевой пробег $L_0 = 9,3$ км, длина маршрута $L_m = 19,1$ км. Маршрут № 5 «Тонкий мыс – Полярная звезда» – $L_0 = 10$ км, $L_m = 16,8$ км. Обследование пассажиропотоков на маршрутах № 3 и № 5 на пассажирском автотранспорте НЕФАЗ-5300 производилось в один и тот же день и соответствовало на маршруте № 3 – $Q_{N3} = 629$ пасс/ч, а на маршруте № 5 – $Q_{N5} = 518$ пасс/ч. На маршруте № 3 работает 7 единиц пассажирского автотранспорта, преимущественно НЕФАЗ-5300 с количеством рейсов 12,5 и временем оборота $T_{об} = 125$ об/мин, а на маршруте № 5 – 9 единиц автотранспорта преимущественно НЕФАЗ-5300 с количеством рейсов 9 и $T_{об} = 141$ об/мин.

Используя пошаговую оптимизацию динамического программирования, распределим пять пассажирских автотранспортных средств (АТС) марки НЕФАЗ-5300 в оптимальном отношении между маршрутами № 3 и № 5 в городе-курорте Геленджик на период летнего времени.

На первом этапе (шаге) оптимизации на маршрут № 3 добавляется только одно АТС, то есть $A_3^1 = 7 + 1 = 8$, а маршрут № 5 остается без изменения $A_5^1 = 9$.

Целевая функция в этом случае согласно зависимости (13) имеет вид

$$\varphi_{11} = \varphi_{10} - \max \left\{ \frac{T_{об}^3 \cdot Q_3 \cdot B_3}{2A_3 \cdot (A_3 + B_3)}, \frac{T_{об}^5 \cdot Q_5 \cdot B_5}{2A_5 \cdot (A_5 + B_5)} \right\}, \quad (14)$$

$$\text{где } \frac{T_{об}^3 \cdot Q_3 \cdot B_3}{2A_3 \cdot (A_3 + B_3)} = \frac{125 \cdot 629 \cdot 1}{2 \cdot 7 \cdot (7 + 1)} = \frac{78625}{112}; \quad \frac{T_{об}^5 \cdot Q_5 \cdot B_5}{2A_5 \cdot (A_5 + B_5)} = \frac{141 \cdot 518 \cdot 1}{2 \cdot 9 \cdot (9 + 1)} = \frac{73038}{180};$$

В этом случае целевая функция (14) примет вид:

$$\varphi_{11} = \varphi_{10} - \max \left\{ \frac{78625}{112}; \frac{73038}{180} \right\};$$

Используя зависимость (9) и (12) определим

$$\varphi_{10} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{об}^i \cdot Q_i}{2A_i} = \frac{T_{об}^3 \cdot Q_3}{2A_3} + \frac{T_{об}^5 \cdot Q_5}{2A_5} = \frac{125 \cdot 629}{2 \cdot 7} + \frac{141 \cdot 518}{2 \cdot 9} = 9673,8;$$

$$\max = \frac{T_{об}^3 \cdot Q_3 \cdot B_3}{2A_3 \cdot (A_3 + B_3)} = \frac{125 \cdot 629 \cdot 1}{2 \cdot 7 \cdot (7 + 1)} = 702;$$

Окончательно целевая функция (14) на первом этапе (шаге) оптимизации равна:

$$\varphi_{11} = \varphi_{10} - \max = 9673,8 - 702 = 8971,8.$$

На втором этапе (шаге) оптимизации на маршрут № 3 добавляется еще одно АТС, то есть $A_3^2 = 8 + 1 = 9$, а маршрут № 5 остается без изменения $A_5^2 = 9$.

Поступая аналогично, как и на первом шаге оптимизации имеем

$$\varphi_{12} = \varphi_{11} - \max \left\{ \frac{78625}{144}; \frac{73038}{180} \right\}; \quad (15)$$

$$\max = \frac{T_{об}^3 \cdot Q_3 \cdot B_3}{2A_3 \cdot (A_3 + B_3)} = \frac{125 \cdot 629 \cdot 1}{2 \cdot 8 \cdot (8 + 1)} = 546;$$

Окончательно целевая функция (15) после второго этапа (шага) оптимизации равна

$$\varphi_{12} = \varphi_{11} - \max = 8971,8 - 546 = 8425,8.$$

На третьем шаге оптимизации одно АТС добавляется на маршрут № 5, а маршрут № 3 остается без изменения, но с уже добавленными двумя АТС, то есть окончательно имеем $A_3^3 = 9$; $A_5^3 = 9 + 1 = 10$. Тогда

$$\varphi_{13} = \varphi_{12} - \max \left\{ \frac{78625}{180}; \frac{73038}{180} \right\}; \quad (16)$$

$$\max = \frac{T_{об}^5 \cdot Q_5 \cdot B_5}{2A_5 \cdot (A_5 + B_5)} = \frac{141 \cdot 518 \cdot 1}{2 \cdot 9 \cdot (9 + 1)} = 405,8.$$

Целевая функция (4.16) после третьего шага оптимизации соответственно будет равна

$$\varphi_{13} = \varphi_{12} - \max = 8425,8 - 405,8 = 8020.$$

На четвертом этапе (шаге) оптимизации на маршруте № 3 добавляется еще одно АТС, а маршрут № 5 остается без изменения, то есть $A_3^4 = 10$, $A_5^4 = 9 + 1 = 10$. В этом случае

$$\varphi_{14} = \varphi_{13} - \max \left\{ \frac{78625}{180}; \frac{73038}{220} \right\}; \quad (17)$$

$$\max = \frac{T_{об}^3 \cdot Q_3 \cdot B_3}{2A_3 \cdot (A_3 + B_3)} = \frac{125 \cdot 629 \cdot 1}{2 \cdot 9 \cdot (9 + 1)} = 436,8.$$

Целевая функция (17) после четвертого этапа (шага) оптимизации равна

$$\varphi_{14} = \varphi_{13} - \max = 8020 - 436,8 = 7583,2.$$

На пятом шаге оптимизации оставшееся одно АТС добавляется на маршрут № 5, то есть $A_3^5 = 10$, $A_5^5 = 10 + 1 = 11$. Тогда

$$\varphi_{15} = \varphi_{14} - \max \left\{ \frac{78625}{220}; \frac{73038}{220} \right\}; \quad (18)$$

$$\max = \frac{T_{об}^5 \cdot Q_5 \cdot B_5}{2A_5 \cdot (A_5 + B_5)} = \frac{141 \cdot 518 \cdot 1}{2 \cdot 10 \cdot (10 + 1)} = 332.$$

Целевая функция (18) после пятого этапа оптимизации равна

$$\varphi_{15} = \varphi_{14} - \max = 7583,2 - 332 = 7251,2.$$

Сменим стратегию распределения АТС между маршрутами № 3 и № 5. С этой целью примем за основу третий этап (шаг) оптимизации, после которого

на маршруте № 3 имеем 9 АТС, а на маршруте № 5 – 10 АТС, то есть $A_3^3 = 7 + 2 = 9$; $A_5^3 = 9 + 1 = 10$. Далее оставшиеся два АТС из пяти распределим в другом порядке.

Так, на шестом этапе (шаге) оптимизации одно АТС добавим на маршрут № 5, то есть $A_3^6 = 9$, $A_5^6 = 10 + 1 = 11$. В этом случае

$$\varphi_{16} = \varphi_{13} - \max \left\{ \frac{78625}{180}; \frac{73038}{220} \right\}; \quad (19)$$

$$\max = \frac{T_{об}^5 \cdot Q_5 \cdot B_5}{2A_5 \cdot (A_5 + B_5)} = \frac{141 \cdot 518 \cdot 1}{2 \cdot 10 \cdot (10 + 1)} = 332.$$

Целевая функция (19) после шестого этапа (шага) оптимизации равна

$$\varphi_{16} = \varphi_{13} - \max = 8020 - 332 = 7688.$$

На седьмом этапе (шаге) оптимизации оставшееся одно АТС добавим опять на маршрут № 5, то есть $A_3^7 = 9$, $A_5^7 = 11 + 1 = 12$. В этом случае имеем

$$\varphi_{17} = \varphi_{16} - \max \left\{ \frac{78625}{180}; \frac{73038}{264} \right\}; \quad (20)$$

$$\max = \frac{T_{об}^5 \cdot Q_5 \cdot B_5}{2A_5 \cdot (A_5 + B_5)} = \frac{141 \cdot 518 \cdot 1}{2 \cdot 11 \cdot (11 + 1)} = 276,7.$$

Целевая функция (20) после седьмого (шага) оптимизации равна

$$\varphi_{17} = \varphi_{16} - \max = 7688 - 276,7 = 7411,3.$$

Из проделанных таким образом семи итераций следует, что минимум целевая функция φ достигает на пятом этапе ($\varphi_{15} = 7251,2$). Следовательно, в летний период времени на маршруте № 3 должно работать 10 АТС, а на маршруте № 5 – 11 АТС. Иначе говоря, на маршрут № 3 необходимо дополнительно направить 3 АТС марки НЕФА3-5300, а на маршрут № 5 – 2 АТС из пяти дополнительно выделенных на летний период времени. Подобное распределение

АТС основано на расчетах, в основе которых учитывается выросший в период летнего времени пассажиропоток отдыхающих в городе-курорте Геленджик, а так же учтено время оборота на маршруте, качество и эффективность представленных пассажирских перевозок и т. д.

Распределение дополнительных АТС для перевозки пассажиров в летний период времени повышает такие показатели эффективности, как время ожидания пассажирами прибытия пассажирского АТС, наполняемость АТС, время пребывания пассажиров в пути следования, и т.д., что является важным для городов курортных зон, в том числе и для города Геленджика.

Библиографический список

1 Белокуров, В. П. Оптимальное моделирование маршрутной сети на основе анализа параметров формирования городского пассажирского транспорта / В. П. Белокуров, С. В. Белокуров, Д. В. Лихачев // Бюллетень транспортной информации. Информационно-практический журнал. 2009. – № 10 (172). – С. 33-35.

2 Белокуров, В. П. Управление социально-экономической эффективностью / В. П. Белокуров, Д. А. Мотузка, С. В. Белокуров // Автотранспортное предприятие. 2011. – № 5. – С. 47-49.

3 ГОСТ Р 52113-2003 Услуги населению. Номенклатура показателей качества. Госстандарт России. – Введен в действие постановлением Госстандарта России 25.12.1996 г. № 701. ИПК. Издательство стандартов, 1997. – 39 с.

4 Растрингин, Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растрингин. – М. : Сов. Радио, 1980. – 232 с.

5 Белокуров, В. П. Оптимизация многоцелевых транспортных задач при использовании алгоритма анализа и отсева на итерациях поиска решений / В. П. Белокуров, С. В. Белокуров // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник РАН ВИНТИ. 2009. – № 6. – С. 2-4.

6 Белокуров, В. П. Принятие решений для эффективного управления транспортными системами на основе ситуаций выбора / В. П. Белокуров, С. В. Белокуров, С. В. Скрыль // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник РАН ВИНТИ. 2010. – № 2. – С. 6-12.

7 Гаврилов, А. А. Моделирование дорожного движения / А. А. Гаврилов. – М. : Транспорт, 1980. – 189 с.

8 Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Драйфус. – М. : Наука, 1965. – 495 с.

9 Моисеев, Н. Н. Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1975. – С. 528.

10 Ильин, В. А. Основы математического анализа / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. – М. : Наука, 1971. – 312 с.