

УДК 004.942:656.7.022.92

**Екатерина Дмитриевна Гужа**, аспирант кафедры организации и управления перевозками на транспорте, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»  
e-mail: e.guzha@ya.ru

**Владимир Алексеевич Романенко**, кандидат технических наук, доцент кафедры организации и управления перевозками на транспорте, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»  
e-mail: vla\_rom@mail.ru

**Маргарита Артушевна Скороход**, аспирант кафедры организации и управления перевозками на транспорте, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»  
e-mail: skoro-margarita@yandex.ru

### ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПИСАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО АЭРОПОРТА С УЧЕТОМ ТРАНСФЕРНЫХ ПАССАЖИРОПОТОКОВ

*Актуальность* исследуемой проблемы обусловлена стремлением авиаперевозчиков повысить экономическую эффективность путем привлечения пассажиров к перевозке с пересадкой в региональном аэропорте.

*Цель* работы заключается в оптимизации расписания регионального аэропорта, предполагающей поиск таких моментов прилетов и вылетов воздушных судов (ВС), которые бы минимизировали убытки авиакомпании из-за оттока потенциальных трансферных пассажиров при заданных ограничениях на допустимые промежутки времени прилета и вылета каждого рейса, а также численность и производительность технологических ресурсов аэропорта.

При решении задачи используются широко известные **методы** математического программирования.

Оптимизация параметров расписания регионального аэропорта с учетом трансферного пассажиропотока позволяет увеличивать загрузку рейсов, обеспечивая наиболее приемлемое время пересадки в аэропорте. При этом, наиболее значимыми остаются такие факторы, как пожелания первоначальных и конечных пассажиров, требования выполнения графика оборота своих самолетов и возможности производственных комплексов аэропорта. Рассмотрен модельный пример использования разработанного оптимизационного алгоритма, свидетельствующий о возможности повышения прибыли авиакомпании только за счет оптимизации расписания.

**Ключевые слова:** региональный аэропорт, узловой аэропорт, трансферный пассажиропоток, расписание, технологический график.

#### Общая постановка задачи оптимизации

Объектом исследования является региональный аэропорт, под которым понимается небольшой или средний аэропорт с числом принимаемых ВС не более нескольких десятков в сутки и численностью обслуживаемых в течение года пассажиров, не превышающей первых миллионов. Обычно аэропорты рассматриваемой категории не относятся к числу базовых для крупных авиакомпаний и не используются ими в качестве пересадочных пунктов для организации массовых трансферных перевозок. Тем не менее, привлечение пассажиров к перевозке с пересадкой не только в специально предназначенных для этого узловых аэропортах (хабах), но и в региональных аэропортах, является широко практикуемым авиакомпаниями способом повысить загрузку своих ВС с целью увеличения собственной прибыли. Ориентация авиакомпании не только на прямые, но и на трансферные перевозки пассажиров предполагает создание определенных условий, позволяющих привлечь к перевозке

с пересадкой в определенном региональном аэропорте пассажиров, потенциально готовых к перелету с промежуточной пересадкой. Такие условия включают, в частности, комфортное время пребывания пассажира в аэропорте трансфера – достаточное для гарантированной пересадки, но при этом исключающее неприемлемо длительное ожидание.

В узловых аэропортах залогом выполнения данного условия является использование авиакомпаниями волнового принципа формирования расписания [5, 9, 10]. Однако такой подход не приемлем для регионального аэропорта с его менее производительным оснащением. Заложённая в основу волнового принципа идея координации расписания, состоящая в определении таких моментов времени прилета и вылета самолетов, которые обеспечивали бы наиболее приемлемое с точки зрения трансферных пассажиров время пересадки, является плодотворной и для регионального аэропорта.

Следует помнить, что в случае с региональным аэропортом задача удовлетворения предпочтений

трансферных пассажиров в силу их малочисленности будет являться для авиакомпании второстепенной. В процессе формирования расписания, при определении моментов времени прилета и вылета ВС, авиакомпания, в первую очередь, должна учитывать такие факторы, как пожелания первоначальных и конечных пассажиров, требования выполнения графика оборота своих самолетов, а также возможности производственных комплексов аэропорта. Это означает, что поиск величин моментов времени прилета и вылета ВС, обеспечивающих комфортное время пребывания трансферных пассажиров в аэропорте пересадки, придется вести в пределах временных промежутков определенной, в ряде случаев, довольно малой, протяженности, заданной под влиянием названных выше факторов.

В остальном задача оптимизации расписания регионального аэропорта близка к рассмотренной в работах [2, 3] задаче оптимизации расписания хаба. Предполагается, что неприемлемое с точки зрения трансферных пассажиров время пересадки в аэропорте трансфера приводит к оттоку потенциальных пассажиров с рейсов авиакомпании, предлагающей перевозку с такой пересадкой. В результате авиакомпания теряет часть прибыли, которую ей могли бы обеспечить отказавшиеся от перевозки потенциальные трансферные пассажиры. Таким образом, задача оптимизации расписания регионального аэропорта состоит в поиске такого множества моментов прилета и вылета ВС, которое минимизирует убытки авиакомпании из-за оттока потенциальных трансферных пассажиров при заданных ограничениях на допустимые промежутки времени прилета и вылета каждого рейса и численность и производительность технологических ресурсов аэропорта. Авторам неизвестны отечественные и зарубежные работы, посвященные поставленной задаче.

### Модель процесса наземного обслуживания самолета и его загрузки

Решение задачи предполагает наличие модели процесса обслуживания самолетов, пассажиров и багажа в аэропорте, которая устанавливает связи между моментами времени прибытия и отправления самолетов, величинами продолжительности отдельных технологических операций, численности и производительности технологических ресурсов, общей численности и производительности ресурсов аэропорта. В рамках описания такой модели рассмотрим промежуток времени  $T$ , в течение которого в аэропорт прилетают, проходят обслуживание и вылетают  $K$  самолетов. Оговоренное выше отсутствие в региональном аэропорте базовой авиакомпании позволяет считать каждый прибывающий рейс обратным (оборотным) либо транзитным и предполагать, что каждый прилетевший самолет не задерживается в аэропорте на продолжительный

срок. Введем векторы  $\vec{t}^a = (t_k^a)_{K \times 1}$  и  $\vec{t}^d = (t_k^d)_{K \times 1}$  плановых (по расписанию) моментов соответственно прибытия и отправления самолетов и потребуем, чтобы выполнялись ограничения:

$$0 \leq t_k^a \leq T, \quad 0 \leq t_k^d \leq T, \quad k = 1, \dots, K \quad (1).$$

Обозначим как  $ij$  пару ВС, на первом из которых  $i$  – трансферный пассажир прилетает в аэропорт пересадки, а на втором,  $j$  – вылетает из него ( $i, j = 1, \dots, K$ ). Пусть задана матрица  $V^T = \|v_{ij}^T\|_{K \times K}$  численностей потенциальных трансферных пассажиров, то есть лиц, которые имеют потребность и возможности совершить поездку парой ВС  $ij$  по установленному тарифу. Для учета возможных отказов от перевозки тех потенциальных пассажиров, которых не устраивает длительность пребывания в аэропорте пересадки, введем величину  $w_{ij}^T$ , которая выражает число действительных пассажиров  $ij$ :

$$w_{ij}^T = v_{ij}^T k_{ij}^T, \quad i, j = 1, \dots, K \quad (2),$$

где  $k_{ij}^T$  – доля пассажиров, действительно воспользовавшихся трансферной перевозкой, от числа потенциальных пассажиров пары  $ij$ . Будем считать коэффициент  $k_{ij}^T$  зависящим от времени  $\Delta t_{ij}$  пребывания трансферного пассажира пары  $ij$  в аэропорте пересадки:

$$\Delta t_{ij}^C = t_j^d - t_i^a, \quad i, j = 1, \dots, K \quad (3).$$

Учитывая данные [6-8], зададим предпочтения пассажиров в отношении времени пребывания в хабе  $\Delta t^C$  в виде трапециевидальной функции желательности [1]  $f_T(\Delta t^C)$  с четырьмя опорными точками  $t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}, t^{(4)}$  ( $t^{(1)} \leq t^{(2)} \leq t^{(3)} \leq t^{(4)}$ ). Наиболее комфортному времени пересадки соответствует промежуток  $[t^{(2)}, t^{(3)}]$ , который устраивает всех потенциальных трансферных пассажиров и не приводит к сокращению их числа. В промежутке  $[t^{(1)}, t^{(2)}]$  число желающих совершить поездку линейно возрастает, в промежутке  $[t^{(3)}, t^{(4)}]$  – сокращается. Примем следующие значения:  $t^{(1)} = 45$  мин.,  $t^{(2)} = 75$  мин.,  $t^{(3)} = 90$  мин.,  $t^{(4)} = 360$  мин.

Для описания процессов наземного обслуживания используем модельный технологический график, содержащий операции, оказывающие наиболее существенное влияние на время наземной стоянки ВС [3]. Введем множество  $A = \{\alpha_b, b = 1, \dots, B\}$  операций и промежутков времени модельного графика наземного обслуживания ВС в составе:  $A = \{БП, БВ, ПТ, УТ, ВП, ПП, ВБ, ПБ, РНП, РТП, ВКБ, СНБ, СТБ, ТО, ЗВС, УС\}$ , где БП, БВ – буксировка ВС соответственно на место стоянки (МС) по прилету и с МС перед вылетом, ПТ, УТ – соответственно подача и уборка пассажирского трапа, ВП, ПП – соответственно высадка из ВС и посадка в ВС

пассажиры, ВБ, ПБ – соответственно выгрузка из ВС и погрузка в ВС багажа, РНП, РТП – регистрация соответственно начальных и трансферных пассажиров, ВКБ – выдача багажа конечным пассажирам, СНБ, СТБ – сортировка багажа соответственно начальных и трансферных пассажиров, ТО – техническое обслуживание (ТО) ВС, ЗВС – заправка ВС авиатопливом, УС – уборка салона и кабины ВС, ОЖ – промежуток времени ожидания, не требующий выполнения каких либо работ. Управление продолжительностью ОЖ позволит изменять время начала операций, выполняемых перед вылетом (ПБ, ПП, УТ, БВ), и тем самым управлять моментом времени вылета.

Введем множество  $\Omega = \{\omega_h, h = 1, \dots, H\}$  типов, используемых для наземного обслуживания технологических ресурсов в составе (в скобках – используемые сокращения):  $\Omega = \{\text{«место стоянки ВС» (ст.), «аэродромный тягач» (тг.) «пассажирский трап» (трап), «багажный погрузчик» (тр.), «перронный автобус» (авт.), «авиатопливозаправщик» (запр.), «средство выдачи багажа» (кар.), «место регистрации начальных пассажиров» (р.н.), «место регистрации трансферных пассажиров» (р.т.), «бригада ТО ВС» (тех.), «бригада уборки ВС» (уб.), «система обработки багажа» (обр.)}\}.$

Учитывая, что однотипные ресурсы могут использоваться для выполнения нескольких операций обслуживания одного ВС, используем наряду

с понятием «операция» понятие «задание». Задание определим как целенаправленный процесс использования одной или нескольких единиц однотипных ресурсов, не предполагающий перерывов. Свяжем множество  $\Psi = \{\psi_d, d = 1, \dots, D\}$  заданий модельного графика с множествами операций и ресурсов, определив задание как кортеж

$$\psi_d = \langle \alpha_d^H, \alpha_d^K, \omega_d^3 \rangle, \alpha_d^H, \alpha_d^K \in A \setminus OЖ, \omega_d^3 \in \Omega,$$

где  $\alpha_d^H, \alpha_d^K$  – соответственно начальная и конечная операция  $d$ -го задания,  $\omega_d^3$  – тип ресурсов, используемых при обработке задания. Обозначим моменты времени начала  $t_k^{H\alpha}$  и окончания  $t_k^{K\alpha}$  некоторой операции  $\alpha \in A$ , определим моменты времени начала  $\theta_k^{Hd}$  и окончания  $\theta_k^{Kd}$  обработки  $d$ -го задания как:

$$\theta_k^{Hd} = t_k^{H\alpha_d^H}, \theta_k^{Kd} = t_k^{K\alpha_d^K}, d = 1, \dots, D, k = 1, \dots, K$$

Модельный график в форме диаграммы Ганта отражен на рисунке 1, где операции и промежутки времени обозначены сплошными линиями с приводимыми над линиями аббревиатурами их названий, штрихпунктирной линией отмечены задания, охватывающие несколько операций. Задания с совпадающими начальной и конечной операциям отдельно не обозначены. Тип соответствующих заданиям ресурсов указан ниже линии.

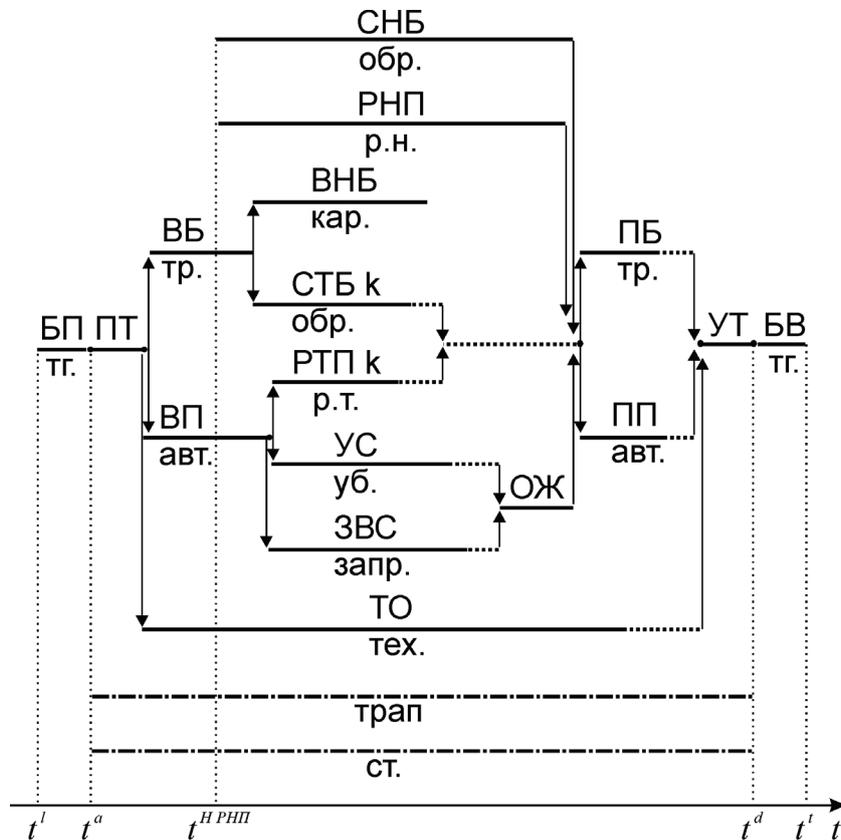


Рисунок 1. Модельный график наземного обслуживания

Модельный график построен при следующих предположениях:

1) операции ПП и ПБ графика  $k$ -го ВС могут начаться только в случае готовности к ним трансферных пассажиров, пересеживающихся на  $k$ -е с ВС, на которых такие пассажиры присутствуют;

2) момент  $t_k^{H,PHI}$  начала выполнения операций по обслуживанию начальных пассажиров и багажа (СНБ, РНП)  $k$ -го ВС определяется так, чтобы эти операции завершились к моменту начала операций ПП и ПБ;

3) сортировка багажа (СНБ, СТБ) должна производиться в те же сроки, что и обслуживание пассажиров (РНП, РТП);

4) начальным событием графика  $k$ -го ВС является начало буксировки ВС в момент  $t_k^I$  после посадки, конечным – окончание буксировки в момент  $t_k^I$  перед взлетом.

Для формирования расчетной модели процесса наземного обслуживания на базе модельного графика введены следующие предположения:

1) аэропорт оснащен единственным экземпляром ресурса типа «обр.»;

2) ресурсы, образующие множество  $\Omega' = \Omega \setminus \{\text{«обр.»}\}$ , обладают производительностью одинаковой для всех единиц ресурса одного типа;

3) численность выделяемых для отработки задания единиц ресурсов, типы которых образуют множество  $\Omega'' = \Omega \setminus \{\text{«обр.»}, \text{«р.т.»}\}$ , устанавливается технологической документацией. Для всех ВС введены векторы  $\vec{n}^d = (n_k^d)_{K \times 1}$  величин численности ресурсов типа  $\omega_d^3 \in \Omega''$ , установленных для отработки задания  $\psi d$  по обслуживанию  $k$ -го ВС, которые объединены в множество  $N'' = \{\vec{n}^d : \omega_d^3 \in \Omega'', d = 1, \dots, D\}$ . Значения приняты заданными.

4) численности  $n_k^{p.m.}$  единиц ресурсов типа «р.т.», выделяемых для отработки задания ⟨РТП, РТП, «р.т.⟩  $k$ -го ВС, зависят от суммарной численности трансферных пассажиров, прибывших  $k$ -м ВС, и заданной производительности  $w^{1T}$  единицы ресурсов типа «р.т.»;

5) продолжительность  $\tau_k^{p.m.}$  операции РТП зависит от суммарной численности трансферных пассажиров, прибывших  $k$ -м ВС, числа  $n_k^{p.m.}$  выделяемых для отработки задания ⟨РТП, РТП, «р.т.⟩ единиц ресурсов и средней продолжительности  $\tau^{1T}$  регистрации одного пассажира;

6) продолжительность  $\tau_k^{CTB}$  операции СТБ определяется исходя из необходимости синхронного завершения операций СТБ и РТП и наличия технических ограничений на время пребывания места багажа в системе «обр.», которое не может быть ниже заданного  $\tau_{min}$ ;

7) продолжительность операций, образующих множество  $A' = A \setminus \{OЖ, РТП, СТБ, СНБ\}$ , устанавливается технологической документацией. Введено множество  $T' = \{\vec{\tau}^b : \alpha_b \in A', b = 1, \dots, B\}$ ,

где  $\vec{\tau}^b = (\tau_1^b, \tau_2^b, \dots, \tau_K^b)$  – вектор величин продолжительности операции  $\alpha_b \in A$  графиков всех ВС. Значения элементов векторов продолжительностей операций, образующих множество  $A'$ , приняты заданными;

8) интенсивность потока багажа пассажиров  $k$ -го ( $k = 1, \dots, K$ ) ВС, поступающего в систему «обр.», постоянна в течение времени  $\tau_k^{CHB}$  и зависит, помимо  $\tau_k^{CHB}$ , от числа  $w_k^H$  начальных пассажиров  $k$ -го ВС и среднего числа  $k^B$  мест зарегистрированного багажа одного пассажира;

9) интенсивность потока багажа трансферных пассажиров, прибывших  $k$ -м ( $k = 1, \dots, K$ ) ВС, поступающего в систему «обр.», постоянна в течение времени  $\tau_k^{CTB}$  и зависит от суммарной численности трансферных пассажиров, прибывших  $k$ -м ВС, а также  $\tau_k^{CTB}$  и  $k^B$ .

Введенных предположений достаточно для того, чтобы на базе модельного графика сформировать расчетную модель наземного обслуживания, включающую ряд алгебраических выражений, которая может быть представлена в виде оператора  $F$ :

$$(\vec{t}^d, M', g_{обр.}) = F(\vec{t}^a, V^T, \vec{w}^H, k^B, T', \tau^{1T}, N'', w^{1T}, \vec{\tau}^{OЖ}, \tau_{min}), \quad (4)$$

где  $\vec{w}^H = (w_k^H)_{K \times 1}$ ,  $\vec{\tau}^{OЖ} = (\tau_k^{OЖ})_{K \times 1}$  – векторы соответственно численности начальных пассажиров и продолжительности промежутков  $OЖ$ ,  $M' = \{m_h : \omega_h \in \Omega', h = 1, \dots, H\}$  – множество величин  $m_h$  численности ресурсов  $h$ -го ( $\omega_h \in \Omega'$ ) типа, необходимой в хабе для обслуживания всех  $K$  ВС,  $g_{обр.}$  – необходимая производительность системы «обр.». Число  $m_h$  определяется как максимальное в промежутке  $0 \leq t \leq T$  общее задействованное число ресурсов рассматриваемого типа, рассчитываемое суммированием по всем заданиям всех ВС, предполагающим использование этих ресурсов. Величина  $g_{обр.}$  находится, как максимальная в промежутке  $0 \leq t \leq T$  суммарная интенсивность потоков багажа, поступающих в систему «обр.».

Уточненная постановка задачи

Будем считать, что перевозка одного трансферного пассажира парой ВС  $ij$  приносит авиакомпании прибыль  $c_{ij}^T$ . С учетом (2) и (3) суммарная прибыль  $C$  от перевозки всех трансферных пассажиров определяется как:

$$C = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K [v_{ij}^T k^T (t_j^d - t_i^a)] c_{ij}^T \quad (5)$$

В качестве критерия задачи оптимизации расписания выступает максимум  $C$ , которому соответствуют оптимальные значения элементов векторов  $\vec{t}^a$  и  $\vec{t}^d$ . Согласно (4) вектор  $\vec{t}^d$  зависит от вектора

$\bar{\tau}^{ож}$ , поэтому с точки зрения упрощения алгоритма представляется целесообразным использовать в качестве оптимизируемых параметров элементы  $\bar{\tau}^{ож}$  вместо  $\bar{\tau}^d$ . Учитываются следующие ограничения:

- 1) на продолжительность промежутка времени формирования расписания (1), который не должен длиться более  $T$ ;
- 2) на сроки прибытия и отправления ВС:

$$t_k^{aL} \leq t_k^a \leq t_k^{aR}, t_k^{dL} \leq t_k^d \leq t_k^{dR}, k=1, \dots, K \quad (6),$$

где  $t_k^{aL}, t_k^{aR}$  – соответственно наиболее ранний и наиболее поздний сроки прибытия  $k$ -го ВС, установленные с учетом пожеланий пассажиров, необходимости выдерживания графика оборота ВС и иных потребностей авиакомпании;  $t_k^{dL}, t_k^{dR}$  – соответственно наиболее ранний и наиболее поздний сроки отправления  $k$ -го ВС, установленные из аналогичных соображений.

- 3) на необходимую численность ресурсов, которая не должна быть больше той, которой располагает аэропорт:

$$m_h \leq m_h^p, m_h \in M', m_h^p \in M'^p, h \in \{1, \dots, H\}; \omega_h \in \Omega' \quad (7),$$

где  $M'^p = \{m_h^p : \omega_h \in \Omega', h=1, \dots, H\}$  – множество величин располагаемой аэропортом численности

$m_h^p$  ресурсов, типы которых образуют множество  $\Omega'$ ;

- 4) на необходимую производительность ресурсов типа обр., которая не должна быть больше производительности  $g_{обр.}^p$  установленной в аэропорте системы обр.:

$$g_{обр.} \leq g_{обр.}^p \quad (8).$$

Рассматриваемая задача оптимизации состоит в определении таких  $\bar{\tau}^a$  и  $\bar{\tau}^{ож}$ , которые при заданных  $V^T, \bar{w}^H, k^B, T, t^{IT}, N'', w^{IT}, t_{min}, M^P, g_{обр.}^p$  обеспечивают максимум целевой функции (5) и удовлетворяют ограничениям (1), (6)-(8). Для решения задачи применимы известные методы математического программирования [4].

#### Модельный пример решения задачи оптимизации

Пусть в аэропорт в течение  $T = 330$  мин. должны прилететь, пройти обслуживание и вылететь 10 ВС. Предполагается, что ВС с порядковыми номерами  $k = 8, \dots, 10$  характеризуются большей пассажироместимостью. Значения начального  $w_j^H$  и потенциального трансферного  $v_{ij}^T$  пассажиропотоков, а также величины прибыли  $c_{ij}^T$  в условных единицах приведены в таблице 1. Прочим исходным параметрам заданы следующие значения:  $k^B = 1.0, t^{IT} = 1$  мин.,  $w^{IT} = 50, t_{min} = 5$  мин.,  $\Delta t^{min} = 1$  мин.

Таблица 1. Характеристики авиалиний

| $i \backslash j$                                      | 1       | 2       | 3       | 4       | 5      | 6       | 7       | 8      | 9       | 10      |
|---|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| $v_{ij}^T, \text{ пас.} / c_{ij}^T, \text{ усл. ед.}$ |         |         |         |         |        |         |         |        |         |         |
| 1   | 16/21,0 | –       | –       | –       | –      | 4/14,2  | –       | –      | –       | –       |
| 2   | –       | –       | –       | –       | 6/13,8 | –       | 18/13,9 | –      | 1/13,8  | 3/13,7  |
| 3   | –       | –       | 26/18,4 | 9/16,4  | –      | –       | –       | 2/24,8 | –       | –       |
| 4   | –       | –       | –       | 18/12,2 | –      | –       | –       | –      | 16/21,2 | 19/21,5 |
| 5   | –       | –       | 48/17,6 | –       | –      | –       | –       | 6/24,0 | –       | –       |
| 6   | –       | 11/13,8 | –       | –       | –      | 21/13,8 | 5/13,7  | –      | 19/13,9 | –       |
| 7   | –       | –       | –       | 53/15,6 | –      | –       | –       | –      | –       | –       |
| 8   | –       | 24/12,8 | –       | –       | 3/12,7 | 10/12,8 | 1/12,9  | –      | –       | 82/12,8 |
| 9   | –       | 1/21,2  | –       | –       | –      | –       | 11/21,2 | –      | 3/21,2  | –       |
| 10  | –       | 35/14,8 | –       | –       | –      | –       | 45/14,8 | 4/14,2 | 35/14,8 | –       |
| $w_j^H, \text{ пас.}$                                 |         |         |         |         |        |         |         |        |         |         |
| –   | 65      | 10      | 7       | 1       | 72     | 46      | 1       | 124    | 62      | 32      |

Установленная для отработки заданий численность ресурсов, типы которых образуют множество  $\Omega^n$ , принята равной единице. Исключение составляет численность ресурсов «трап», «тр.», «авт.», «р.н.», выделяемых для обслуживания ВС с  $k = 8, \dots, 10$ , равная двум единицам. Располагаемая аэропортом численность ресурсов типов (множество  $\Omega^n$ ) принята по типам следующей: «тех.»,

«р.т.» – 5 единиц, «тг.», «авт.», «тр.» – 6 единиц, «запр.» – 3 единицы, «кар.» – 3 единицы, «уб.» – 2 единицы, «трап.» – 12 единиц, «ст.» – 10 единиц, «р.н.» – 11 единиц. Располагаемая пропускная способность системы «обр.»  $g_{обр.}^p = 1000$  1/ч. Продолжительности технологических операций  $\alpha \in \dot{A}'$  для «меньших» и «больших» ВС сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Продолжительность технологических операций

| $k \backslash \alpha$ | БП, БВ | ПТ, УТ | ВП | ПП | ВБ | ПБ | РНП | ВКБ | ТО | ЗВС | УС |
|-----------------------|--------|--------|----|----|----|----|-----|-----|----|-----|----|
| 1, ..., 7             | 7      | 2      | 12 | 16 | 13 | 18 | 50  | 15  | 55 | 30  | 17 |
| 8, ..., 10            | 8      | 3      | 17 | 21 | 16 | 21 | 50  | 20  | 64 | 35  | 22 |

Полученное в результате решения оптимизационной задачи координированное расписание представлено на рисунке 2 в виде диаграммы, на которой точками отмечены оптимальные моменты времени прибытия и отправления рейсов, тонкими линиями отображены предпочтительные для авиаперевозчика заданные промежутки времени прибытия (сплошная линия) и отправления (штриховая линия), а жирными сплошными линиями – промежутки времени стоянки на МС самолетов, выполняющих рейсы.

Полученная в результате оптимизации расписания величина суммарной прибыли от перевозки трансферных пассажиров, составившая  $S^{opt} = 7990$  усл. ед., оказалась всего на 7% ниже максимальной прибыли, достижимой лишь умозрительно в случае перевозки всех потенциальных трансферных пассажиров. Для оценки эффекта от

оптимизации был произведен расчёт величины  $S$  для исходных данных, имитирующих не координированное расписание. Предполагалось, что моменты прибытия и отправления перечисленных выше рейсов совпадают с начальными моментами предпочтительных промежутков их времени прибытия и отправления соответственно. В этом случае, значение целевой функции оказалось на 25% ниже оптимального. Таким образом, авиаперевозчики имеют возможность заметно повысить прибыль от трансферных перевозок только за счет оптимизации расписания, без каких бы то ни было финансовых затрат. Полученные результаты подтверждают правомерность постановки и работоспособность предложенного алгоритма решения задачи оптимизации параметров расписания регионального аэропорта с учетом трансферных пассажировопотоков.

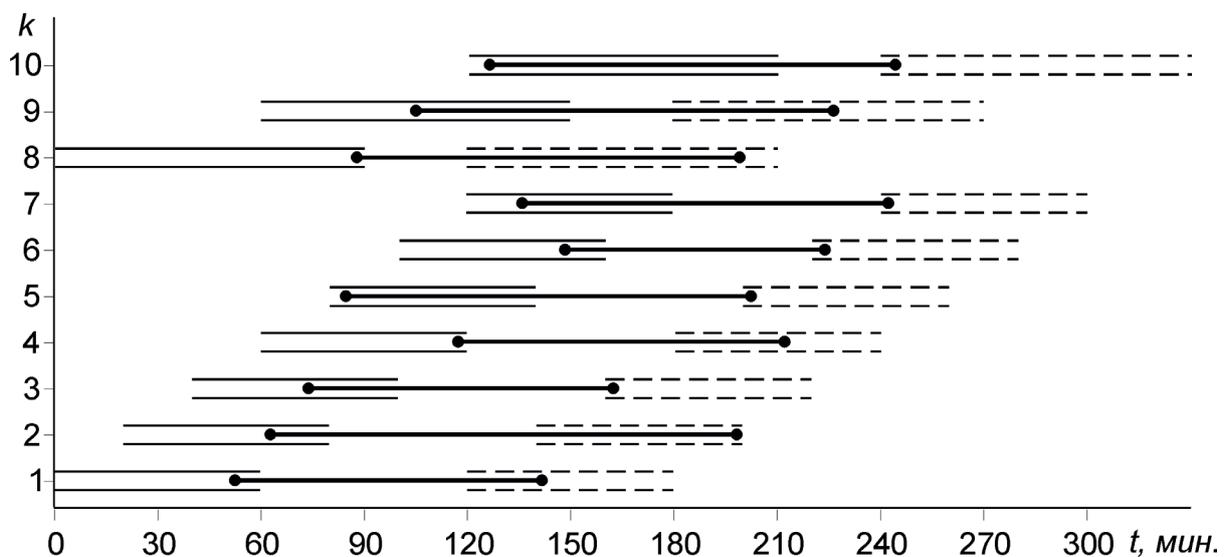


Рисунок 2. Результаты оптимизации

*Литература*

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 279 с.
2. Гужа, Е.Д. Комплексная оптимизация системы перевозок на базе узлового аэропорта / Е.Д. Гужа, М.А. Скороход // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 1. – С. 49-53.
3. Гужа, Е.Д. Оптимизация расписания узлового аэропорта с учетом численности и производительности его ресурсов / Е.Д. Гужа, В.А. Романенко // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – № 2. – С. 80-85.
4. Таха, Х. А. Введение в исследование операций / Х.А. Таха. – Москва: Издательский дом Вильямс, 2007. – 912 с.
5. Bootsma, P.D. Airline Flight Schedule Development – analysis and design tools for European hinterland hubs / P.D. Bootsma. – Enschede: Universiteit Twente, 1997. – 296 p.
6. Burghouwt, G. Connectivity in Air Transport Networks: An Assessment of Models and Applications / G. Burghouwt, R. Redondi // Journal of Transport Economics and Policy. – 2013. – Vol. 47 (1). – pp. 35-53.
7. Burghouwt, G. The Temporal Configuration of Airline Networks in Europe / G. Burghouwt, J. Wit // Journal of Air Transport Management. – 2005. – Vol. 11 (3). – pp. 185-198.
8. Danesi, A. Measuring airline hub timetable coordination and connectivity: definition of a new index and application to a sample of European hubs / A. Danesi // European Transport. – 2006. – Vol. 34. – pp. 54-74.
9. Dennis, N. Airline Hub Operations in Europe / N. Dennis // Journal of Transport Geography. – 1994. – Vol. 2. – pp. 219-233.
10. Dennis, N. Scheduling Strategies for Airline Hub Operations / N. Dennis // Journal of Air Transport Management. – 1994. – Vol. 1 (2). – pp. 131-144.