

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ПОСАДКУ¹

Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев, Н.А. Егоров

Аннотация. Рассмотрена задача оптимизации последовательности приземления воздушных судов. Представлены формальная постановка задачи формирования оптимальной очереди воздушных судов на посадку, основные ограничения и целевые функции. С целью получения решения в режиме реального времени проиллюстрированы способы оптимизации исходной последовательности и предложен эвристический алгоритм приближенного решения задачи. В качестве исходной последовательности для работы алгоритма выбрана последовательность, при которой воздушные суда приземляются в порядке прибытия. В процессе применения алгоритма исходное решение, соответствующее исходной последовательности, не может быть ухудшено. Проведены вычислительные эксперименты с целью исследования эффективности предложенного алгоритма. Сравнены времена счета и качество исходного решения, эвристического решения, полученного при помощи предлагаемого эвристического алгоритма, и оптимального решения, полученного при помощи стандартного пакета CPLEX. Отмечено, что для задачи большой размерности (при большом числе воздушных судов) оптимальное решение получить не удается, поэтому эвристическое решение сравнивалось с исходным. Тесты для интенсивных потоков воздушных судов генерировались случайным образом. Предложенный алгоритм позволил за приемлемое время получать решения задачи либо оптимальные (30–52% случаев), либо значительно улучшающие исходное решение.

Ключевые слова: последовательности воздушных судов, целевая функция, оптимальное решение, эвристический алгоритм, вычислительный эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных научно-практических проблем заключается в автоматизации управления потоками воздушного движения в целях обеспечения безопасного, упорядоченного и ускоренного воздушного движения, уменьшения издержек авиакомпаний и пассажиров, уменьшения негативного влияния на окружающую среду. Анализ мирового и отечественного опыта показывает, что построение оптимальных очередей воздушных судов (ВС) при маневрировании в зоне аэропорта в целях повышения эффективности использования взлетно-посадочных полос — одна из важных задач при пла-

нировании и регулировании потоков воздушного движения [1, 2].

Задача формирования оптимальных очередей ВС на посадку ставится как задача линейной или квадратичной оптимизации (в зависимости от выбранной целевой функции) с использованием $\sim P^2$ целочисленных переменных для учета необходимых ограничений на минимальное время разделения между ВС, где P — число ВС [1]. В этой связи применение стандартных методов оптимизации приводит к экспоненциальному росту времени счета с ростом P . Поэтому для решения задачи в режиме реального времени, когда решение необходимо постоянно и очень быстро, в течение нескольких секунд, пересчитывать, становится неизбежным применение эвристических алгоритмов для сокращения перебора с учетом знаний об особенностях данной задачи [3].

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00822а) и программы I30 Президиума РАН.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемая постановка задачи формирования оптимальной очереди ВС на посадку представляет собой модификацию классической постановки [4].

Обозначения:

P — число ВС, ожидающих посадку;

E_i — самое раннее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$;

L_i — самое позднее возможное время приземления i -го ВС;

T_i — оптимальное время прибытия i -го ВС;

C_i — категория турбулентности i -го ВС;

$S_{c_i c_j}$ — минимальный интервал между посадкой

ВС категории турбулентности c_j после ВС категории турбулентности c_p , $i, j = \overline{1, P}$, $i \neq j$.

Для примера рассмотрим ВС трех категорий турбулентности: легкие, средние и тяжелые; в табл. 1 представлен пример матрицы $S_{c_i c_j}$.

Переменные:

x_i — время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$;

$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ВС } i \text{ приземляется раньше ВС } j, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$

$i, j = \overline{1, P}$, $i \neq j$.

Ограничения:

1) приземление ВС с номером i должно происходить внутри временного окна $[E_i, L_i]$:

$$E_i \leq x_i \leq L_i, \quad i = \overline{1, P}.$$

2) либо ВС i приземляется раньше ВС j ($\delta_{ij} = 1$), либо ВС j приземляется раньше ВС i ($\delta_{ji} = 1$):

$$\delta_{ij} + \delta_{ji} = 1, \quad i, j = \overline{1, P}.$$

3) ограничения по соблюдению необходимых интервалов между ВС можно представить в виде:

$$x_j \geq x_i + S_{c_i c_j} \delta_{ij} - (L_i - E_j) \delta_{ji}, \quad i, j = \overline{1, P}, \quad i \neq j.$$

Таблица 1

Минимальное время между приземлениями, с

Ведомый	Ведущий		
	Легкий	Средний	Тяжелый
Легкий	60	120	180
Средний	60	120	120
Тяжелый	60	120	120

4) для учета интересов пассажиров, авиакомпаний и др. иногда дополнительно вводится ограничение — максимальный сдвиг p : ВС не может сдвигаться дальше, чем на p позиций от его начальной позиции в FCFS-последовательности.

Назовем исходной или FCFS-последовательностью (First-Come, First-Served) такую последовательность ВС, при которой ВС упорядочены в соответствии с оптимальными временами посадок T_i . Если ВС занумерованы в соответствии FCFS-последовательностью, при упорядочении в соответствии с временем посадки x_i получается новая последовательность $Y = \{y_i, i = \overline{1, P}\}$, где y_i — номер ВС. Эту последовательность будем называть оптимальной последовательностью ВС на посадку.

Тогда ограничение представляется в виде:

$$\text{abs}(y_i - i) \leq p, \quad i = \overline{1, P}.$$

Целевые функции:

— кусочно-линейная целевая функция — минимизация суммы модулей отклонений от оптимальных времен посадок:

$$\min_X \sum_{i=1}^P |(T_i - x_i)|,$$

где $X = \{x_i, i = \overline{1, P}\}$;

— нелинейная целевая функция — минимизация суммы квадратов отклонений от оптимальных времен посадок:

$$\min_X \sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2.$$

2. ОПТИМИЗАЦИЯ ОЧЕРЕДЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ПОСАДКУ

Общие требования к алгоритмам оптимизации очередей ВС:

— возможность реализации в режиме реального времени;

— возможность работы с большим потоком ВС;

— учет требований по безопасности и технической реализуемости;

— учет ограничений и внешних факторов.

Время решения задачи с помощью программного пакета CPLEX варьируется от нескольких секунд до многих часов.

Для практического применения в режиме реального времени, когда некоторые ВС приземляются и в зоне аэропорта появляются новые ВС, решение нужно часто, каждые несколько минут, пересчитывать. Для этого разработан эвристический алгоритм приближенного решения поставленной

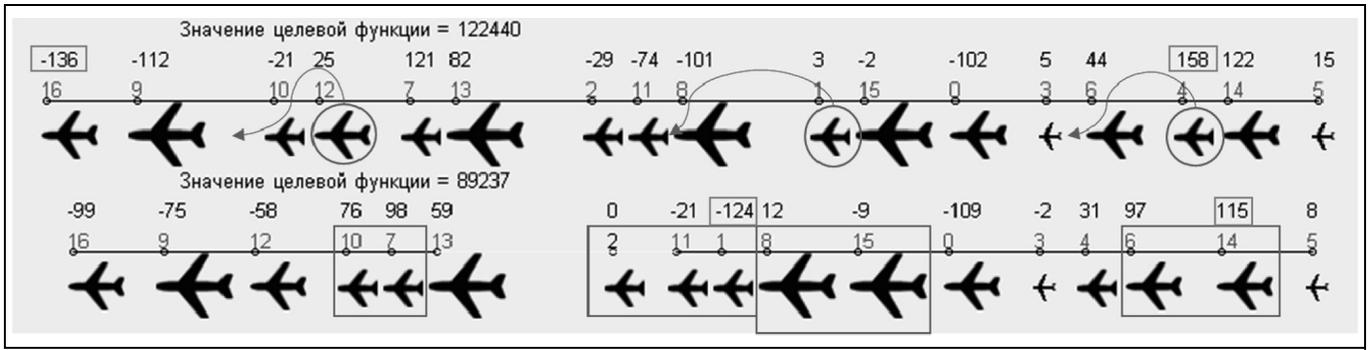


Рис. 1. Пример 1

задачи. Он не всегда приводит к оптимальному решению, но позволяет получить хорошее решение за приемлемое время.

Для оценки эффективности предлагаемого алгоритма используются точные решения, которые могут быть получены, но не применимы на практике в режиме реального времени из-за большого времени счета.

Задача формирования оптимальных очередей ВС на посадку разбивается на две подзадачи. Первая из них заключается в определении фиксированной последовательности ВС на посадку $Y = \{y_i, i = \overline{1, P}\}$, y_i — номер ВС в последовательности FCFS, занимающего i -ю позицию в последовательности Y . Вторая подзадача заключается в назначении при фиксированной последовательности Y каждому ВС времени посадки $X^* = \{x_i^* = x^*[y_i], i = \overline{1, P}\}$ таким образом, чтобы минимизировать заданную целевую функцию $X^* = \min_X F(X)$ [5].

Для каждого ВС при подлете к аэропорту известно оптимальное время посадки $T_i, i = \overline{1, P}$ — это время приземления при отсутствии других ВС. Важными величинами, как правило, влияющими на значение $F(X)$, являются размеры отклонения назначаемых времен приземлений x_i от оптимальных $d_i = x_i - T_i, i = \overline{1, P}$. Поэтому последовательность, в которой ВС упорядочены в соответствии с оптимальными временами T_i , служит в качестве исходной последовательности. Однако перестановки ВС в этой последовательности могут существенно изменить значение целевой функции, поскольку если поменять местами ВС разной категории турбулентности, то минимальные времена разделения между ними могут измениться, соответственно изменятся времена посадок этих и, возможно, последующих ВС.

Поскольку при фиксированной последовательности ВС минимальные времена разделения меж-

ду посадками ВС определены, задача о назначении времен посадок не требует использования целочисленных переменных и поэтому может быть эффективно решена с помощью стандартных пакетов линейного/квадратичного программирования. Полученное оптимальное значение целевой функции для данной фиксированной последовательности ВС позволяет в дальнейшем сравнивать ее с другими последовательностями и выбирать лучшую из них.

Предлагаемый эвристический алгоритм основан на последовательности шагов по перестановке близко стоящих в FCFS-последовательности ВС разных категорий турбулентности, если в результате такой перестановки никакие из ограничений не нарушаются и значение целевой функции уменьшается. Таким образом, предлагаемый алгоритм приводит к построению последовательности, которая не может быть хуже FCFS-последовательности.

На рис. 1 и 2 представлены примеры перестановок ВС в последовательности посадок, при которых уменьшается значение целевой функции $\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$. Рассматриваются три категории турбулентности ВС, минимальные времена между приземлениями соответствуют табл. 1.

На рис. 1 и 2 отображены две временные оси с информацией о последовательности приземлений: кружками обозначены времена посадок, над кружками указаны номера ВС от 0 до 17. Над номером отображается значение $x_i - T_i$:

$$\begin{cases} x_i - T_i > 0 & \text{— назначенное время} \\ & \text{позже оптимального;} \\ x_i - T_i < 0 & \text{— назначенное время} \\ & \text{раньше оптимального;} \\ x_i = T_i & \text{— назначенное время приземления} \\ & \text{совпадает с оптимальным.} \end{cases}$$

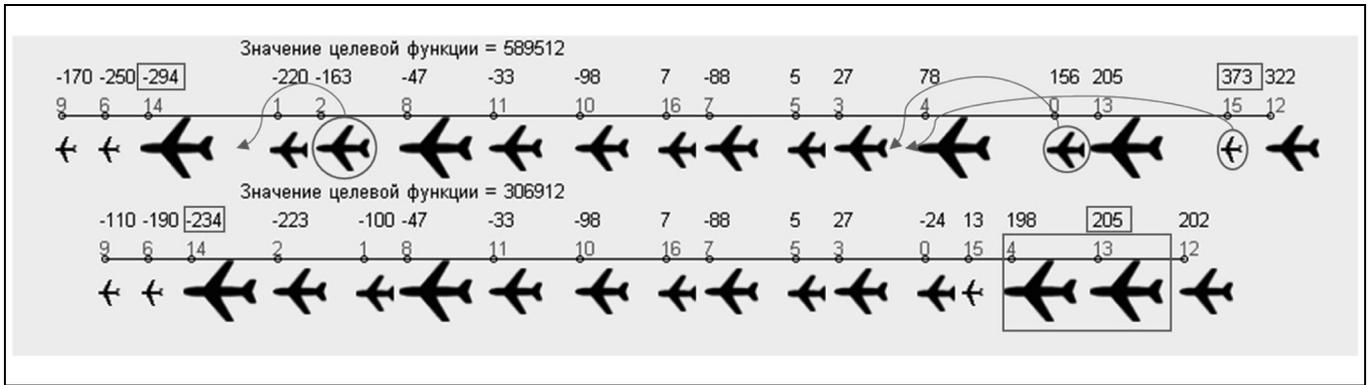


Рис. 2. Пример 2

Строкой выше представлено значение целевой функции.

Первая временная ось соответствует последовательности приземлений, при которой ВС упорядочены в соответствии с оптимальными временами посадок T_i FCFS-последовательности, вторая временная ось соответствует последовательности приземлений после некоторых, показанных на рис. 1 и 2, перестановок ВС.

На рис. 1:

$$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 122\,440 \text{ для FCFS-последовательности;}$$

ности;

$$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 89\,237 \text{ для измененной последовательности.}$$

На рис. 2:

$$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 589\,512 \text{ для FCFS-последовательности;}$$

ности;

$$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 306\,912 \text{ для измененной последовательности.}$$

довательности.

3. АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В алгоритме определяется оптимальное решение X для фиксированной последовательности ВС при помощи стандартного пакета оптимизации CPLEX.

Шаг 1. Рассмотреть в качестве исходной последовательности ВС FCFS-последовательность. Получить оптимальное решение и значение целевой функции для FCFS-последовательности F_1 . Если

оптимального решения не найдено, то завершить работу алгоритма.

Шаг 2. Присвоить $i = P$.

Шаг 3. Если $i > 0$, присвоить $i = i - 1$, в противном случае перейти к шагу 7. Присвоить $j = 1$.

Шаг 4. Если $C_{y_j} \neq C_{y_{j+1}}$, перейти к шагу 5, в противном случае перейти к шагу 6.

Шаг 5. В текущей последовательности $\{y_1, \dots, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ поменять местами y_j и y_{j+1} и получить точное решение для новой последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_j, \dots, y_p\}$. Если точное решение существует и значение целевой функции F_2 для него таково, что $F_2 < F_1$, то последовательность $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_j, \dots, y_p\}$ сделать текущей и присвоить $F_1 = F_2$. В противном случае оставить текущую последовательность и значение F_1 без изменений.

Шаг 6. Если $j < P$, присвоить $j = j + 1$ и перейти к шагу 4, в противном случае перейти к шагу 3.

Шаг 7. Присвоить $i = P - 1$.

Шаг 8. Если $i > 0$, присвоить $i = i - 1$, в противном случае завершить работу алгоритма. Присвоить $j = 1$.

Шаг 9. Если $C_{y_j} \neq C_{y_{j+1}} \ \& \ C_{y_j} \neq C_{y_{j+2}} \ \& \ C_{y_{j+1}} \neq C_{y_{j+2}}$, перейти к шагу 10, в противном случае перейти к шагу 11.

Шаг 10. Из текущей последовательности $\{y_1, \dots, y_j, y_{j+1}, y_{j+2}, \dots, y_p\}$ получить две последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+2}, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ и $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_{j+2}, y_j, \dots, y_p\}$. Найти точные решения для новых последовательностей. Если точное решение последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+2}, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ существует и значение целевой функции F_2 для него таково, что $F_2 < F_1$, то последовательность $\{y_1, \dots, y_{j+2}, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ сделать текущей и присвоить



$F_1 = F_2$. В противном случае оставить текущую последовательность и значение F_1 без изменений. Если точное решение последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_{j+2}, y_j, \dots, y_p\}$ существует и значение целевой функции для него F_3 таково, что $F_3 < F_1$, то последовательность $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_{j+2}, y_j, \dots, y_p\}$ сделать текущей и присвоить $F_1 = F_3$. В противном случае оставить текущую последовательность и значение F_1 без изменений.

Шаг 11. Если $j < P - 1$, присвоить $j = j + 1$ и перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 8.

Замечание. Если для FCFS-последовательности не существует решения, при котором выполняются заданные ограничения, это не всегда означает, что задача не имеет решения, но предлагаемый алгоритм в этом случае нужно скорректировать, поскольку процедура поиска оптимального решения даст отрицательный ответ. В этом случае для оценки последовательности ВС можно ввести следующую процедуру назначения времен посадок X .

Для ВС с номером y_1 назначить $x_1 = E_{y_1}$; для следующих ВС последовательно назначить

$$x_i = \min(L_{y_i}, \max(E_{y_i}, x_{i-1} + S_{c_i c_{i-1}})), \quad i = \overline{2, P}.$$

На основе полученных значений x_i рассчитывается значение целевой функции $F(X)$.

Поскольку при такой процедуре назначения времен посадок будут выполнены ограничения 1 и 2, но ограничения 3 — по соблюдению необходимых интервалов между ВС — могут не выполняться, то кроме целевой функции рассчитывается значение величины нарушения по формуле:

$$W(X) = \sum_{i=1}^P \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, x_j > x_i}}^P \max(0, S_{c_i c_{i-1}} - (x_j - x_i)).$$

Эта величина $W(X) = 0$, если ограничения по соблюдению необходимых интервалов между ВС выполнены, в противном случае $W(X) > 0$.

Последовательности Y_1 и Y_2 , с соответствующими векторами времен посадок X_1 и X_2 , сравниваются таким образом:

- если $W(X_1) < W(X_2)$, то последовательность Y_1 лучше последовательности Y_2 ;
- если $W(X_1) = 0$ & $W(X_2) = 0$ & $F(X_1) < F(X_2)$, то последовательность Y_1 лучше последовательности Y_2 .

При применении алгоритма с предложенной процедурой сравнения последовательностей на некотором шаге может быть получено решение с нулевой величиной нарушения $W(X) = 0$, это решение может быть исходным для применения исходного алгоритма.

Предложенная процедура не гарантирует получение решения, поскольку решения без нарушения ограничений может вообще не существовать.

4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для оценки качества предлагаемого алгоритма проводились вычислительные эксперименты.

Эффективность решения задачи зависит от интенсивности потока ВС. Для оценки интенсивности потока ВС введем следующие определения.

Определение 1. Если для FCFS-последовательности не существует решения, при котором выполняются заданные ограничения, то будем называть поток сверхинтенсивным. ♦

Как было отмечено выше, для сверхинтенсивного потока ВС решения задачи может не существовать.

Определение 2. Если для FCFS-последовательности Y существует оптимальное решение X и $\exists i \in \overline{1, P-1} : x[y_{i+1}] - x[y_i] > S_{c_{i+1}, c_i}$, то будем называть поток слабоинтенсивным. ♦

Очевидно, в этом случае вместо последовательности $Y = \{y_1, \dots, y_p\}$ целесообразно решать задачу для двух последовательностей меньшей длины: $\{y_1, \dots, y_j\}$ и $\{y_{j+1}, \dots, y_p\}$.

Определение 3. Если для FCFS-последовательности Y существует оптимальное решение X и выполняется условие $x[y_{i+1}] - x[y_i] = S_{c_{i+1}, c_i}$, $\forall i \in \overline{1, P-1}$, то будем называть поток интенсивным. ♦

Эксперименты проводились для интенсивных потоков ВС.

Тесты генерировались случайным образом. Для каждого ВС генерировались величины:

$E_i = \text{rnd.Next}(t)$ — самое раннее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$, $\text{rnd.Next}(t)$ — случайное число в диапазоне $\overline{0, t}$; $t = 600$ с;

$L_i = E_i + \text{Time} + \text{rnd.Next}(t)$ — самое позднее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$, временное окно посадки имеет длину $\text{Time} + \text{rnd.Next}(t)$, параметр Time зависит от числа ВС P : $\text{Time} = (P - 1)120$ с $- t$ с;

$T_i = \text{rnd.Next}(E_i + \Delta t, L_i - \Delta t)$ — оптимальное время прибытия i -го ВС — случайное число в диапазоне $(\overline{E_i + \Delta t}, \overline{L_i - \Delta t})$, где $\Delta t = 200$ с, $i = \overline{1, P}$;

$C_i = \text{rnd.Next}(3)$ — категория турбулентности i -го ВС, $i = \overline{1, P}$.

Минимальные временные интервалы между приземлениями ВС разных категорий турбулентности определяются в соответствии с табл. 1.

Для сгенерированного теста с помощью пакета CPLEX ищется оптимальное решение для FCFS-последовательности. Тесты, не удовлетворяющие определению интенсивных, не рассматриваются.

Эксперимент 1 предназначался для сравнения времени счета и качества решения, полученного с помощью эвристического алгоритма и точного решения, полученного с помощью стандартного пакета CPLEX.

Приведем результаты эксперимента для последовательности из 17-ти ВС. Время счета по предлагаемому алгоритму не превышало 1 с, на том же компьютере время расчета оптимального решения с помощью пакета CPLEX варьировалось от нескольких секунд до 7 ч 40 мин.

Эксперимент проводился с двумя представленными выше целевыми функциями.

Сравнивались оптимальные значения целевых функций для трех последовательностей ВС:

F_1 — для FCFS-последовательности, $i = \overline{1, P}$;

F_2 — для последовательности, полученной с помощью предлагаемого алгоритма;

F_3 — для оптимального решения, рассчитанного с помощью пакета CPLEX.

Значение минимизируемой целевой функции уменьшается по сравнению со значением целевой функции для исходного решения на величину $F_1 - F_3$ при оптимальном решении, на величину $F_1 - F_2$ при применении предлагаемого алгоритма.

В серии из 500 тестов оценивалась эффективность решения — среднее значение отношения

$$\frac{F_1 - F_2}{F_1 - F_3} 100\%,$$

которое характеризует среднее уменьшение значения целевой функции при применении предлагаемого алгоритма по сравнению с максимально возможным (100%) уменьшением значения целевой функции при оптимальном решении. Кроме этого, оценивалась доля тестов, в которых при применении алгоритма было получено оптимальное решение. Сравнивался средний размер максимального сдвига p , полученного при решении задачи с по-

мощью предлагаемого алгоритма и с помощью пакета CPLEX.

Результаты представлены в табл. 2.

Эксперимент 2 предназначался для определения времени счета и качества решения, полученного с помощью эвристического алгоритма для последовательности из 40 ВС.

Тесты генерировались аналогично первому эксперименту.

Для этого случая с помощью стандартного пакета CPLEX решение получить не удастся из-за ограниченности вычислительных ресурсов. Для оценки эффективности алгоритма в серии из 500 тестов оценивалось среднее значение отношения

$$\frac{F_1 - F_2}{F_1} 100\%,$$

которое определяет, на сколько процентов в среднем меньше значение целевой функции F_2 для последовательности, полученной с помощью предлагаемого алгоритма, по сравнению со значением целевой функции F_1 — для FCFS-последовательности.

Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 2

Эффективность решения при разных целевых функциях

Целевая функция	$\frac{F_1 - F_2}{F_1 - F_3} \times 100\%$	Доля оптимальных решений, %	Средний сдвиг p (предлагаемый алгоритм)	Средний сдвиг p (CPLEX)
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i) $	~78,7	~30,2	~2,04	~3,36
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$	~82,7	~51,8	~1,65	~2,01

Таблица 3

Эффективность решения при разных целевых функциях

Целевая функция	$\frac{F_1 - F_2}{F_1} 100\%$	Средний сдвиг p
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i) $	~28,33	~2
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$	~37,77	~2

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Настоящая работа — первый шаг на пути разработки алгоритмов повышения эффективности использования взлетно-посадочных полос (ВПП) аэропортов. Помимо оптимизации очередей воздушных судов (ВС) на посадку необходимо применять алгоритмы расчетов траекторий и скоростей движения ВС для безопасного перестроения ВС с целью выдерживания оптимальной последовательности посадок. За рамками данной статьи остались задача оптимизации приземлений на несколько ВПП и задача, когда одна ВПП применяется и для взлетов, и для приземлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 1. Методы точного решения // Проблемы управления. — 2018. — № 4. — С. 2—13. [Veresnikov, G.S., Egorov, N.A., Kulida, E.L., Lebedev, V.G. Methods for solving of the aircraft landing problem. Part 1. Exact solution methods // Control Sciences. — 2018. — No. 4. — P. 2—13. (In Russian)]
2. Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 2. Методы приближенного решения // Проблемы управления. — 2018. — № 5. — С. 2—13. [Veresnikov, G.S., Egorov, N.A., Kulida, E.L., Lebedev, V.G. Methods for solving of the aircraft landing problem. Part 2. Ap-

- proximate solution methods // Control Sciences. — 2018. — No. 5. — P. 2—13. (In Russian)]
3. Bennell, J.A., Mesgarpour, M., Potts, C.N. Dynamic scheduling of aircraft landings // European Journal of Operational Research. — 2017. — No. 258. — P. 315—327.
 4. Beasley, J.E., Krishnamoorthy, M., Sharaiha, Y.M., and Abramson, D. Scheduling aircraft landings — the static case // Transportation Science. — 2000. — Vol. 34, No. 2. — P. 180—197.
 5. Kulida, E.L., Lebedev, V.G., Egorov, N.A. The heuristic algorithm for planes queue optimization // Proceedings of the 11th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD). — M.: IEEE, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551908>.
 6. Кулида Е.Л., Егоров Н.А., Лебедев В.Г. Формирование оптимальных очередей воздушных судов на прилет // Материалы 11-й междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2018 / ИПУ РАН. — М., 2018. — Т. 2. — С. 296—297. [Kulida, E.L., Egorov, N.A., Lebedev, V.G. Formirovanie optimal'nykh ocheredei vozdushnykh sudov na prilet // Materialy 11-i mezhdunar. konf. «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» MLSD'2018 / IPU RAN. — Moscow, 2018. — Т. 2. — С. 296—297. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 5.03.2019, после доработки 5.07.2019.
Принята к публикации 30.07.2019.

Кулида Елена Львовна — канд. техн. наук, ✉ lenak@ipu.ru,
Лебедев Валентин Григорьевич — д-р техн. наук,
✉ lebedev@ipu.ru,

Егоров Николай Александрович — канд. техн. наук,
✉ egorov@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF THE ALGORITHM TO OPTIMIZE THE FLOW OF AIRCRAFT ON LANDING

E.L. Kulida[#], V.G. Lebedev, N.A. Egorov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#] ✉ lenak@ipu.ru

Abstract. The problem of aircraft landing sequence optimization is considered. The formal statement of the problem is presented of forming the optimal aircraft queue for landing, the main limitations and target functions. In order to obtain the solution in real time, the methods of optimization of the initial sequence are illustrated and the heuristic algorithm of the approximate solution of the problem is proposed. As the initial sequence for the algorithm to operate, the sequence is selected in that the aircraft land in the order of the arrival. In the process of applying the algorithm, the initial solution corresponding to the initial sequence cannot be worsened. Computational experiments are carried out in order to study the efficiency of the algorithm proposed. The calculating time and the quality are compared of the initial solution, the heuristic solution obtained using the proposed heuristic algorithm, and the optimal solution obtained using the standard CPLEX package. Noted is that for the problem of large dimension (with large number of aircraft) the optimal solution cannot be obtained, so the heuristic solution is compared with the initial one. Tests for intense aircraft flows are generated randomly. The proposed algorithm allows within a reasonable time either to obtain optimal (30—52 % of cases) solutions of the problem or to significantly improve the initial solution.

Keywords: aircraft sequences, objective function, optimal solution, heuristic algorithm, computational experiment.

Funding. The work is performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (grant No. 18-08-00822a) and I30 program of Presidium of Russian Academy of Sciences.