

О.В. НЕЛИН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ САМОЛЕТОВ В АЭРОПОРТУ

Введение

Деятельность всех служб и структурных подразделений аэропорта регламентируется суточными планами полетов воздушных судов авиакомпаний, использующих данный аэропорт. Зачастую запланированная деятельность аэропорта нарушается, что приводит к неудобствам потребителей авиатранспортных услуг, прямым и косвенным экономическим потерям авиакомпаний.

Иррегуляция работы аэропортов выражается в терминах расписания полетов: происходят задержки и отмены запланированных рейсов.

По данным годового отчета Международной организации гражданской авиации (ICAO), в 2001 году в мировой авиации количество задержанных и отмененных рейсов составило соответственно 0,7% и 0,01% от всех запланированных. Наиболее влиятельными факторами задержек и отмен рейсов являются неблагоприятные погодные условия (60%), техническая неготовность воздушных судов (20%), неисправности аэродромного оборудования и сооружений (10%), а также забастовки персонала, приводящие к ограничению технологических возможностей аэропортов (5%). Общие экономические потери от задержек и отмен рейсов в указанном году составили 32 млрд. долларов США. Этим обуславливается естественный интерес к разработке методов повышения эффективности управления деятельностью аэропорта в разнообразных кризисных ситуациях, в первую очередь, при неблагоприятных метеорологических условиях.

В мировой практике принята следующая классификация неблагоприятных погодных условий: туман, ветер, снег, обледенение, ураган, смерч. Большинство из перечисленных факторов не оставляет человеку свободы для каких-либо активных управленческих действий, предпринимаемых с целью улучшения создавшегося положения. Однако в случае обледенения воздушных судов существует возможность ослабить негативные последствия данного фактора (при отсутствии прочих видов неблагоприятных погодных условий) путем принятия и реализации рациональных управленческих решений, регламентирующих технологический процесс антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту.

Задача оперативного планирования процесса антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту состоит из трех подзадач:

- определения состава и количества пунктов антиобледенительной обработки, которые должны быть развернуты в аэропорту с целью обеспечения готовности каждого самолета к вылету не позднее заданного (директивного) момента времени;
- распределения воздушных судов, скопившихся в аэропорту к моменту принятия решения, между пунктами антиобледенительной обработки;
- упорядочения процесса антиобледенительной обработки самолетов в каждом пункте.

С точки зрения содержательной постановки, задача оперативного планирования процесса антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту относится к числу задач, являющихся предметом исследования классической теории расписаний [1], [2].

Перечисленные подзадачи, как и общая задача оперативного планирования процесса антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту, имеют многовариантный и, следовательно, оптимизационный характер. Они могут решаться последовательно и независимо друг от друга. При этом результаты решения каждой предшествующей подзадачи будут накладывать формальные ограничения на выбор варианта решения последующей подзадачи. Указанное обстоятельство в сочетании с возрастающей степенью детализации условий каждой последующей подзадачи по сравнению с предшествующей может снизить общий оптимизационный эффект или привести к вырождению области допустимых решений очередной подзадачи в пустое множество. Поэтому представляется целесообразным решать задачу оперативного планирования процесса антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту в целом, не разбивая ее на отдельные подзадачи. При таком подходе в качестве искомых переменных, значения которых способны регламентировать процесс антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту, необходимо выбрать бивалентные величины:

$$x_{ijk} \in \{0,1\}; i = \overline{1,m}; j \in J_i; k = \overline{1,r_{ij}},$$

где i , j и k – индексы, идентифицирующие, соответственно, пункт антиобледенительной обработки, воздушное судно и его порядковый номер в очереди на обслуживание тем или иным пунктом;

m – количество имеющихся в распоряжении пунктов антиобледенительной обработки воздушных судов, которые могут быть развернуты в аэропорту;

J_i – множество воздушных судов, которые могут обслуживаться i -м пунктом;

r_{ij} – максимальный порядковый номер j -го воздушного судна в очереди на обслуживание i -м пунктом (задается заранее, исходя из производительности данного пункта антиобледенительной обработки самолетов и директивного срока вылета рассматриваемого воздушного судна).

Смысл введенных искомых переменных заключается в следующем: если в результате решения задачи некоторая переменная x_{ijk} принимает значение единицы, это означает, что j -е воздушное судно должно пройти антиобледенительную обработку в i -м пункте k -м по счету; при $x_{ijk} = 0$ это неверно.

Моменты времени начала t_j^H и окончания t_j^K процесса антиобледенительной обработки каждого j -го воздушного судна выражаются как функции искомых переменных следующими формулами:

$$t_j^H = \sum_{i \in I_j} \sum_{k=1}^{r_{ij}} x_{ijk} [t_i^0 + T_i(k, j)];$$

$$t_j^K = \sum_{i \in I_j} \sum_{k=1}^{r_{ij}} x_{ijk} [t_i^0 + \tau_{ij} + T_i(k, j)]; \quad j = \overline{1, n},$$

где I_j – множество пунктов антиобледенительной обработки, пригодных для обслуживания j -го воздушного судна:

$$I_j = \{i : 1 \leq i \leq m, \quad j \in J_i\};$$

t_i^0 – момент ввода i -го пункта в эксплуатацию;

τ_{ij} – нормативная продолжительность обслуживания j -го воздушного судна в i -м пункте;

$T_i(k, j)$ – величина, характеризующая продолжительность периода занятости i -го пункта обслуживанием воздушных судов, предшествующих j -му:

$$T_i(k, j) = \sum_{k' \in R(k)} \sum_{j' \in J_i \setminus \{j\}} x_{ij'k'} \tau_{ij'},$$

где $R(k) = \begin{cases} \emptyset, & \text{если } k = 1; \\ \{1, \dots, k-1\}, & \text{если } k > 1. \end{cases}$

Очевидно, если j -е воздушное судно обслуживается i -м пунктом антиобледенительной обработки первым по счету (то есть $k = 1$), то $T_i(k, j) = 0$.

В систему ограничений задачи оперативного планирования процесса антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту входят математические соотношения, отражающие следующие требования:

– все воздушные суда должны пройти антиобледенительную обработку:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{k=1}^{r_{ij}} x_{ijk} = 1; \quad j = \overline{1, n}; \quad (1)$$

– момент завершения антиобледенительной обработки каждого j -го воздушного судна не должен предшествовать некоторому заранее известному моменту времени $t_j^{(1)}$, выбранному с таким расчетом, чтобы исключить необходимость повторения данной процедуры непосредственно перед вылетом (предполагается, что в силу сложившейся метеорологической ситуации в зоне аэропорта момент времени $t_j^{(1)}$ превосходит или, в крайнем случае, совпадает с моментом начала выполнения рейса j -го воздушного судна, установленным расписанием полетов):

$$t_j^k \geq t_j^{(1)}; \quad j = \overline{1, n}; \quad (2)$$

– антиобледенительная обработка каждого j -го воздушного судна должна быть завершена не позднее заданного момента времени $t_j^{(2)}$, выбор которого определяется, с одной стороны,

метеорологической ситуацией в зоне аэропорта, а, с другой, – стремлением снизить продолжительность задержки рейса:

$$t_j^k \leq t_j^{(2)}; \quad j = \overline{1, n}; \quad (3)$$

– каждый пункт антиобледенительной обработки одновременно может обслуживать не более, чем одно воздушное судно:

$$\sum_{j \in J_i} x_{ijk} \leq 1; \quad i = \overline{1, m}; \quad k = \overline{1, r_{ij}}; \quad (4)$$

– работа каждого развернутого пункта антиобледенительной обработки воздушных судов должна быть непрерывной с момента ввода его в эксплуатацию:

$$\varphi_i(0) + \sum_{k=1}^{r_i-1} \varphi_i(k) \cdot \Psi_i(k) + \Psi_i(r_i) = 1; \quad i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где $r_i = \max\{r_{ij}, i \in J_i\}$;

$$\varphi_i(k) = \prod_{k'=k+1}^{r_i} \left(1 - \sum_{i \in J_{ik'}} x_{ijk'} \right); \quad k \in \{0, 1, \dots, r_i - 1\};$$

$$\Psi_i(k) = \prod_{k'=1}^k \sum_{j \in J_{ik'}} x_{ijk'}; \quad k = \overline{1, r_i};$$

$$J_{ik'} = \{j \in J_i : k' \leq r_{ij}\}; \quad i = \overline{1, m}; \quad k' = \overline{1, r_i}.$$

В качестве критериев оптимальности плана антиобледенительной обработки самолетов в аэропорту на практике чаще всего используются следующие величины, представленные как функции искомых переменных:

– количество пунктов антиобледенительной обработки, которые необходимо ввести в эксплуатацию для своевременного обслуживания скопившихся в аэропорту самолетов:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{i \in J_i} x_{ij1} \rightarrow \min; \quad (6)$$

– расходы на развертывание пунктов антиобледенительной обработки воздушных судов в аэропорту:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^m c_i \sum_{i \in J_i} x_{ij1} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где c_i – стоимость развертывания i -го пункта;

– затраты на проведение антиобледенительной обработки самолетов:

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j \in J_i} s_{ij} \sum_{k=1}^{r_{ij}} x_{ijk} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где s_{ij} – стоимость антиобледенительной обработки j -го воздушного судна в i -м пункте;

– суммарная задержка рейсов относительно наиболее ранних возможных сроков начала их выполнения:

$$f_4(x) = \sum_{j=1}^n t_j^k \rightarrow \min ; \quad (9)$$

– общие финансовые потери, вызванные задержкой рейсов:

$$f_5(x) = \sum_{j=1}^n \sigma_j t_j^k \rightarrow \min , \quad (10)$$

где σ_j – финансовые потери, обусловленные задержкой рейса j -го воздушного судна на единицу времени.

В формальной постановке задача оперативного планирования процесса антиобледенительной обработки воздушных судов в аэропорту заключается в отыскании вектора значений искомым переменных $x^* = (x_{ijk}^* ; i = \overline{1, m}; j \in J_i; k = \overline{1, r_{ij}})$, обращающего в минимум одну из критериальных функций (6)–(10) при соблюдении всех ограничений (1)–(5).

Множество I^* пунктов антиобледенительной обработки воздушных судов, подлежащих развертыванию и вводу в эксплуатацию, устанавливается согласно формуле

$$I^* = \{ i : (1 \leq i \leq m) \& (\exists j \in J_i)(x_{ij1}^* = 1) \}.$$

Распределение воздушных судов между пунктами и очередность их обслуживания определяется непосредственно значениями искомым переменных.

Выбор критериальной функции в каждом конкретном случае обуславливается приоритетами, диктуемыми сложившейся ситуацией в аэропорту. При необходимости учета двух и более критериев задача формулируется как многокритериальная. Для ее преобразования к однокритериальной форме могут быть использованы традиционные приемы, присущие задачам векторной оптимизации [3].

Выводы

Задача оперативного планирования процесса антиобледенительной обработки воздушных судов в аэропорту относится к классу экстремальных комбинаторных задач с нелинейной структурой. Для ее решения используется алгоритм направленного перебора вариантов [4], адаптированный к особенностям математической модели (1)–(10). Компьютерная реализация рассмотренной задачи осуществлена в операционной среде UNIX IP с использованием языка C++ .

Новизна предлагаемого подхода к оперативному планированию антиобледенительной обработки воздушных судов заключается в применении математической модели, позволяющей оптимизировать управленческие решения по технологическим и экономическим критериям. Практическое внедрение разработанной программы позволит сократить сроки действия нештатной ситуации в аэропорту, снизить финансовые затраты на ликвидацию ее последствий и потери авиакомпаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. – М.: Наука, 1975. – 360 с.

2. Танаев В.С., Ковалев М.Я., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Групповые технологии. – Минск: Ин-т технической кибернетики НАН Белоруссии, 1998. – 290 с.
3. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. – К.: ЗАТ ВІТОЛ, 2000. – 687 с.
4. Литвиненко А.Е. Метод решения экстремальных комбинаторных задач с нелинейной структурой // Кибернетика. – 1983. – № 5. – С. 83 – 87.