

Є.С. Сагун

Льотна академія національного авіаційного університету, Кропивницький

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

Стаття присвячена дослідженню сучасних підходів до вирішення проблеми оптимального завантаження повітряного судна, заснованих на методах математичного аналізу та моделювання, евристики, лінійного та динамічного програмування. Для детального дослідження та аналізу поняття центру тяжіння вантажу вантажний відсік повітряного судна представлено у вигляді прямокутника. Прямокутна модель вантажного відсіку дає змогу оптимізувати розміщення комерційного вантажу відносно центру тяжіння та знайти найбільш сприятливе його положення. За результатами дослідження визначено, що сучасні методи оптимізації завантаження повітряного судна не враховують часові обмеження. Було визначено цільову функцію з ваговими, часовими та вартісними обмеженнями процесу завантаження для реалізації комплексного підходу до вирішення проблеми оптимізації завантаження повітряного судна.

Ключові слова: повітряне судно, математична модель, оптимальне завантаження, ULD (системи палетної обробки), цільова функція, оптимізація часу завантаження.

Вступ

Постановка проблеми. Повітряні вантажні перевезення відіграють значну економічну роль у суспільстві, займаючи 10% всесвітнього обсягу світової торгівлі, а це більш ніж 6,4 трильйони доларів щорічно [1–2]. Оптимізація та розподілення завантаження вкрай важливе для авіаперевізників з декількох причин.

По-перше, правильно розподілене завантаження визначає рівень безпеки.

По-друге, оптимальне завантаження позитивно впливає на аеродинаміку, дає можливість зменшити споживання палива, мінімізує інші витрати та вплив повітряного транспорту на навколишнє середовище.

По-третє, оптимальне завантаження є вирішальним фактором у хендлінгових операціях, особливо в рамках часових обмежень та складності маршрутів повітряних суден (ПС).

Наукова література містить наступні дослідження з питань оптимізації:

1) послідовності завантаження – правильного розподілу сукупної ваги систем палетної обробки всередині ПС. Таке завдання є частиною проблеми центрування та завантаження;

2) проблеми пакування – розміщення одиниць вантажу відносно габаритів контейнера;

3) евристичні підходи:

– пірамідний спосіб завантаження – розміщення предметів із більшою вагою ближче до центру тяжіння, додаючи по чергову предмети в сторону передньої частини та корми ПС;

– метод 50 на 50 – означає, що 50% вантажу розміщують у двох полярних сторонах ПС.

Ретельний аналіз досліджень проблеми оптимального завантаження дає змогу зробити декілька висновків:

1. Процедура розподілу вантажу є доцільною незалежно від того, у який спосіб виконано центрування. Неправильний розподіл ваги може призвести до серйозних інцидентів та аварійних ситуацій, таких як нахил ПС у бік або підйом носової частини ПС разом із стійкою шасі у так зване положення “свічки” [6].

2. Навіть мінімальне зміщення від встановленого центру тяжіння може призвести до збільшення витрат палива.

Наприклад, для літака моделі A340-300, дальність польоту якого досягає 10 000 км, зміщення центрування менш ніж на 75 см економить авіакомпанії 4 тонни палива за один рейс. Не зважаючи на те, що деякі ПС обладнані автоматичною трансферною системою подачі палива, продуктивність повітряного судна все ж виграє від правильного планування завантаження [7].

При дослідженні сучасних підходів до оптимізації завантаження було визначено деякі проблеми, пов’язані із центруванням та розміщенням вантажу відносно ПС та було проаналізовано різні математичні підходи їх вирішення. Проте вивчені джерела не наводять жодного прикладу вирішення проблеми часу в рамках питання оптимізації. Адже від економії часу залежить і кількість операцій із завантаження/розвантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Варто зазначити, що існує велика різноманітність визначень, під якими мається на увазі планування завантаження [3].

Проблема оптимізації завантаження – це проблема розподілу, яку можна знайти в літературі за напрямком – проблеми центрування та завантаження [4]. Автор Limbourg [5] пише, що розділяє ці дослідження на три категорії. Перші роботи містять дослідження з оптимізації завантаження всередині контейнеру окремо від ПС. Особливо ця частина корелюється з проблемами контейнерного пакування (Bin Packing Problem). Не менш важливим є підбір палетів або одиниць вантажу, які мають бути завантажені до повітряного судна або вантажного відсіку – метод рюкзак (Knapsack Problem). Багато робіт з цього приводу були вивчені у військових роботах Калюжного та Shaw [6]; цивільних та комерційних дослідженнях Mongeau та B`es [7–8]; Fok та Chun [9], Gueret G. [10] та Nance R.L., Roesener A.G. [11].

Остання категорія авторів займалась оптимізацією розміщення палетів відносно ПС. У цій сфері література поділяється на два підходи: контейнерне пакування (завантаження та розподіл предметів всередині контейнерів) та розподіл всередині ПС (розташування контейнерів).

У підходах до проблеми контейнерного пакування автори намагаються повністю здійснити завантаження ПС шляхом виключення вільного простору між предметами. У проблемі розподілу розглядають спроби розміщення палетів (ULDs) у заздалегідь визначених позиціях.

Метою статті є дослідження існуючих підходів до розв'язання проблеми оптимального завантаження ПС та пошук перспективних напрямів удосконалення завантажувальних процесів.

Основна частина

Одним із сучасних підходів до дослідження проблеми оптимального завантаження є представлення вантажного відсіку ПС у вигляді прямокутника та визначення оптимального центру маси для розташування системи палетної обробки (ULD). ULD представляє собою набір компонентів, які складаються з контейнеру або палету, вкритого сіткою, який використовується з метою надання вантажу необхідних стандартизованих розмірів, а також характеристик для окремих одиниць багажу/вантажу для забезпечення швидкого завантаження та розвантаження [6].

Положення центру маси ПС \bar{r}_{CM} визначається узагальнюючою формулою [5]:

$$\bar{r}_{CM} = \frac{\int \rho(\bar{r}) \bar{r} dV}{\int \rho(\bar{r}) dV}, \quad (1)$$

де \bar{r} – вектор напрямлення;

$\rho(\bar{r})$ – функція, яка описує розподіл щільності системи;

dV – нескінченно малий об'ємний елемент, через який виконується інтеграція.

У випадку, коли система складається виключно з маси, \bar{r}_{CM} розраховується за допомогою спрощеної формули:

$$\bar{r}_{CM} = \frac{\sum_i m_i \bar{r}_i}{\sum_i m_i}, \quad (2)$$

де m_i – маса частинки i .

Представимо вантажний відсік ПС у вигляді прямокутника (рис. 1), позначимо на ньому одиницю вантажу маленьким трикутником (рис. 2) [6].

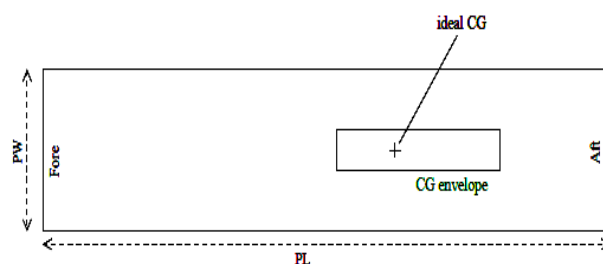


Рис. 1. Прямокутна модель вантажного відсіку ПС

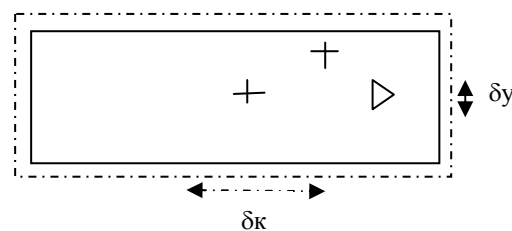


Рис. 2. Прямокутна модель розміщення предмету завантаження

Розташування, орієнтоване таким чином означає, що така модель потребує простору між завантаженими одиницями, а також між вантажем та стінами вантажного відсіку. Наприклад, для контейнеру розміром у 20 футів (6 м) достатньо відстані у шість дюймів (15,2 см) від інших предметів, у той час, як для цистерни потрібна відстань в 1 фут, щоб створити мінімальний доступ до дверей [12].

У випадку, коли контейнер або цистерна розміщені суміжно один з одним, то перевага надається просторовим вимогам більшого за розміром вантажу.

Для пошуку оптимального підходу до вирішення проблеми завантаження потрібно знайти цільову функцію, яка полягає у мінімізації витрат часу на завантаження встановленої кількості контейнерів до ПС.

Нехай, XR_{cg} та YR_{cg} будуть x -координати та y -координати відносно центру тяжіння літака після завантаження.

Вихідні параметри функції:

δx_i – зміщення у довжину центру тяжіння i -го контейнеру від оптимального (розрахункового) центру;

δy_i – зміщення в ширину центру тяжіння i -го контейнеру від оптимального (розрахункового) центру.

T_{load_i} – час завантаження i -го контейнеру до ПС;

T_p – час простою ПС в аеропорту;

P – вартість простою ПС в аеропорту;

w_i – вага i -го контейнеру;

C – ємність вантажного відсіку;

n – кількість контейнерів;

Цільова функція:

$$\min \sum_{i=1}^n T_{load_i}, \quad (3)$$

за умов наступних обмежень:

$$1) \quad XR_{cg} \rightarrow 0, \quad (4)$$

$$\delta x_i \geq 0, \quad \forall_i \in \{1, \dots, n\}.$$

$$2) \quad YR_{cg} \rightarrow 0, \quad (5)$$

$$\delta x_i \geq 0, \quad \forall_i \in \{1, \dots, n\},$$

$$w_i \leq C, \quad \forall_i \in \{1, \dots, n\}.$$

$$3) \quad \min \sum_{i=1}^n T_{load_i} \leq T_p, \quad (6)$$

$$P \rightarrow \min, \quad \forall_i \in \{1, \dots, n\}.$$

Використовуючи метод цільової оптимізації, за основний критерій оптимального завантаження вибрано мінімізацію часу завантаження контейнерів до ПС. За цим критерієм і була побудована цільова функція.

Другим критерієм є мінімізація відстані між координатами відносно оптимального (розрахунко-

вого) центру тяжіння та координатами відносно центру тяжіння літака після завантаження.

Третім критерієм оптимізації є максимальне використання простору вантажного відсіку.

Обмеженнями у цільовій функції виступають:

– точки зміщення координат у довжину та ширину відносно оптимального (розрахункового) центру тяжіння; та після завантаження;

– ємність вантажного відсіку;

– час та послідовно вартість простою ПС в аеропорту.

Вивчення процедури завантаження та аналіз в рамках використаного часу може вплинути на подальше зменшення витрат на заробітну плату у перерахунку на один рейс, що в свою чергу скорочує оборотність ПС (часовий проміжок між приземленням літака та його зльотом) та зменшує аеропортові збори.

Висновки

Оптимізація часу завантаження ПС є критично важливою, оскільки безпосередньо впливає на швидкість та вартість виконання операцій із його завантаження/розвантаження.

Проблема оптимізації завантаження ПС представлена у формі багатокритеріальної задачі, яка полягає в мінімізації часу на завантаження.

Критерії для вирішення проблеми оптимального завантаження:

1. Мінімізація часу завантаження контейнерів до ПС.

2. Мінімізація відстані між координатами відносно оптимального (розрахункового) центру тяжіння та координатами відносно центру тяжіння літака після завантаження.

3. Максимальне використання простору вантажного відсіку.

Проблема оптимізації часу завантаження представлена у вигляді математичної функції з усіма обмеженнями. В перспективі вирішення такого завдання дає змогу розглянути проблему оптимального завантаження у часовому середовищі та на реальному прикладі перевезення живих вантажів (тварин).

Список літератури

1. International Civil Aviation Organization. Doc 9921: Annual Report of the Council. [Electronic resource] / ICAO // Doc 9921: Annual Report of the Council – 2009. – Available at: http://www.icao.int/icao/net/dcs/9921/9921_en.pdf.
2. International Air Transport Association. Cargo e-Chart book: Quarterly report [Electronic resource] / IATA // Cargo e-Chart book: Quarterly report. – 2014. – Available at: <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/eChartbook-Q4-2010.pdf>.
3. Limbourg S. Automatic Aircraft Cargo Load Planning: Working paper / S. Limbourg, M. Schyns, G. Laporte. – HEC - management school, University of Liège, Belgium, 2011. – 2 p.
4. The Aircraft Weight and Balance Problem / W. Souffriau, P. Demeester, V. Berghe, P. De Causmaecker // Proceedings of ORBEL, Brussels. – 2008. – No. 22. – P. 44-45.
5. Paquay C. A mixed integer programming formulation for the three-dimensional bin-packing problem deriving from an air cargo application / C. Paquay, M. Schyns, S. Limbourg. – University of Liège, Belgium. – 2011. – 6 p.

6. Shaw D. Optimal aircraft load balancing. Mathematical formulation / B. Kaluzny, D. Shaw // Defence R&D Canada: CORA Technical Report. – 2008. – 68 p.
7. Mongeau M. Optimization of Aircraft Container Loading / M. Mongeau, C. Bès // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. – 2002. – Vol. 39. – P. 140-150.
8. Herman A. Integration model for scheduling of passenger and cargo aircraft flight / A. Herman, D. Widiastuty // International Journal of Advanced Research. – 2018. – 6 p.
9. Fok K. Optimizing Air Cargo Load Planning and Analysis / K. Fok, A. Chun // International Conference on Computing, Communications and Control Technologies. – 2004. – 6 p.
10. Loading aircraft for military operations / G. Gueret, N. Jussien, O. L'homme, C. Pavageau, C. Prins // Journal of the Operational Research Society. – 2003. – No. 53. – P. 458-465.
11. Nance R.L. An advanced tabu search for solving the mixed payload airlift loading problem / R.L. Nance, A.G. Roesener, J.T. Moore // Journal of the Operational Research Society. – 2011. – No. 62. – P. 337-347.
12. Military Transport Aircraft. TO 1C-17A-9: Loading Instructions: USAF Series C-17A Aircraft. – McDonnell Douglas Corporation, 2007. – 24 p.

References

1. International Civil Aviation Organization (2009), *Annual Report of the Council*, Doc 9921, available at: www.icao.int/icao/net/dcs/9921/9921_en.pdf (accessed 25 November 2018).
2. International Air Transport Association (2014), *Cargo e-Chart book: Quarterly report*, available at: www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/eChartbook-Q4-2010.pdf (accessed 25 November 2018).
3. Limbourg, S., Schyns, M. and Laporte, G. (2011), *Automatic Aircraft Cargo Load Planning*, Working paper, HEC-management school, University of Liège, Belgium, 2 p.
4. Souffriau, W., Demeester, P., Berghe, V. and De Causmaecker, P. (2008), The Aircraft Weight and Balance Problem, *Proceedings of ORBEL*, No. 22, Brussels, pp. 44-45.
5. Paquay, C., Limbourg, S. and Schyns, M. (2011), *A mixed integer programming formulation for the three-dimensional bin-packing problem deriving from an air cargo application*, University of Liège, Belgium, 6 p.
6. Kaluzny, B. and Shaw, D. (2008), Optimal aircraft load balancing. Mathematical formulation, *CORA Technical Report*, Defence R&D, Canada, 68 p.
7. Mongeau, M. and Bès, C. (2002), Optimization of Aircraft Container Loading, *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol. 39, pp. 140-150.
8. Herman, A. and Widiastuty, D. (2018), Integration model for scheduling of passenger and cargo aircraft flight, *International Journal of Advanced Research*, 6 p.
9. Fok, K. and Chun, A. (2004), Optimizing Air Cargo Load Planning and Analysis, *International Conference on Computing, Communications and Control Technologies*, 6 p.
10. Gueret, G., Jussien, N., L'homme, O., Pavageau, C. and Prins, C. (2003), Loading aircraft for military operations, *Journal of the Operational Research Society*, No. 53, pp. 458-465.
11. Nance, R.L., Roesener, A.G. and Moore, J.T. (2011), An advanced tabu search for solving the mixed payload airlift loading problem, *Journal of the Operational Research Society*, No. 62, pp. 337-347.
12. McDonnell Douglas Corporation (2007), *Military Transport Aircraft. TO 1C-17A-9, Loading Instructions: USAF Series C-17A Aircraft*, 24 p.

Надійшла до редколегії 26.11.2018

Схвалена до друку 20.12.2018

Відомості про авторів:

Сагун Єлизавета Сергіївна
аспірант
Льотної академії
Національного авіаційного університету,
Кропивницький, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4837-4688>

Information about the authors:

Yelyzaveta Sahun
Doctoral Student
of Flight Academy
of National Aviation University,
Kropivnitsky, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4837-4688>

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ
ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Е.С. Сагун

Статья посвящена исследованию современных подходов к решению проблемы оптимальной загрузки, основанных на методах математического анализа и моделирования, эвристики, линейного и динамического программирования. Научная литература содержит исследования по вопросам оптимизации последовательности загрузки (правильного распределения суммарного веса систем паллетной обработки внутри воздушного судна), проблемы контейнерного упаковки (размещения единиц груза относительно габаритов контейнера), эвристические подходы. Однако, изученные источники не приводят ни одного примера решения проблемы оптимизации загрузки в рамках ее времени. С целью детального исследования проблемы, в том числе, в рамках изучения понятия центра тяжести, был условно продемонстрирован грузовой отсек воздушного судна в виде прямоугольника. Прямоугольная модель грузового отсека позволяет оптимизировать размещение коммерческой загрузки относительно центра тяжести, а также найти наиболее оптимальное ее расположение. По результатам исследования определена проблема, которая состоит в отсутствии каких-либо действующих методов и подходов, которые способны решить проблему оптимизации загрузки, учитывая временные ограничения. Было введено 3 дополнительные критерия оптимизации, и написана целевая функция с весовыми, временными и стоимостными ограничениями. Целевая функция состоит в минимизации затрат времени для загрузки установленного количества контейнеров в ВС. Следовательно, от экономии времени зависит и количество совершенных операций по загрузке/разгрузке. Изучение процедуры загрузки и анализ в рамках использованного времени может повлиять на дальнейшее сокращение затрат заработной платы в перерасчете на 1 рейс.

Ключевые слова: воздушное судно, математическая модель, оптимальная загрузка, ULD (системы паллетной обработки), целевая функция, оптимизация времени загрузки.

ADVANCED APPROACHES TOWARDS AIRCRAFT LOAD OPTIMIZATION PROBLEM

Ye. Sahun

The article is dedicated to advanced approaches towards aircraft load optimization problem, which is based on mathematical analysis' methods, modeling, heuristics, linear and dynamic programming. Scientific literature contains researches towards assignment (correct replacement Unit Load Devices' total weight inside the aircraft), bin packing problem (item's assignment inside the container/bin), heuristic approaches, such as pyramidal loading approach and method of 50/50. Thus, analyzed researches don't provide any example of solving the load optimization problem inside it's time frames. For the purpose of detailed problem's research, taking into account the center of gravity statement's analyzing, the aircraft cargo compartment was demonstrated as a rectangle. Cargo compartment's rectangle model gives an opportunity to optimize the payload's replacement towards the center of gravity, and also to find it's most appropriate position. Due to research results, the problem was found and defined as a lack of any valid methods and approaches, which are able to solve the load optimization problem, taking into account it's time limits. Three additional criteria were imposed and the objective function with weight, time, and value constraints was written. The objective function lies in minimization of loading time of the set amount of the aircraft cargo bins, as soon as the quantity of loading/unloading procedures consequently depends on time savings. The function constraints are aircraft stand-by time, aircraft's capacity, latitudinal and longitudinal coordinates of center of gravity's shifting. Learning and analyzing of the loading procedure in time frames can influence on the further cut of salary costs per flight.

Keywords: aircraft, mathematical model, optimal loading, ULD (Unit Load Devices), objective function, loading time optimization.