

# Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання, озброєння та застосування

УДК 656.7.025

DOI: 10.30748/zhups.2020.66.05

Є.С. Сагун, А.О. Сагун

*Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький*

## АЛГОРИТМ ПЛАНУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СУДНА ЗА КРИТЕРІЄМ ПРІОРИТЕТНОСТІ

*Стаття присвячена дослідженню особливостей алгоритму оптимізації планування завантаження та необхідності його використання у реальному часі. Оскільки більшість вивчених моделей оптимізації завантаження не враховують фактори часу завантаження та деякі обмеження з центрування та завантаження, то представлений алгоритм завантаження надасть можливість більш ефективно організувати планування завантаження повітряного судна, запобігаючи появі невикористаного простору у вантажному відсіку, в умовах мультилагового маршруту. Представлений надалі алгоритм оптимізації передбачає розташування вантажу у вантажному відсіку ПС у заздалегідь визначений час та у порядку, визначеному конкретною документацією з пріоритетністю вивантаження у проміжних ділянках мультилагового маршруту, не перевищуючи обмеження із центрування та завантаження, а також мінімізувавши час завантаження та витрати на обслуговування у перерахунку на кожний рейс. Даний алгоритм став основою для оптимізаційної моделі планування завантаження, яка була наочно представлена у програмі комп'ютерного моделювання Blender v 2.83 Beta.*

**Ключові слова:** повітряне судно, засоби пакування (ULD), оптимізаційна модель планування завантаження, оптимізація часу завантаження, мультилаговий маршрут.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Оптимізація операцій із завантаження повітряного судна є важливою частиною в успішній діяльності авіакомпанії. Декілька зацікавлених сторін приймають участь у даних операціях одночасно, слідує різним цілям. Відділи продажу авіакомпаній шукають шляхи для максимізації прибутків та одночасно способи зменшення будь-яких витрат, в той час, як наземне обслуговування ПС прагне зменшити трудові затрати на обслуговування кожного рейсу. Служби з організації перевезень займаються, в тому числі й оптимізацією використання авіаційного палива та обліком використання засобів пакування – (ULD).

Процес завантаження вантажу завжди відбувається повністю відповідаючи всім світовим, європейським нормам та правилам, включаючи обмеження, які можуть надаватися відповідальним на даному етапі персоналом. Такі інструкції та правила повинні задовольняти обмеження з безпеки польотів та авіаційної безпеки, а також, обмеження з центрування та завантаження літака, зазначеного у польотній документації конкретного рейсу.

Оскільки транспортування вантажу авіаційним транспортом є дуже непростим та відповідальним видом діяльності і залежить від оборотності повітряного судна, перевізник змушений дотримуватися усіх перерахованих обмежень, проте, на користь своєї діяльності, якомога більше скорочуючи операційні витрати. Стаття містить опис алгоритму планування завантаження, який спрощує процес розташування контейнерів (ULD) відповідаючи усім загальним та специфічним обмеженням із подальшим вивантаженням контейнерів у визначеному порядку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема оптимального завантаження згадується у багатьох наукових дослідженнях.

Одними з перших робіт з оптимізації були публікації, в яких вивчалися проблеми “двомірного пакування та розкрою”, “ортогонального пакування” та алгоритми локального пошуку за “імітацією відпалу” [1; 6].

Також дана проблема детально описана в роботах з пакування контейнерів, написаних А. Trivella та D. Pisinger [11]. Наразі, інші автори впроваджують евристичні складові, що вивчають вплив різної

кількості різносортного вантажу на ефективність його завантаження [2; 7].

А. Bortfeldt та Н. Gehring розробили метод, заснований на інтегрованій жадібній евристиці, що передбачає використання специфічних генетичних формул-операторів у згенерованих планів з укладки вантажу, які відображаються у комплексну структуру даних, що відображають конкретну проблему [4].

Проблема оптимального завантаження також представлена у багатьох наукових працях як мультиконтейнерна проблема завантаження, яка вирішується з допомогою вирішення дискретних лінійних оптимізаційних моделей [10; 12].

Деякі наукові дослідження, що тісно пов'язані з евристичними рішеннями базуються на показниках міцності та максимального навантаження на підлогу контейнеру із запобіганням пошкоджень вантажу [3]. Велика кількість авторів досліджували саме математичне моделювання з оптимальними рішеннями для 3D завантаження. Одне за таких рішень – змішане дискретне програмування [5].

**Метою статті** є розробка специфічного алгоритму планування завантаження, який має максимально спростити планування завантаження в умовах мультиагатового маршруту. Алгоритм формалізований у мову програмування Python із подальшою імплементацією у програму 3D моделювання Blender.

## Виклад основного матеріалу

Усі вимоги та завдання, поставлені на етапі формалізації були дотримані [9], тому головною метою залишається *час завантаження ПС*, який повинен бути зменшено, що суттєво вплине на час хендлінгових операцій загалом. Процес завантаження був розподілений на три транспортних лага (відрізка). Представлений підхід оптимізації завантаження є доцільнішим за попередні за рахунок комбінації формалізованої частини та евристичного підходу. Евристика базується на інформації, згенерованій на основі даних, отриманих від співробітників авіакомпаній, що є відповідальними за різні етапи планування завантаження. Був створений алгоритм, параметри якого поділені на три категорії та представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри оптимізаційної моделі завантаження

Загальні параметри	Параметри ПС	Параметри контейнеру	Параметри вантажних секцій
К-ть лагів, $L_i$	Ємність, $C$	К-ть контейнерів, $c_i$	К-ть секцій, $S_n$

Закінчення табл. 1

Максимальне завантаження, $W_{\max}$	Вага $i$ -го контейнеру, $w_i$	Максимальне завантаження, $w_{s_n}$
Розміри вантажного відсіку, $D$ .	Розміри, $d_i$	Розміри, $d_{s_n}$
	Кінцева вага згідно секції, $w_{load}, w_{jload}, w_{kload}$	

Джерело: розроблено авторами.

Алгоритм враховує інші практичні обмеження.

Загальні обмеження:

1. Сумісність. Перевезення вантажу лише з призначенням ПС.

2. Типологічні властивості контейнеру. Контейнери є гомогенними.

3. Положення. Кожний вантаж має бути запакований та завантажуватись ортогональним чином, тобто, краї вантажу є паралельними до нього.

4. Ротація. Контейнер можна повертати тільки на 90 градусів.

5. Зберігання. Вантаж зберігається на складі та у випадку завантаження переміщується до платформи або рампи.

6. Послідовність вивантаження. Конкретний контейнер вважається розвантаженим тільки у випадку, якщо піддон під ним теж вивантажується.

7. Дискретні змінні та показники. Розміри контейнерів та координатні показники вантажу у контейнері є позитивними дискретними показниками.

Специфічні обмеження:

1. Максимальне навантаження, що діє на поверхню контейнера.

2. Вагові обмеження. Предмети вантажу в кожному контейнері не можуть перевищувати загальний показник максимального завантаження.

3. Розподіл ваги. Вага вздовж усього відсіку розподіляється згідно пріоритету доставки вантажу.

*Правило відбору.* Контейнери сортуються за критерієм пріоритетності. Випадки для відбору:

Випадок 1. Вантаж завантажуватиметься у початковому пункті відправлення та буде слідувати до кінцевого пункту призначення  $at, L1$ .

Випадок 2. Вантаж завантажуватиметься у проміжному пункті відправлення/призначення та буде доставлений до кінцевого пункту призначення,  $L2$ .

Випадок 3. Вантаж завантажуватиметься у початковому пункті відправлення та буде вивантажений у проміжному пункті,  $L3$ .

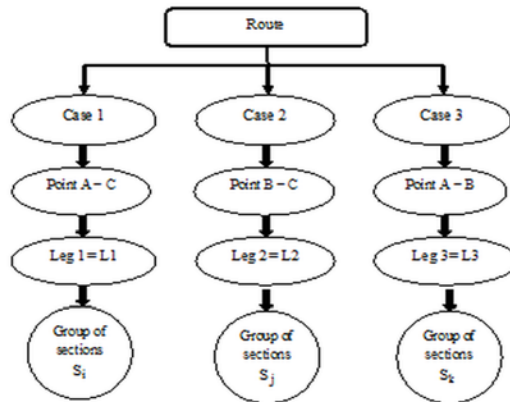


Рис. 1. Правило відбору  
Джерело: розроблено авторами.

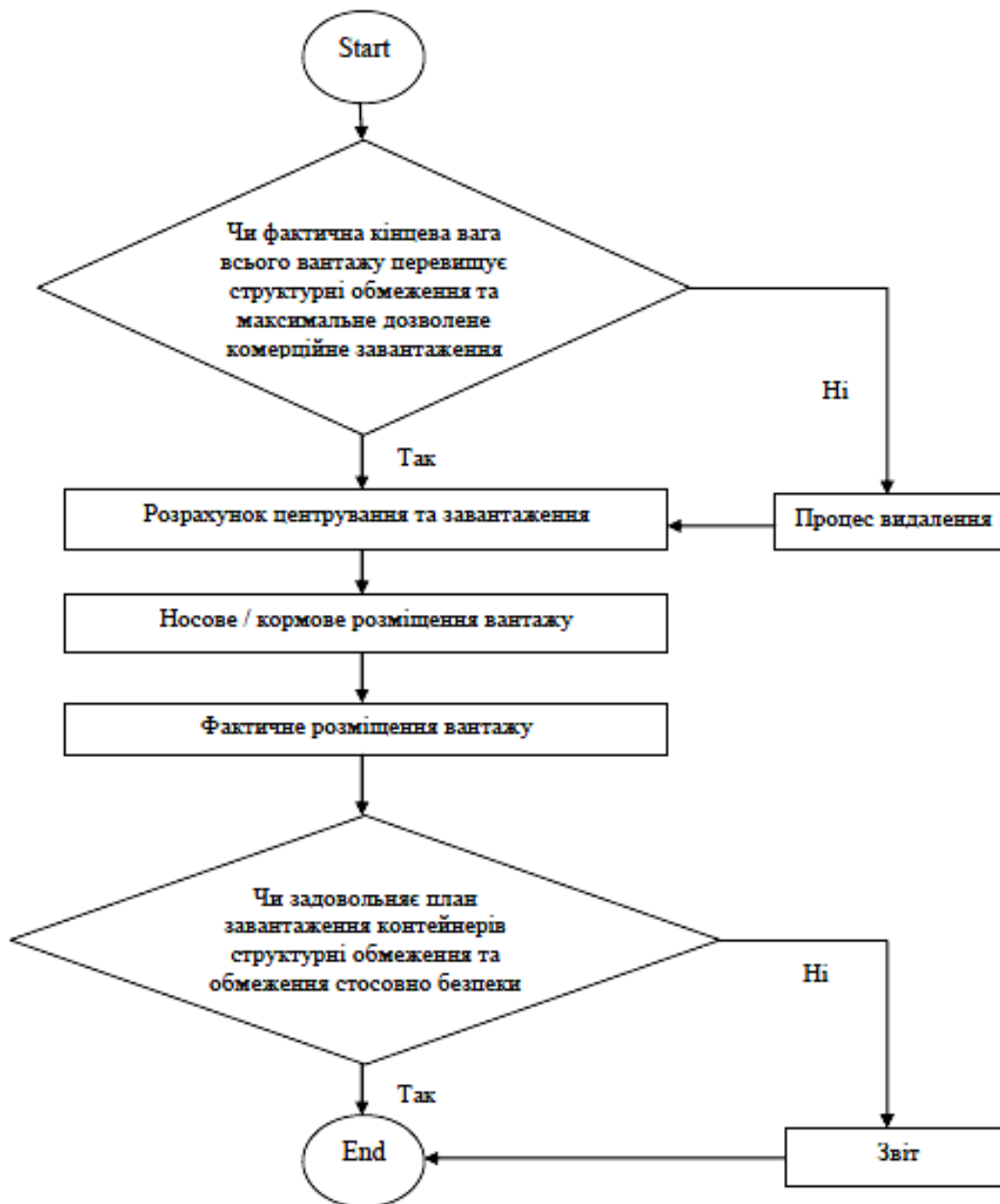


Рис. 2. Блок-схема алгоритму прийняття рішень з планування завантаження  
Джерело: розроблено авторами.

**Алгоритм планування**

Крок 1.

Дано 15 вантажних секцій ( $S_n$ ) у вантажному відсіку ІЛ-76Т. Секції розділені на три групи. Кожна група секцій  $S_i, S_j, S_k$  має визначену кількість секцій.  $S_i = 4; S_j = 6; S_k = 4$ .

Кожна з секцій має власні розміри  $d_{S_n}(x_{S_n}, y_{S_n}, z_{S_n})$ .  $z_{S_n}$  буде апіорі  $\leq Z$ , оскільки розміри контейнеру  $c_i$  не можуть перевищувати загальні D (1):

$$z_{S_n} \leq Z; \forall z. \quad (1)$$

Крок 2.

Кожна секція має визначений максимум ваги  $w_{S_n}$ , який не може перевищувати загальне максимальне навантаження,  $W_{\max}$  (2):

$$w_S \leq W_{\max}; \forall w_{S_n}. \quad (2)$$

Крок 3.

Контейнер має бути завантаженим згідно із правилом відбору таким чином, щоб вага  $w_i$  не перевищувала максимальну дозволена вагу на вантажну секцію  $w_{S_n}$  (3):

$$c_i \in S_n \leftarrow w_i \leq w_{S_n}; \forall w_i. \quad (3)$$

Крок 3 повторюється допоки всі контейнери, що підходять за їх характеристиками будуть завантажені до ПС.

Крок 4.

Повторюємо крок 1, крок 2 та крок 3 по відношенню до інших вантажних секцій.

**Псевдокод алгоритму**

Для того, щоб змоделювати алгоритм, послідовність та обмеження якого не суперечать не тільки загальним обмеженням з навантаження, а й з навантаження на окрему вантажну секцію ПС необхідно розрахувати це навантаження на секцію, керуючись вихідними даними Додатку 3 до РЛЕ ІЛ-76 ("Інструкція з центровки та завантаження") [8].

**Алгоритм**

1. Контейнер  $c_i$  необхідно завантажити у вантажний відсік літака.

*Ситуація 1:*

2. Маршрут слідування контейнера А – С (через пункт В)

3. Отже, контейнер  $c_i$  належить лагу L1.

Розміри контейнеру ( $DxIIIxB$ ),  $d_i \leq$  розмірам вантажного відсіку ІЛ-76, D

Якщо умови дотримані, то:

4. Перевіряємо, щоб вага контейнеру,  $w_i \leq w_{S_n}$ , граничної ваги для  $k$  вантажної секції

**Примітка:**

Всього є 3 вантажні секції –  $i, j, k$ .

$k$  – це секція для вантажу, що вивантажується на проміжній ділянці А-В, секції № 11,12,13,14, 15.

$j$  – секція для вивантаження на проміжку В-С, секції № 6,7,8,9,10.

$i$  – секція для вивантаження вантажу, що слідує з пункту А в кінцевий пункт С, секції № 1, 2, 3, 4, 5.

5. Завантажуємо спочатку секцію  $i$  (усі вантажі, що слідують до кінцевого пункту призначення С).

6. Якщо в секції залишається місце і фактичне завантаження < ніж максимальне, розраховане на дану секцію, (згідно з графіком залежності центру тяжіння) [10], то:

7. Завантажуємо секцію наступним контейнером, який слідує за даним направленням.

8. У випадку, якщо вільне місце відсутнє / або фактичне навантаження на конкретний відсік = максимальному, то переходимо до наступних секцій  $S_{i+1}$ . Повторювати пункт 7, допоки максимальне завантаження усіх секцій даної групи будуть  $\leq$  кінцевій вазі завантаженого контейнеру згідно його визначеної секції.

9. Повторювати дії 1–6 для груп секцій  $j, k$ .

10. Перевірка показників завантаження.

11. Кінець.

Приклад псевдокоду загального алгоритму по маршруту у псевдокодi представлений таким чином:

**Алгоритм 1**

- // FOR ALL  $c_i$
- (let  $i=1, k \leq 50000$  (kg),  $i++$  integer)
- // READ  $c_i$
- // READ  $d_{x_i y_i z_i}$
- (let  $x>1, y>1, z>1; x \leq D_x, y \leq D_y, z \leq D_z; x, y, z++$ )
- // IF  $d_{x_i y_i z_i} \leq D_{xyz}$ , THEN
- // READ  $L_i$
- (let  $i=1,2,3; i++$ )
- // ELSE
- // READ  $c_{i+n}, (n=1)$
- // IF  $c_i \in L_i$ , THEN
- // READ Algorithm 1a
- // ELSE
- // READ  $L_{i+n}, (n=1)$
- // END

Приклад алгоритму однієї ланки з всього маршруту буде представлений таким чином:

**Алгоритм 1a**

- // FOR (list of " $c_i$ ")  $\in L1$
- (let  $k=1 \leq 50000$ (kg),  $++$ , integer,  $i>0$ )
- // READ  $w_k$

- (let  $k=1,2,3,\dots,n, i>0$ , integer,  $i++$ )
- // IF  $w_i \leq w_{S_k}$ , THEN
- (let  $i \{S_k\} = 11,12,13,14$ )
- // LOAD  $\rightarrow S_k$
- // ELSE  $\rightarrow$
- // READ  $w_{k+1}$
- LOAD  $\rightarrow S_k$
- // REPEAT UNTIL  $w_{S_k} \geq w_{k_{load}}$
- // END IF
- $w_{k_{load}} - w_k < 0 > 1$ .

Даний псевдокод був формалізований у Python крипт у середовищі Visual Studio Code з інтеграцією у Blender Modeling Program Version 2.83. Beta (Рис. 3)

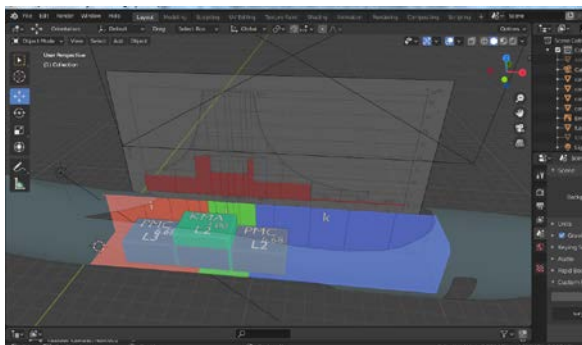


Рис. 3. Скрін оптимізаційної моделі у програмі Blender

## Висновки

Процедура оптимізації планування завантаження передбачає ефективне розміщення груп контейнерів із зменшенням часу завантаження, що означає зменшення кількості вантажних операцій з завантаження/вивантаження з метою скорочення витрат у перерахунку на один рейс.

Авіаперевізники все ще знаходяться у пошуку діючих інструментів задля найбільш ефективного використання завантаження, оптимізації використання палива та підвищення показників прибутковості.

Спроби досліджень останніх років були обмежені показниками безпеки повітряного судна та зазвичай розглядалися окремо від проблеми оптимізації завантаження.

Представлений алгоритм надає варіанти оптимальних рішень яким чином управляти процесом завантаження дотримуючись усіх обмежень із безпеки та специфічних характеристик маршруту (пріоритетності).

Розроблена модель розміщення вантажу надає змогу передбачити подальший його рух протягом маршруту задля запобігання додатковим процедурам переміщення в умовах мультиаглового маршруту. Вантажні авіаперевізники зможуть покращити якість їх послуг, імплементуючи дану модель та підхід у свою програмну діяльність.

Вантаж, що надходить в останній термін може транспортуватися у більших обсягах, а хендлінгові витрати можуть бути суттєво скорочені.

## Список літератури

1. Laarhoven P.J.M. Simulated Annealing: Theory and Applications / P.J.M. Laarhoven, E.H.L. Aarts. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1987. – P. 55-70.
2. Bischoff E.E. A Comparative Evaluation of Heuristics for Container Loading / E.E. Bischoff, M.D. Marriott // European Journal of Operational Research. – 1990. – No. 44. – P. 267-276. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90362-F](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90362-F).
3. Bischoff E. Three - dimensional packing of items with limited load bearing strength / E.E. Bischoff // Journal of Operational Research. – 2006. – No. 168. – P. 952-966. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.03>.
4. Bortfeldt A. A hybrid genetic algorithm for the container loading problem / A. Bortfeldt, H. Gehring // European Journal of Operational Research. – 2001. – No. 131. – P. 143-161. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00055-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00055-2).
5. Chen C. An analytical model for the container loading problem / C.S. Chen, S.M. Lee, Q.S. Shen // Journal of Operational Research. – 1995. – No. 80(1). – P. 68-76. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00002-T](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00002-T).
6. Dyckho H. A typology of cutting and packing problems / H. Dyckho // European Journal of Operational Research. – 1990. – No. 44. – P. 145-159. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-K](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-K).
7. George J.A. A heuristic for packing boxes into a container / J.A. George, D.F. Robinson // Computers & Operations Research. – 1980. – No. 7(3). – P. 147-156. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(80\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0305-0548(80)90001-5).
8. РЛЭ ИЛ 76-Г. Руководство лётной эксплуатации ИЛ 76. Инструкция по центровке и загрузке, Кн. 1, Изд. 2, Прил. 3. – М., 1984. – 12 с.
9. Sahun Ye. Current status of aircraft load optimization problem / Ye. Sahun // Proceedings of the National Aviation University. – 2019. – No. 1(78). – P. 35-39. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.1.13657>.
10. Suhl Uwe H. Solving Airlinefleet Scheduling Problems with Mixed-integer Programming / Uwe H. Suhl, M. Leena Suhl // Operational Research in Industry, 1999. – P. 135-156. [https://doi.org/10.1057/9780230372924\\_7](https://doi.org/10.1057/9780230372924_7).
11. Trivella A. Bin-packing problems with load balancing and stability constraints / A. Trivella, D. Pisinger // Informatics and Logistics Society. – Chicago, United States, 2017. – P. 5-8.
12. A comparative review of 3D container loading algorithms / X. Zhao, B. Bennella, A.T. Julia, K. Dowsland // International Transactions in Operational Research. – 2016. – No. 23. – P. 287-320. <https://doi.org/10.1111/itor.12094>.

**Відомості про авторів:**

**Сагун Єлизавета Сергіївна**

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

**Сагун Андрій Олексійович**

старший викладач  
Льотної академії  
Національного авіаційного університету,  
Кропивницький, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-8037-4990>

**Information about the authors:**

**Yelyzaveta Sahun**

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

**Andriy Sahun**

Senior Instructor  
of Flight Academy  
of National Aviation University,  
Kropivnitsky, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-8037-4990>

**АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ВОЗДУШНОГО СУДНА ПО КРИТЕРИЮ ПРИОРИТЕТНОСТИ**

Е.С. Сагун, А.А. Сагун

*Статья посвящена исследованию особенностей функционирования алгоритма оптимизации планирования загрузки и необходимости его использования в авиационных грузовых перевозках в реальном времени. Поскольку большинство изученных ранее оптимизационных моделей загрузки не учитывают факторы времени загрузки и некоторые аспекты по ограничению центровки и загрузки, то представленный алгоритм предоставит возможность более эффективной организации планирования загрузки воздушного судна, предотвращая появление неиспользованного пространства в грузовом отсеке в условиях мультилагового маршрута. Представленный далее алгоритм оптимизации предусматривает размещение грузов внутри грузового отсека ВС в заранее определенное время и в порядке, указанном конкретной перевозочной документацией, учитывая приоритетность выгрузки в промежуточных участках мультилагового маршрута, а также не превышая ограничения по центровке и загрузке в перерасчете на каждый рейс. Данный алгоритм стал основой для оптимизационной модели планирования загрузки, которая была наглядно представлена в программе компьютерного моделирования Blender v 2.83 Beta.*

**Ключевые слова:** воздушное судно, средства пакетирования (ULD), оптимизационная модель планирования загрузки, оптимизация времени загрузки, мультилаговый маршрут.

**AIRCRAFT LOAD PLANNING ALGORITHM BASED ON A PRIORITY CRITERIA**

Ye. Sahun, A. Sahun

*The article is dedicated to research of the specificities in load planning optimization algorithm and the necessity of its usage in practical conditions of aircraft cargo transportations. As the majority of studied load optimization models and approaches does not contain any information about loading time criterion, weight & balance restrictions or the center of gravity envelope, the presented new aircraft loading algorithm will enhance the air carriers and handlers to more effective ways of aircraft load planning, avoiding the occurrence of the unused space in an aircraft cargo compartment in conditions based on a priority loading during the multiple-leg route. The term "loading time", that was mentioned at this article, means the number of loading/unloading operations per one particular flight. The term "priority" is defined as a finite order of the loading/unloading operations according to the cargo shipment documentation. Therefore, the following optimization algorithm includes the cargo allocation in an aircraft cargo compartment according to the arranged documentation, time and order prior to unloading procedures on a selected route leg. The work contains some general constraints, such as compatibility, assignment, rotation, type of container, etc. The weight & balance constraints are also considered in the research as well, but the main goal is an aircraft loading time and handling effort's minimization with further cutting of handling and operation costs per one particular flight. The developed algorithm became a base of a new aircraft load planning optimization model, that was formalized in Python script and visualized in a 3D modeling program Blender v 2.83 Beta.*

**Keywords:** aircraft, Unit Load Devices (ULD), load planning optimization model, loading time optimization, multiple - leg route.