

УДК 330.46+519.863

DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2020-33-18>

Лозовська Л. І.

*кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри економічної інформатики
Національної металургійної академії України*

Зелік В. О.

*аспірантка кафедри економічної інформатики
Національної металургійної академії України*

Lozovska Lyudmila

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor of Economic Informatics
National Metallurgical Academy of Ukraine*

Zelik Valentina

*Postgraduate Student of the Department of Economic Informatics
National Metallurgical Academy of Ukraine*

РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЕЯКИХ ЗАДАЧ ОБ'ЄМНОГО ПАКУВАННЯ

Анотація. У статті розглянуто питання розв'язання задач про оптимальну упаковку. Досліджено наявні теоретичні підходи, концепції й методики вирішення таких задач, визначено вихідні та результуючі параметри економіко-математичної моделі, досліджено і розроблено етапи розрахунку варіанту пакування, реалізовано алгоритм знаходження близького до оптимального варіанту розв'язання задачі визначення маршруту доставки товарів та пакування транспортно-го засобу, який полягає у застосуванні комбінованого алгоритму, генетичного та еволюційного, що покращує якість розв'язку та швидкість його знайдення. Практичне застосування отриманих результатів полягає у підвищенні ефективності діяльності підприємств за рахунок автоматизації процесів визначення оптимального варіанту пакування транспортно-го засобу.

Ключові слова: логістика, маршрут, доставка товарів, генетичний алгоритм, еволюційний алгоритм, задача пакування.

Вступ та постановка проблеми. Кожного разу, коли потрібно розмістити товари на складі або завантажити їх у транспортний засіб, ми стикаємося з проблемою, як скласти вантаж так, щоб він займав якомога менше місця, іншими словами, як заповнити заданий об'єм максимальною кількістю товарів. Це питання висвітлює задача про

оптимальну упаковку, або 3-вимірна задача про рюкзак. У математичній літературі частіше зустрічається одновимірний варіант задачі про упаковку. Було встановлено, що ця задача є NP-повною [1, с. 196]. Під час постановки задачі про упаковку в тривимірному просторі вона буде явно складнішою від одновимірної, але, як і раніше, може

бути розв'язана за поліноміальний час на недетермінованих обчислювальних пристроях.

Актуальність роботи полягає в тому, що тривимірна задача про упаковку також є NP-повною. На жаль, всі відомі алгоритми, які розв'язують будь-яку із NP-повних задач, зокрема задачу про упаковку, мають експонентну часову складність [2, с. 42], що еквівалентно повному перебору всіх можливих варіантів. Це означає, що навіть за невеликої кількості вантажів (близько 50) час роботи програми, що реалізує такі алгоритми, буде вимірюватися роками навіть за використання сучасних суперкомп'ютерів. Іншою проблемою, яка не дозволяє застосувати класичні алгоритми на практиці, є набір додаткових обмежень, які повинні бути виконані під час розстановки вантажу в заданому обсязі. Залежно від сфери діяльності організації, для якої потрібно розв'язання задачі розрахунку оптимальної упаковки, набір таких обмежень і додаткових умов може бути дуже різноманітним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури, інформаційних інтернет-джерел підтверджує актуальність проблематики і засвідчує, що дослідженням і розробленням методів розв'язку цього класу задач займаються: Харківська школа Академіка Ю.Г. Стояна; Інститут алгоритмів і наукових обчислень Німеччини (Т. Ленгауер); К. Доусланд, В. Доусланд (Великобританія); В. Міленковік, К. Даніельс (США); низка російських учених, таких як Е.А. Мухачева, М.А. Верхотуров, В.В. Мартинов, А.А. Петунін, В.Д. Фроловський.

Незважаючи на суттєві наукові доробки, актуальним залишається створення наближених евристичних алгоритмів, які за прийнятний час знаходять розв'язок, близький до оптимального, і при цьому можуть бути легко адаптовані для урахування додаткових обмежень. У цій роботі буде описаний подібний алгоритм, призначений для розрахунку оптимального укладання вантажів у транспортні засоби. Щільність заповнення в результаті роботи цього алгоритму становить у середньому 80–90% від обсягу вантажного відсіку, а час роботи для сотень ящиків – кілька хвилин. При цьому алгоритм має високу ступінь адаптивності до урахування додаткових обмежень, що виникають на практиці. Багато з цих обмежень, такі як вантажопідйомність, максимальний тиск на верхню грань ящика, збалансованість тиску на осі транспортного засобу і інші, вже враховані в алгоритмі і можуть бути задані при знаходженні рішення.

Розглянемо основні методи розв'язання задач упаковки (ВРР). [5, с. 72].

У 1966 Р. Gilmore і R. Gomory вперше застосували для вирішення завдання про рюкзак метод лінійного програмування з генерацією стовпців на кожному кроці процесу. Цілочисельне рішення для даного завдання було запропоновано в 1987 році G. Scheithauer і J. Terno [6, с. 98]. Для цього було отримано безперервний оптимум для побудови цілочисельного рішення: після округлення знизу формувався мала залишкова задача, яка вирішувалася за допомогою евристичних алгоритмів, або процес поліпшення зупинявся на кращому досягнутому рішенні.

У 1973 році І.В. Романовским і Н.П. Хрїстовим [7, с. 1201] був запропонований метод дихотомії для вирішення дискретних мінімаксних завдань. Надалі він був застосований для вирішення задач розкрою і упаковки в роботі С.В. Кацева [8, с. 140].

У 1977 році І.В. Романовський запропонував метод «гілок і меж» для вирішення завдань упаковки [9, с. 76]. У 2000 р. Е.А. Мухачевою і іншими була запропонована модифікація для методу, що дозволяє скоротити перебір

[10, с. 153–154]. Для упаковки в смугу кіл різного радіусу в смугу Г.Ю. Стоян і В.Н. Ясков в 2004 р. запропонували метод гілок і меж [3, с. 214].

В наслідок в 2009 р. Г.Ю. Стоян і А. Чугай запропонували метод для упаковки циліндрів і прямокутних паралелепіпедів в задану область, заснований на використанні Ф-функцій [11, с. 138].

Для упаковки кіл і опуклих багатокутників в мінімальну кількість контейнерів прямокутних форми в 2009 р. J. Kallrath запропонував оптимізаційний метод на основі методу гілок і меж [12, с. 304].

Незважаючи на велику різноманітність підходів до створення точних алгоритмів, розмірність розв'язуваних завдань рідко перевершує $n = 30$. Це пов'язано в першу чергу з тим, що на даний момент не існує методу доказу рівності нижньої межі і оптимуму завдання, що призводить до необхідності перебирати всі можливі варіанти.

Крім точних методів, використовуються і евристичні алгоритми для вирішення задачі упаковки.

Пошук із заборонами застосовувався для вирішення задач розкрою і упаковки. Наприклад, для вирішення задачі для двовимірного і тривимірного випадку в 2004 році Andrea Lodi, Silvano Martello й інші запропонували узагальнену процедуру пошуку із заборонами для розв'язання задачі за критерієм мінімізації кількості використаних контейнерів [13, с. 304–306]. У 2009 році Teoder G. Crainic, Guido Perboli й інші запропонували двірневий пошук із заборонами для тієї ж задачі ВРР, при цьому на другому рівні (розміщення предметів в контейнери) використовувалося представлення у вигляді графа інтервалів [14, с. 745].

У 1994 році R.L. Rao і S.S. Iyengar запропонували метод імітації відпалу для завдання упаковки. У 1997 році M.J. Brusco, G.M. Thompson та інші запропонували імітацію відпалу на основі морфінгу для модифікованої задачі упаковки, в якій необхідно мінімізувати середньоквадратичне відхилення від заданої точки по всьому контейнеру [15, с. 433–434]. У 2005 році А.Ф. Валєєва і Т.Ю. Сірагетдінова запропонували модифікацію алгоритму для вирішення завдання двовимірної гільйотини прямокутного розкрою [16, с. 78].

Генетичні алгоритми можуть відрізнитися способом кодування, визначення найпростіших структур. Можуть бути різні способи кодування і прийоми ідентифікації найпростіших структур. Свого роду «класичним» є алгоритм для двовимірної задачі упаковки, представлений у роботах D. Liu, H. Teng; H. Cehring, A. Bortfeld [17, с. 413]. Ефективність цього алгоритму сильно залежить від використаного декодера. Порівняння блочного декодера, парних списків, заміщень та інших декодерів показує, що найгірший результат у всіх випадках показує вдосконалений D. Liu, H. Teng декодер нижній лівий (IBL) [18, с. 416]. У 2007 р Hifi M., M'Hallah R. запропонували генетичний алгоритм в поєднанні з конструктивною процедурою для вирішення двовимірної задачі упаковки кіл у смугу [18, с. 1281].

Алгоритм мурашиної колонії застосовувався для вирішення завдань розкрою і упаковки. Наприклад, в 2004 році J. Levine і F. Ducatelle запропонували гібридний алгоритм, заснований на алгоритмі мурашиної колонії і алгоритму локального пошуку [19, с. 76]. Застосування алгоритмів мурашиної колонії для вирішення завдань двовимірної упаковки було описано і А.Ф. Валєєвою [20, с. 37]. Свого роду розширенням цієї роботи є алгоритм, запропонований в 2013 році T.D. Lin, C. S. Hsu, L. F. Hsu для вирішення online-варіанту задачі упаковки [21, с. 125]. Вже в 2013 році була запропонована стаття, що описує основні

ідеї при застосуванні алгоритму мурашиної колонії для вирішення завдання упаковки [22, с. 72].

Гіперевристичні алгоритми застосовувалися для різних варіантів упаковки. Наприклад, у 2010 р. Н. Terashima-Marín і інші запропонували модифікацію гіперевристичного алгоритму для вирішення двомірної задачі фігурної упаковки [23, с. 370]. Гіперевристичний алгоритм застосовувався для вирішення завдання двомірного розкрою також у роботі Е. К. Burke [24, с. 466]. Для двовимірного варіанту завдання упаковки також пропонувався Frequency Distribution Based Hyper-Heuristic у роботі Н. Jiang і інші в 2011 році. У 2014 році Е. López-Camacho й інші запропонували методологію для застосування гіперевристичних алгоритмів і представили результати проведення випробувань на 1417 тестових наборах для вирішення завдання одно- і двовимірної упаковки, включаючи фігурну упаковку [25, с. 71]. Загальний огляд гіперевристичних алгоритмів був запропонований у роботі Р. Ross в 2014 р. [26].

Алгоритм еволюційних стратегій застосовувався для вирішення завдання упаковки. Наприклад, у 2008 році Adam Stawowy запропонував алгоритм із модифікованим оператором мутації і роздільниками для зменшення розмірності задачі для вирішення одновимірної задачі упаковки [27, с. 468].

Найпростішим прикладом конструктивних однопрохідних алгоритмів є наступний відповідний (Next-Fit, NF) [28, с. 412]. Предмети упаковуються в перший контейнер, поки дозволяє його залишкова ємність. Якщо предмет не поміщається, створюється новий контейнер. Перший відповідний (First-Fit, FF). Поточний предмет розміщується в контейнер з найменшим порядковим номером, який має відповідну залишкову ємність. Кращий відповідний (Best-Fit, BF). Поточний предмет розміщується в контейнер з найменшою залишковою ємністю. Запропоновано велику кількість різних конструктивних алгоритмів. Наприклад, А. Lodi, S. Martello, D. Vigo запропонували підхід «змінні напрямки» (Alternate Directions, AD). Кілька публікацій присвячена «шаровим» стратегіям, наприклад, алгоритм Bischoff-Dowsland і G4 J. Terno, G. Scheithauer. А.Ф. Валеєвим пропонувався алгоритм динамічного перебору для вирішення 1-, 2-, 3-мірної упаковки [29, с. 2–14]. Існує також безліч інших конструктивних алгоритмів (обмежений нижній лівий, метод пошуку порожніх кошиків, Q-послідовність і т.д.) [30, с. 278].

Основна мета роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичній реалізації алгоритму знаходження близького до оптимального варіанту розв'язання задачі визначення маршруту доставки товарів та пакування транспортного засобу.

Відповідно до поставленої мети визначено такі задачі: дослідити існуючі теоретичні підходи, концепції й методи вирішення окресленої проблематики; проаналізувати механізм функціонування логістичної діяльності підприємства та визначити в ньому місце й роль задач маршрутизації та завантаження; визначити шляхи оптимізації існуючої системи; визначити вихідні та результуючі параметри економіко-математичної моделі, дослідити і розробити етапи розрахунку варіанту пакування; зробити програмну реалізацію інформаційно-аналітичної моделі формування оптимальних маршрутів доставки товарів.

Результати дослідження. У загальному випадку ця проблема зводиться до вирішення об'ємної задачі пакування або задачі про рюкзак. Завдання тривимірної упаковки є природною еволюцією класичної одновимірної і двомірної задачі. Задача полягає в пакуванні об'єктів визначеної заздалегідь форми в скінченну кількість контейнерів або ємностей, форми яких теж відома заздалегідь,

у такий спосіб, щоб кількість використаних ємностей була найменшою або кількість чи об'єм предметів (які розміщують) були якнайбільшими [3, с. 156].

Інтерпретація класичної поставки до цієї практичної області застосування розглядається як задача транспортування вантажу, який буде упакований у контейнери або кузови транспортних засобів, або як упаковка вантажу на палети. Аналіз обмежень поставленої задачі дав змогу виокремити такі: коробки можуть розміщуватися тільки таким чином, щоб їхні межі були паралельні стінам контейнера; всі коробки повинні бути упаковані всередину контейнера; коробки не повинні перетинатися одна з одною [4, с. 1–20].

Крім перерахованих основних обмежень, залежно від вимог клієнта виникають додаткові обмеження, пов'язані зі стабільністю, щільністю, розподілом ваги, орієнтованістю коробок, максимально можливою вагою коробок, які розміщені в контейнер, пріоритетом коробок, їх несучою здатністю і необхідністю вивантаження в декількох пунктах. Інтерес становить тривимірна упаковка паралелепіпедів до контейнера такої ж форми.

Дамо формальний опис задачі упаковки вантажів в обмеженому тривимірному просторі. Ця область тривимірного простору шириною W , довжиною L і висотою H , а також множина блоків $A = \{a_i\}$ кількістю N . Вся множина блоків розбита на підмножини типів $T = \{t_i\}$. Кожен тип визначає задані параметри кожного блоку, такі як довжина, ширина, висота і вага, орієнтація за замовчуванням. Необхідно множину блоків розмістити в заданий об'єм. Вихідними даними буде план упаковки блоків в об'ємі, значення цільової функції (ЦФ) і час виконання завдання. Кожен тип вантажу характеризується кортежем довжини $\langle l_i, w_i, h_i, m_i \rangle$, де l_i, w_i, h_i – це габаритні розміри елемента, m_i – вага блоку. В результаті виконання завдання положення елементів, позначене заданим типом, в просторі задається множиною $S = \{s_i = (\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, де $\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle$ – координати кутів елемента – найближчої до початку осей координат і самого віддаленого відповідно. Так само є паралелепіпед $M = \{L, W, H\}$, де L, W, H – габаритні розміри області упаковки. Використовуючи критерій V – це відношення обсягу упакованих блоків до обсягу паралелепіпеда $V_{\text{кон}}$, що буде необхідним для упаковки всіх елементів, введемо такі обмеження:

- 1) висота всіх блоків однакова;
- 2) сумарний обсяг елементів не повинен перевищувати обсягу області упаковки:

$$\sum_{i=1}^n l_i \times w_i \times h_i \leq L_x \times W_y \times H_z, \quad (1)$$

- 3) жоден елемент не може виходити за межі заданого обсягу, тобто задовольняти системі нерівностей:

$$\begin{cases} x_{1i} \geq 0 \\ y_{1i} \geq 0 \\ z_{1i} \geq 0 \\ x_{2i} \leq L_x \\ y_{2i} \leq W_y \\ z_{2i} \leq H_z, \quad i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2)$$

- 4) відсутність перетинів (тобто в одну область простору не можна помістити два об'єкти):

$$\begin{aligned} & (x_{2i} \cdot x_{1j} \ \& \ y_{2i} \geq y_{1j} \ \& \ z_{2i} \geq z_{1j}) \vee \\ & \vee (x_{2i} \cdot x_{1j} \ \& \ y_{2i} \geq y_{1j} \ \& \ z_{2i} \geq z_{1j}) = 1, \quad \forall i, j \leq n, i \neq j, \end{aligned} \quad (3)$$

- 5) сумарна вага всіх блоків не може перевищувати заданий ліміт:

$$\sum G_{\text{бл}} \leq \sum G_{\text{лім}}, \quad (4)$$

де $G_{\text{бл}}$ – вага блоку; $G_{\text{лім}}$ – максимальна вага всіх блоків.

б) всі елементи повинні спиратися своєю основою на поверхню;

в) елементи повинні лежати перпендикулярно заданій області. Критерієм оптимізації є обсяг, який він зайняв блоками.

Цільова функція має вигляд:

$$F = \frac{\sum V_{\text{бл}}}{\sum V_{\text{кон}}} \rightarrow 1, \quad (5)$$

де $V_{\text{бл}}$ – обсяг кожного блоку, $V_{\text{кон}}$ – обсяг контейнера.

Це означає, що необхідно зменшити порожнечі в області упаковки. Максимально ефективний результат рішення задачі, коли цільова функція дорівнює 1, тобто область упаковки заповнена на 100%.

Гібридний підхід до упаковки блоків. На рисунку 1 представлена схема алгоритму гібридного пошуку на основі багаторівневого підходу. Тут реалізована ідея багаторівневої еволюції, коли процес пошуку оптимального рішення полягає у використанні декількох алгоритмів випадково спрямованого пошуку – генетичного та еволюційного. Пошук рішення зазвичай триває до тих пір, поки не буде виконано хоча б один із критеріїв зупинки. У цій роботі критерієм зупинки є досягнення певної якості отриманого рішення або перевищення максимального встановленого часу роботи алгоритму [32, с. 27].

Сформовано функціональні вимоги до інформаційної системи: наявність інтуїтивно зрозумілого та зручного

інтерфейсу; можливість введення даних про контейнер (довжина, ширина, висота); наявність поля для введення кількості одиниць вантажу; заповнення інформації про типи вантажу за параметрами (довжина, ширина, висота) та їх кількість; розрахунок оптимального варіанту завантаження контейнера; виведення інформації про координати розміщення контейнера та вантажу в тривимірному просторі, процент завантаженості транспортного засобу, маркер завантаженості одиниці пакування; можливість візуалізації результатів розрахунку.

Вхідна інформація вводиться безпосередньо на форму і не потребує довантаження додаткової інформації з файлу бази даних. Вивід теж реалізований на формі, виводиться в текстові поля, є можливість роздрукувати мапу із накресленим розрахованим маршрутом та планом завантаження машини товарами. Кількість точок доставки, маршрут та набір товарів змінюються кожного дня і для кожної машини є різним, необхідна інформація про факт доставки документується, тому зберігати інформацію про сам розрахований маршрут в базі даних є недоцільним.

Архітектура додатку розроблена таким чином: рішення містить два проекти, один представляє собою розроблений сервіс визначення оптимального варіанту завантаження транспортного засобу, інший утілює форму взаємодії з користувачем, виклик цього сервісу та модуль визначення оптимального маршруту доставки товарів.

Інтерфейс програмного додатку зображено на рисунках 2–4.

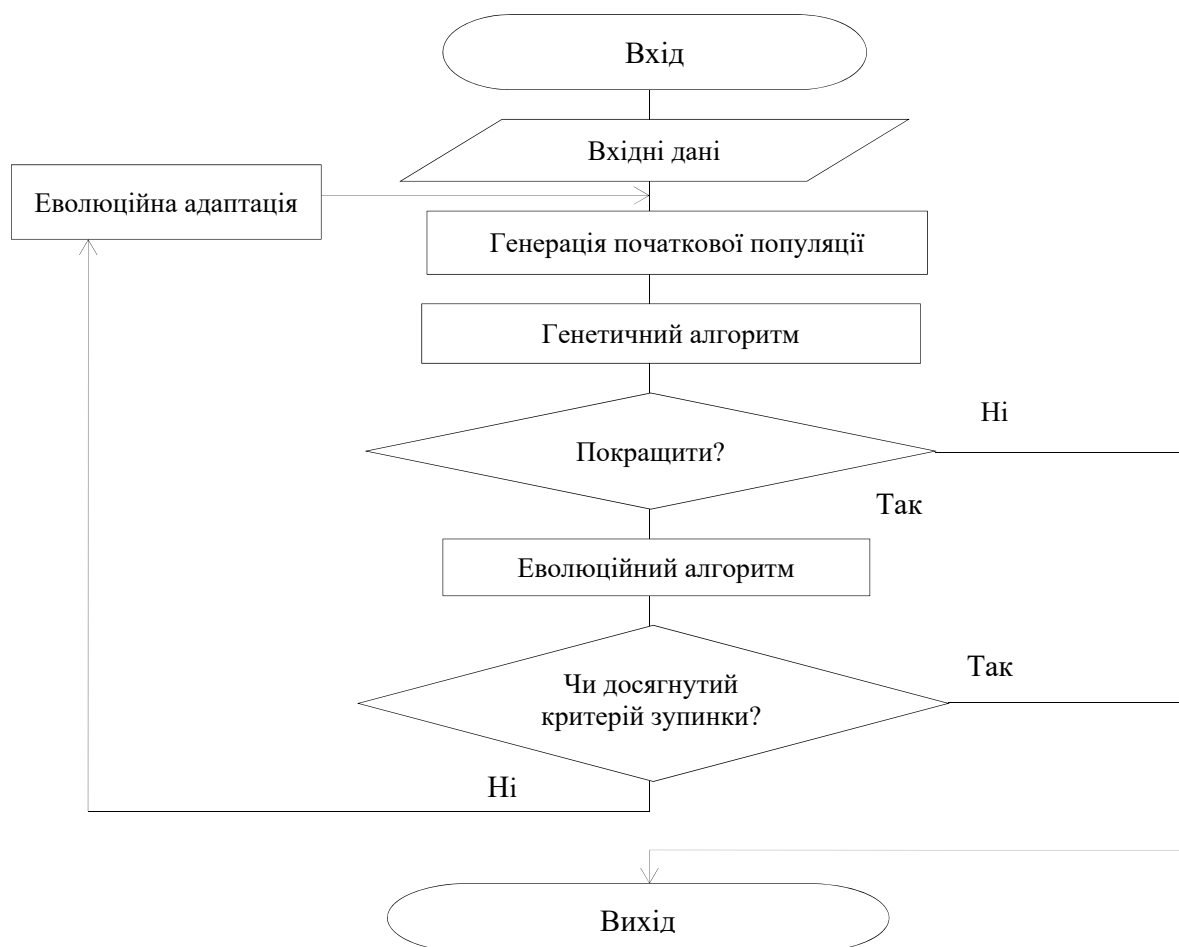


Рис. 1. Алгоритм роботи модуля визначення оптимального варіанту завантаження транспортного засобу

Програмне забезпечення було створено у середовищі Microsoft VisualStudio 2015 з використанням мови програмування C#. До створення архітектури додатку було застосовано об'єктно-орієнтований підхід. Додаток успішно пройшов усі підготовлені тест-кейси та відповідає поставленим вимогам, тож можна зробити висновок про його готовність до впровадження на підприємстві.

Програмний продукт (ПП) «Інформаційно-аналітична система формування оптимальних маршрутів доставки товарів» призначений для автотранспортних підприємств будь-якої форми власності. Дає змогу визначити оптимальний варіант завантаження транспортного засобу

та маршрут доставки товарів із можливістю візуалізації отриманих результатів (рисунок 2).

Організаційний ефект розробленої програми полягає у перекладанні значної частини роботи, яка виконується фахівцем, на комп'ютерну систему, і таким чином вивільнить його ресурси для творчої роботи.

Економічний ефект досягається виходячи організаційного ефекту за зменшення часу для дослідження алгоритмів та методів розв'язання задач пакування та визначення оптимального маршруту доставки, оскільки всі обрахунки перекладаються на комп'ютерну техніку, що в свою чергу збільшує точність та обґрунтованість фінансово відпові-

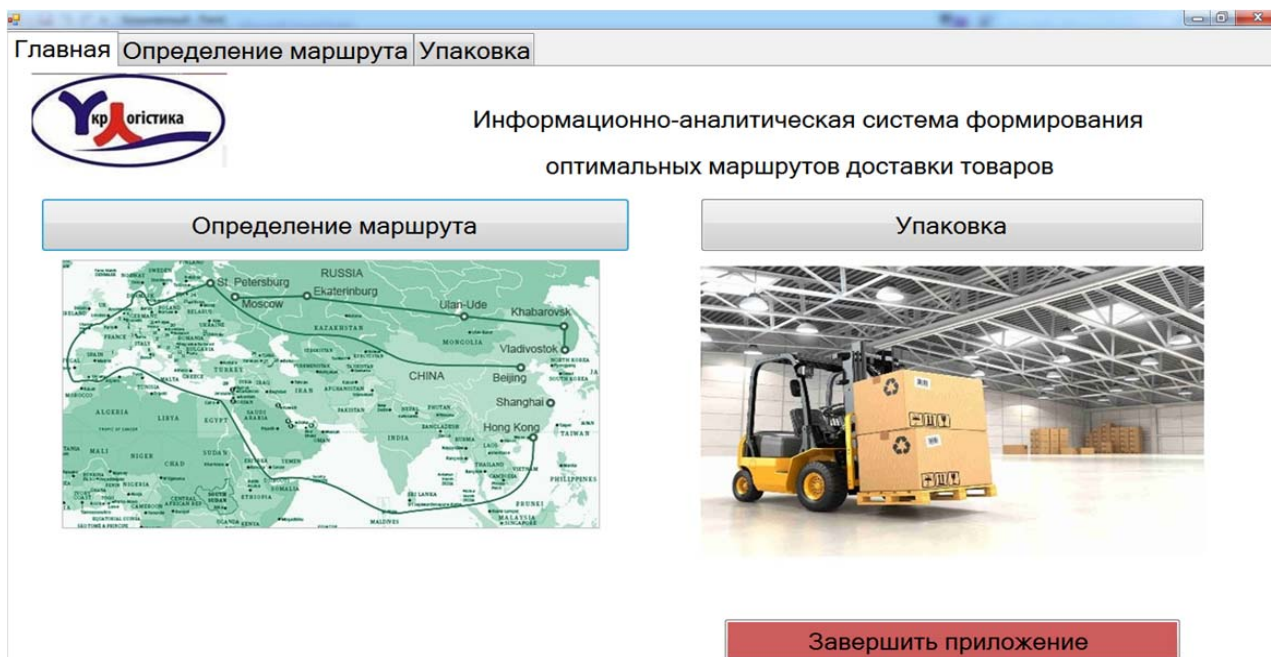


Рис. 2. Интерфейс додатка після його завантаження

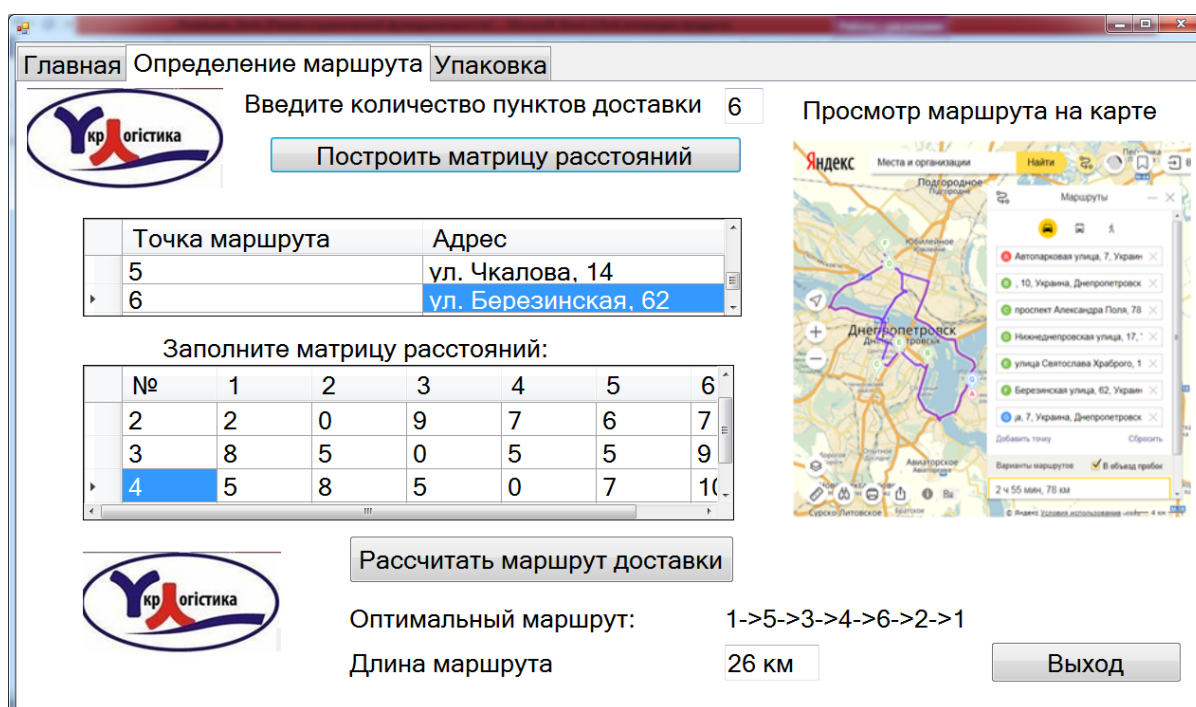


Рис. 3. Интерфейс модуля визначення оптимального маршруту доставки товарів

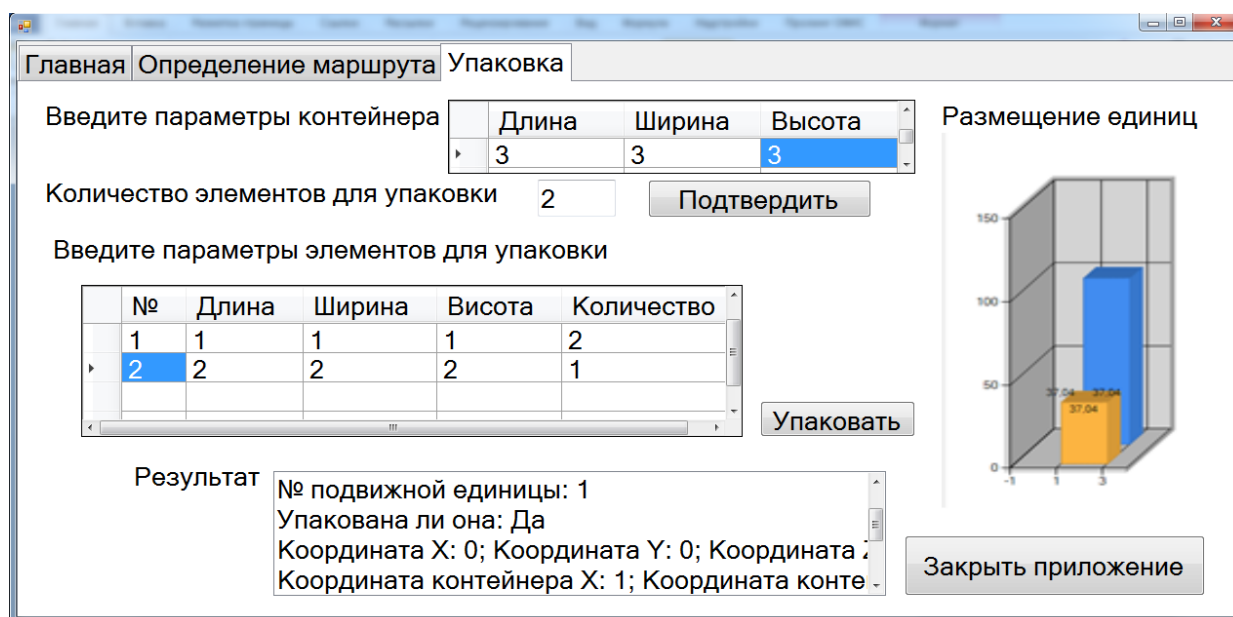


Рис. 4. Інтерфейс модуля визначення оптимального варіанту завантаження товарів

дальних управлінських рішень, що необхідно прийняти, виходячи із розрахованих даних.

Соціальний ефект від використання програмного продукту полягає у вивільненні часу фахівця для виконання інших обов'язків, зменшенні його розумового навантаження та підтримці загальної тенденції до автоматизації робочих процесів.

Потенційними споживачами розробленого рішення можуть бути як відділи логістики підприємств різного профілю, так і диспетчерські служби, адміністрації логістичних підприємств, спеціалізованих на доставці товарів.

Висновки. У процесі роботи було виконано такі завдання: досліджено існуючі теоретичні підходи, концепції й методики вирішення окресленої проблематики; проаналізовано механізм функціонування логістичної діяльності підприємства та визначити в ньому місце і роль задач маршрутизації та завантаження; визначено шляхи оптимізації існуючої системи; визначено вихідні та результуючі параметри економіко-математичної моделі, досліджено і розроблено етапи розрахунку варіанту пакування; здійснена програмна реалізація інформаційно-аналітичної моделі формування оптимальних маршрутів доставки товарів.

Було прийнято рішення застосувати комбінований алгоритм, який поєднує генетичний та еволюційний під-

ходи, що, в свою чергу, покращує якість розв'язку та швидкість його знайдення.

Результати тестування розробленого додатка свідчать про його готовність до впровадження на підприємстві. Програма має зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, дасть змогу спростити та прискорити роботу логістів відділу транспортної логістики ТОВ «Укрлогістика» та знизити транспортні витрати.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у застосуванні нового методологічного підходу до визначення близького до оптимального варіанту пакування транспортного засобу, який полягає у застосуванні комбінованого алгоритму, генетичного та еволюційного, що покращує якість розв'язку та швидкість його знайдення.

Використання результатів дослідження дозволяє підвищити ефективність господарської діяльності підприємств за рахунок автоматизації процесів визначення оптимального маршруту доставки товарів та варіанту пакування транспортного засобу. До результатів, що мають практичне значення, відносяться методика розв'язання цих задач, а також розроблене програмне забезпечення, яке забезпечує швидке й ефективне отримання результатів. Програмне забезпечення було розроблене, враховуючи специфіку господарювання ТОВ «Укрлогістика», і рекомендується до застосування в умовах підприємства.

Список використаних джерел:

1. Луцан М.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с палетированием контейнеров. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2014. № 7 (156). С. 196–204.
2. Жуков Л.А., Корчевская О.В. Метод плоскостей: численный эксперимент для задач двух и трехмерной ортогональной упаковки. *Информационные технологии*. 2008. № 11. С. 41–45.
3. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. Киев : Наук. Думка, 1986. 286 с.
4. Bortfeldt A., Wascher G. Constraints in container loading: a state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 229. Is. 1. P. 1–20.
5. Юсупова Н.И., Валеева А.Ф., Рассадникова Е.Ю., Кошечев И.С., Латыпов И.М. Многокритериальная задача доставки грузов различным потребителям. *Логистика и управление цепями поставок*. 2011. Т. 5, № 46. С. 60–82.
6. Мухачева Э.А., Рубинштейн Г.Ш. Математическое программирование. Новосибирск : Наука СО, 1987. 272 с.
7. Романовский И.В., Христова Н.П. Решение дискретных минимаксных задач методом дихотомии. *Журнал вычислительной математики и матем. физики*. 1973. Т. 13, № 5. С. 1200–1209.
8. Кацев С.В. Об одном классе дискретных минимаксных задач. *Кибернетика*. 1979. Т. 5. С. 139–141.

9. Романовский И.В. Алгоритмы решения экстремальных задач. Москва : Наука, 1977. 170 с.
10. Мухачева Э.А. Обзор и перспективы развития комбинаторных методов решения задач раскроя и упаковки. *Дискретный анализ и исследование операций*. Новосибирск, 2002. С. 80–87.
11. Стоян Ю.Г., Сёмкин В.В., Чугай А.М. Моделирование плотной упаковки 3D-объектов. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. Т. 52, № 2. С. 137–146.
12. Kallrath J. Cutting circles and polygons from area-minimizing rectangles. *Journal of Global Optimization*. 2009. № 43. С. 299–328.
13. Lodi S., Martello, Vigo D. TSpack: A Unified Tabu Search Code for Multi Dimensional Bin Packing Problem. *Annals of Operations Research*. Kluwer Academic Publishers, 2004. Т. 131. С. 203–213.
14. Crainic T., Perboli G., Tadei R. TS2 Pack: A two-level tabu search for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research*. 2009. С. 744–760.
15. Brusco M.J., Thompson G.M., Jacobs L.W. A morph-based simulated annealing heuristic for a modified bin-packing problem. *Journal of the Operational Research Society*. 1997. Т. 48, 4. С. 433–439.
16. Валеева А.Ф., Сиразетдинова Т.Ю. Применение метаэвристики «имитация отжига» для задачи гильотинного прямоугольного раскроя. *Междунар. Уфимск. зимн. шк.- конф. по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых*. Уфа, 2005. С. 99.
17. Liu D., Teng H. An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles. *European Journal of Operational Research*. 1999. 112. С. 413–420.
18. Hifi M., M'Hallah R. A dynamic adaptive local search algorithm for the circular packing problem. *European Journal of Operational Research*. 2007. С. 1280–1294.
19. Levine J., Ducatelte F. Ant colony optimization and local search for bin packing and cutting stock problems. *Journal of the Operational Research Society*. 2004. 55. С. 705–716.
20. Валеева А.Ф. Применение метаэвристики муравьиной колонии к задачам двумерной упаковки. *Информационные технологии*. 2005. С. 36–43.
21. Lin T.D., Hsu C.C., Hsu L.F. Optimization by Ant Colony Hybrid Local Search for Online Class Constrained Bin Packing Problem. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. № 311. С. 123–128.
22. Singh N.K., Baidya S. A Novel Work for Bin Packing Problem by Ant Colony Optimization. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. С. 71–73
23. Terashima-Marín H., Ross P., Fariás-Zárate C. J., López-Camacho E., Valenzuela-Rendón M. Generalized hyper-heuristics for solving 2D Regular and Irregular Packing Problems. *Annals of Operations Research*. 2010. Т. 179, № 1. С. 369–392.
24. Burke E.K., Kendall G. Parallel Problem Solving from Nature, PPSN XI. *A Hyper-Heuristic Approach to Strip Packing Problems*. Kraków, 2010. Т. 1. С. 465–474.
25. López-Camacho E., Terashima-Marín H., Ross P., Ochoa G. A unified hyperheuristic framework for solving bin packing problems. *Expert Systems with Applications*. 2014. Т. 41, № 15. С. 68–89.
26. Burke E.K., Kendall G. Hyper-heuristics. *Search Methodologies*. Springer Science, 2014. 712 p.
27. Stawowy A. Evolutionary based heuristic for bin packing problem. *Computers and Industrial Engineering*. 2008. Т. 55, № 2. С. 465–474.
28. Lodi A., Martello S., Vigo D. Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research*. 2002. № 141. С. 410–420.
29. Dousland K.A., Dousland W.B. Packing problems. *European Journal of Operational Research*. 1992. № 56. С. 2–14.
30. Tarnowski T., Terno J., Scheithauer G. A polynomial time algorithm for the guillotine pallet loading problem. *INFOR*. 1994. № 32. С. 275–287.
31. Норенков И.П. Эвристики и их комбинации в генетических методах дискретной оптимизации. *Информационные технологии*. 1999. № 1. С. 27.
32. Лозовська Л.І., Зелік В.О. Розробка системи формування маршруту доставки товарів. *Економічна кібернетика: аспекти становлення і розвитку електронної економіки* : збірник наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Дніпро, 1–2 березня 2017 р. Дніпро : Пороги, 2017. С. 37–42.

References:

1. Lutsan M.V., Nuzhnov E.V. (2014) Resheniye zadachi trekhmernoy upakovki s paletirovaniyem konteynerov [Solution of the problem of three-dimensional packaging with palletizing containers]. *Izvestia SFedU. Tekhnicheskkiye nauki*, no. 7 (156), pp. 196–204.
2. Zhukov L.A., Korchevskaya O.V. (2008) Metod ploskostey: chislennyy eksperiment dlya zadach dvukh i trekhmernoy ortogonal'noy upakovki [Plane Method: A Numerical Experiment for 2D and 3D Orthogonal Packing Problems]. *Informatsionnyye tekhnologii*, no. 11, pp. 41–45.
3. Stoyan YU.G., Yakovlev S.V. (1986) Matematicheskiye modeli i optimizatsionnyye metody geometricheskogo proyektirovaniya [Mathematical models and optimization methods for geometric design]. Kyiv: Naukova dumka, 286 p.
4. Bortfeldt A., Wascher G. (2013) Constraints in container loading: a state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, vol. 229, is. 1, pp. 1–20.
5. Yusupova N.I., Valeyeva A.F., Rassadnikova Ye.YU., Koshcheyev I.S., Latypov I.M. (2011) Mnogokriterialnaya zadacha dostavki gruzov razlichnym potrebitelyam [Multi-criteria problem of cargo delivery to various consumers]. *Logistika i upravleniye tsepyami postavok*, vol. 5, 46, pp. 60–82.
6. Mukhacheva E.A., Rubinshteyn G.S.H. (1987) Matematicheskoye programmirovaniye [Mathematical programming]. Nauka SO, 272 p.
7. Romanovskiy I.V., Khristova N.P. (1973) Resheniye diskretnykh minimaksnykh zadach metodom dikhotomii [Solution of discrete minimax problems by the dichotomy method]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, vol. 13, no. 5, pp. 1200–1209.

8. Katsev S.V. (1979) Ob odnom klasse diskretnykh minimaksnykh zadach [On a class of discrete minimax problems]. *Kibernetika*, vol. 5, pp. 139–141.
9. Romanovskiy I.V. (1977) *Algoritmy resheniya ekstremal'nykh zadach* [Algorithms for solving extreme problems]. Nauka, 170 p.
10. Mukhacheva E.A. (2002) Obzor i perspektivy razvitiya kombinatornykh metodov resheniya zadach raskroya i upakovki [Review and development prospects of combinatorial methods for solving cutting and packing problems]. *Diskretnyy analiz i issledovaniye operatsiy*, pp. 80–87.
11. Stoyan YU.G., Somkin V. V., Chugay A.M. (2016) Modelirovaniye plotnoy upakovki 3D-ob'yektov [Modeling dense packing of 3D objects]. *Kibernetika i sistemnyy analiz*, vol. 52, no. 2, pp. 137–146.
12. Kallrath J. (2009) Cutting circles and polygons from area-minimizing rectangles. *Journal of Global Optimization*, no. 43, p. 299–328.
13. Lodi S, Martello, Vigo D. Lodi (2004) TSpack: A Unified Tabu Search Code for MultiDimensional Bin Packing Problem. *Annals of Operations Research*, vol. 131, pp. 203–213.
14. Crainic T.G., Perboli G., Tadei R. (2009) TS2Pack: A two-level tabu search for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research*, pp. 744–760.
15. Brusco M.J., Thompson G.M., Jacobs L.W. (1997) A morph-based simulated annealing heuristic for a modified bin-packing problem. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no. 4, pp. 433–439.
16. Valeyeva A.F., Sirazetdinova T.YU. (2005) Primeneniye metaevristiki «imitatsiya otzhiga» dlya zadachi gil'otinnogo pryamougol'nogo raskroya [Application of the “simulated annealing” metaheuristic for the task of guillotine rectangular cutting]. *Mezhdunar. Ufmsk. zimn. shk.–konf. po matematike i fizike dlya studenov, aspirantov i molodykh uchenykh*, p. 99.
17. Liu D., Teng H. (1999) An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles. *European Journal of Operation Research*, no. 112, pp. 413–420.
18. Hifi M., M'Hallah R. (2007) A dynamic adaptive local search algorithm for the circular packing problem. *European Journal of Operational Research*, pp. 1280–1294.
19. Levine J., Ducatelle F. (2004) Ant colony optimization and local search for bin packing and cutting stock problems. *Journal of the Operational Research Society*, no. 55, pp. 705–716.
20. Valeyeva A.F. (2005) Primeneniye metaevristiki murav'inoy kolonii k zadacham dvukhmernoy upakovki [Application of ant colony metaheuristics to 2D packing problems]. *Informatsionnyye tekhnologii*, pp. 36–43.
21. Lin T.D., Hsu C.C., Hsu L.F. (2013) Optimization by Ant Colony Hybrid Local Search for Online Class Constrained Bin Packing Problem. *Applied Mechanics and Materials*, no. 311, pp. 123–128.
22. Singh N.K., Baidya S. (2013) A Novel Work for Bin Packing Problem by Ant Colony Optimization. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 71–73.
23. Terashima-Marin H., Ross P., Farias-Zárate C.J., López-Camacho E., Valenzuela-Rendón M. (2010) Generalized hyper-heuristics for solving 2D Regular and Irregular Packing Problems. *Annals of Operations Research*, vol. 179, no. 1, pp. 369–392.
24. Burke E.K., Guo Q., Kendall G. (2010) Parallel Problem Solving from Nature, PPSN XI. *A Hyper-Heuristic Approach to Strip Packing Problems*, vol. 1, pp. 465–474.
25. López-Camacho E., Terashima-Marin H., Ross P., Ochoa G. (2014) A unified hyperheuristic framework for solving bin packing problems. *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no.15, pp. 68–89.
26. Ross P., Burke E.K., Kendall G. (2014) Hyper-heuristics. *Search Methodologies*, 214 p.
27. Stawowy A. (2008) Evolutionary based heuristic for bin packing problem. *Computers and Industrial Engineering*, vol. 55, no. 2, pp. 465–474.
28. Lodi A., Martello S., Vigo D. (2002) Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research*, no. 141, pp. 410–420.
29. Dousland K.A., Dousland W.B. (1992) Packing problems. *European Journal of Operational Research*, no. 56, pp. 2–14.
30. Tarnowski T., Terno J., Scheithauer G. (1994) A polynomial time algorithm for the guillotine pallet loading problem. *INFOR*, no. 32, pp. 275–287.
31. Norenkov I.P. (1999) Evristiki i ikh kombinatsii v geneticheskikh metodakh diskretnoy optimizatsii [Heuristics and their combinations in genetic discrete optimization methods]. *Informatsionnyye tekhnologii*, no. 1, p. 27.
32. Lozovska L.I., Zelik V.O. (2017) Rozrobka systemy formuvannya marshrutu dostavky tovariv [Development of a system for forming the route of delivery of goods]. *Ekonomichna kibernetika: aspekty stanovlennya i rozvytku elektronnoyi ekonomiky: zbirnyk naukovykh prats' za materialamy Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi*, pp. 37–42.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ОБЪЕМНОЙ УПАКОВКИ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы решения задач об оптимальной упаковке. Исследованы существующие теоретические подходы, концепции и методики решения этих задач, определены исходные и результирующие параметры экономико-математической модели, исследованы и разработаны этапы расчета варианта упаковки, практически реализован алгоритм нахождения близкого к оптимальному варианту решения задачи определения маршрута доставки товаров и упаковки транспортного средства, который заключается в применении комбинированного алгоритма, генетического и эволюционного, что улучшает качество решения и скорость его нахождения. Практическое использование полученных результатов заключается в повышении эффективности деятельности предприятий за счет автоматизации процесса определения варианта упаковки транспортного средства.

Ключевые слова: логистика, маршрут, доставка товаров, генетический алгоритм, эволюционный алгоритмы, задача упаковки.

DEVELOPING AN INFORMATION SYSTEM TO SOLVE CERTAIN PROBLEMS OF VOLUME PACKING

Summary. In this paper we study optimal packing problems. The three-dimensional packing problem is known to be NP-complete. Currently, the best known optimal algorithms for NP-complete problems are basically brute-force, with exponential time complexity. This means that even for small input sets (~50 items) the execution time for naive implementations can amount to years, even if a modern supercomputer is used. Furthermore, practical applications pose an additional problem, as often there are extra restrictions on the acceptable solutions for packing, such as certain items must be placed in a certain way in a certain space. The restrictions can be diverse and their exact nature is highly dependent on the circumstances and requirements of the organization which needs to solve practical packing problems. We explore existing theoretical approaches, concepts, and methodologies applicable to the specified problem space. We define the desired output parameters of economic-mathematical model, then research and develop stages of packing computations, and implement a practical algorithm for finding an approximate solution. The optimization problem we consider involves packing cargo into the vehicle and delivery of the cargo to drop-off points following an optimal route. The developed algorithm is a combination of genetic and evolutionary algorithms, which improves the quality of the resulting solutions as well as the computational performance of the algorithm. The problem we consider has practical significance as computational solutions to packing problems enable organizations to improve their operational efficiency by automating the processes of routing deliveries and loading vehicles. The developed solution and the software implementing it are also practically significant as it provides quick and efficient way to achieve results. The software has been developed with considerations to operations of Ukrlogistika LLC. Testing results indicate that the developed application is ready for enterprise use. The application has a convenient and intuitive user interface. It should simplify and speed up the workflow in the transport logistics department of Ukrlogistics LLC as well as reduce the transportation costs.

Key words: logistics, routing, shipment delivery, genetic algorithms, evolutionary algorithms, packing problem.