

## Раздел I. Интеллектуальные системы

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2020-2-6-16

**В.В. Курейчик, А.Е. Глущенко**

### **МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТРЕХМЕРНОЙ УПАКОВКИ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ\***

*Рассмотрена одна из важных комбинаторных задач оптимизации – задача трехмерной упаковки разногабаритных элементов в объеме. Она относится к классу NP-сложных и трудных оптимизационных задач. В работе приведена и описана постановка задачи трехмерной упаковки в объеме, введена комбинированная целевая функция учитывающая все ограничения. В связи со сложностью данной задачи предлагается многоуровневый подход заключающийся в разделении задачи трехмерной упаковки на 3-и подзадачи и решения каждой подзадачи в строгом порядке. При этом для каждой из подзадач определен уникальный набор объектов, не повторяющихся в остальных подзадачах. Для реализации многоуровневого подхода авторами разработан комбинированный биоинспирированный алгоритм, основанный на эволюционном и генетическом поиске. Такой подход позволяет значительно сократить время получения результата, частично решить проблему предварительной сходимости алгоритмов и получить наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время. Разработан программный комплекс и реализованы на ЭВМ алгоритмы автоматизированной трехмерной упаковки на основе комбинированного биоинспирированного поиска. Проведен вычислительный эксперимент на тестовых примерах (бенчмарках). Качество упаковки, полученное, на основе разработанного комбинированного биоинспирированного алгоритма, в среднем на 5 % превосходит результаты упаковки, полученные с использованием известных алгоритмов, а время решения меньше от 5 % до 20 %, что говорит об эффективности предложенного подхода. Проведенные серии тестов и экспериментов позволили уточнить теоретические оценки временной сложности алгоритмов упаковки. В лучшем случае временная сложность алгоритмов  $O(n^2)$ , в худшем случае –  $O(n^3)$ .*

*Трехмерная упаковка; упаковка в контейнеры; многоуровневый подход; комбинированный биоинспирированный алгоритм; генетический алгоритм; эволюционный алгоритм.*

**V.V. Kureichik, A.E. Glushchenko**

### **MULTILEVEL APPROACH FOR HIGH DIMENSIONAL 3D PACKING PROBLEM**

*The article considers one of the important combinatorial optimization problems, the problem of 3D packing of different elements in a fixed volume. It belongs to the class of NP-complex and difficult optimization problems. The paper presents and describes the formulation of the 3D packing problem, introduces a combined objective function that takes into account all the restrictions. Due to the complexity of this task, a multilevel approach is proposed. It is consisting in dividing the 3D packing problem into 3 subtasks and solving each subtask in a strict order. Moreover, for each of the subtasks a unique set of objects is defined that are not repeated in the remaining subtasks. To implement a multi-level approach, the authors developed a combined bio-inspired algorithm based on*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00148.

*evolutionary and genetic search. This approach can significantly reduce the time to obtain the result, partially solve the problem of preliminary convergence of the algorithms and obtain sets of quasi-optimal solutions in polynomial time. A software package was developed and computer-based algorithms for automated 3D packaging based on a combined bio-inspired search were implemented. A computational experiment was conducted on test examples (benchmarks). The packaging quality obtained on the basis of the developed combined bio-inspired algorithm is on average 5 % higher than the packaging results obtained using known algorithms, and the solution time is less than 5 % to 20 %, which indicates the effectiveness of the proposed approach. The series of tests and experiments carried out made it possible to refine the theoretical estimates of the time complexity of the packaging algorithms. In the best case the time complexity of the  $O(n^2)$  algorithms; in the worst,  $O(n^3)$ .*

*Three-dimensional packaging; packing in containers; multi-level approach; combined bio-inspired algorithm; genetic algorithm; evolutionary algorithm.*

**Введение.** Массовое увеличение товарооборота оказывает влияние и на транспортировку продуктов в контейнерах, которая ежегодно составляет более 69 % от всех объемов перевозок. Число контейнерных перевозок в период с 2009 по 2019 г.г. выросла более чем на 34 %. Рост связан с постоянным наращиванием производственных мощностей, способствующих увеличению производства и разнообразия товаров [1–3], в связи с чем возникает необходимость в увеличении объемов грузооборота и уменьшению сокращением времени доставки продуктов конечному покупателю. Путей решения данной проблемы существует несколько: увеличение количества транспортных средств, способных перевозить товары, оптимизация транспортной логистики. Оптимальным путем и, зачастую единственным, является оптимизация (уплотнение) упаковки товаров с помощью новых методов и подходов к решению задачи трехмерной упаковки. Плотность (эффективность) упаковки оказывает большое влияние на стоимость и скорость доставки товаров. Для решения данной задачи, многие компании внедряют системы автоматизированного проектирования (САПР). Снижение материальных затрат, увеличение качества проектирования, снижение сроков проектирования, являются основными целями автоматизации.

Основными критериями грузовых перевозок являются – время обработки заказа, скорость доставки грузов до конечного потребителя, а также возможность перемещения наибольшего количества грузов на одном транспортном средстве.

Трехмерная упаковка является NP-трудной и NP-сложной задачей, не имеющей точных алгоритмов ее решения за полиномиальное время [1–14]. В настоящее время разработанные алгоритмы трехмерной упаковки позволяют получать приемлемые результаты за разумное время только для задач небольшой размерности, в остальных случаях решение задачи может занимать неприемлемо много времени.

В связи с вышеизложенным, создание новых подходов, методов и алгоритмов решения задачи трехмерной упаковки большой размерности является актуальной и важной задачей.

Постановка задачи трехмерной упаковки. Исходными данными задачи упаковки являются:

- ◆ область трехмерного пространства;
- ◆ список блоков;
- ◆ набор ограничений.

Дадим формальное описание задачи упаковки грузов в ограниченном трехмерном пространстве. Дана область трехмерного пространства шириной  $W$ , длиной  $L$  и высотой  $H$ . Также дано множество блоков  $A=\{a_i\}$  количеством  $N$ . Все множество блоков разбито на множество типов  $T=\{t_j\}$ , количество каждого типа указывается пользователем. Каждый тип определяет заданные параметры каждого блока, такие как, длина, ширина, высота и вес, ориентация по умолчанию [5–12].

Критерий – это отношение суммарного объема упакованных блоков к объему трехмерной области размещения. Таким образом, снижается расход на транспортировку грузов из-за их более компактного распределения. Результаты решения задачи в виде плана погрузки позволяют заказчику за один рейс перевезти большее количество товара. Количество совершаемых рейсов уменьшается и следовательно уменьшается стоимость грузоперевозок и эффективность процесса транспортировки [4].

Каждый тип груза характеризуется кортежем длины 4  $\langle l_i, w_i, h_i, m_i \rangle$ , где  $l_i, w_i, h_i$  – габаритные размеры элемента,  $m_i$  – площадь блока. В ходе решения задачи положение элементов, обозначенное заданным типом, в пространстве задается множеством  $S = \{s_i = \langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle \mid i=1, 2, \dots, n\}$ , где  $\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle$  – координаты углов элемента – самого близкого к началу осей координат и самого удаленного соответственно [5–12].

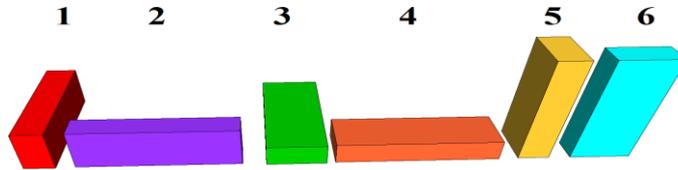


Рис. 1. Пример возможного расположения блоков в пространстве

Так же имеется параллелепипед  $M = \{L, W, H\}$ , где  $L, W, H$  – габаритные размеры области упаковки.

Используя критерий  $V$  – это отношение объема упакованных блоков к объему параллелепипеда  $V_{\text{кон}}$ , требующийся для упаковки всех элементов, введем следующие ограничения [12]:

1) ни один элемент не может выходить за границы заданного объема, т.е. удовлетворять системе неравенств (формула 1):

$$\begin{cases} x_{1i} \geq 0; \\ y_{1i} \geq 0; \\ z_{1i} \geq 0; \\ x_{2i} \leq L_x; \\ y_{2i} \leq W_y; \\ z_{2i} \leq H_z. \end{cases} \quad (1)$$

2) суммарный объем элементов не должен превышать объема области упаковки (формула 2):

$$\sum_{i=1}^n (l_i \cdot w_i \cdot h_i) \leq L_x \cdot W_y \cdot H_z. \quad (2)$$

3) отсутствие пересечений [7] (т.е. в одну область пространства нельзя поместить два объекта) (формула 3):

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

4) суммарный вес всех блоков не может превышать заданный лимит (формула 4):

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

где  $G_{\text{бл}}$  – вес блока;  $G_{\text{лим}}$  – максимальный вес всех блоков.

- 5) все элементы должны опираться своим основанием на поверхность;  
 6) элементы должны лежать перпендикулярно заданной области.

Критерием оптимизации является объем, занимаемый блоками. Целевая функция имеет вид (формула 5):

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

где  $V_{\text{бл}}$  – объем каждого блока,  $V_{\text{кон}}$  – объем контейнера.

Это означает, что необходимо стремиться к уменьшению пустот в области упаковки. Максимально эффективный результат решения задачи, когда целевая функция (ЦФ) равна 1, область упаковки заполнена на 100 %.

Данная ЦФ не полностью учитывает всех критериев задачи трехмерной упаковки контейнеров, поэтому в работе авторы предлагают использовать комбинированную целевую функцию:

$$\text{ЦФ} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V} \times Q^1 + P^2 \times Q^2 + P^3 \times Q^3 + P^4 \times Q^4, \quad (6)$$

где  $P^2$  – отношение числа упакованных блоков в контейнер к числу всех блоков, подлежащих упаковке;  $P^3$  – число блоков одного размера, упакованных подряд так, что их стороны соприкасаются;  $P^4$  – отношение горизонтально ориентированных блоков к числу всех блоков, подлежащих упаковке;  $Q^1$  – коэффициент важности заполненности контейнера;  $Q^2$  – коэффициент важности числа упакованных блоков в контейнер;  $Q^3$  – коэффициент важности упаковки блоков одного размера с одинаковыми сторонами друг к другу;  $Q^4$  – коэффициент важности упаковки блоков горизонтально ориентированно. Коэффициенты  $Q^1$ ,  $Q^2$ ,  $Q^3$ ,  $Q^4$  устанавливаются лицом принимающим решение на основе опыта эксперта.  $P^2$ ,  $P^3$  и  $P^4$  вычисляются при расчёте ЦФ. Задача – максимизация целевой функции:  $\text{ЦФ} \rightarrow \max$ .

Многоуровневый подход для решения задачи трехмерной упаковки большой размерности. В настоящее время выделяют следующие подходы к решению NP-сложных задач. Первый подход – это упрощение алгоритмов, т.е. снижение их вычислительной сложности за счет применения эвристических процедур [5, 6, 8–14]. Второй подход – это упрощение решаемых задач за счет уменьшения их размерности или их декомпозиции [15, 16].

Используя гибридизацию этих двух подходов, в работе используется метод, который позволяет реализовывать различные виды алгоритмов на разных уровнях поиска.

Многоуровневый подход заключается в разделении задачи трехмерной упаковки на 3-и подзадачи и решения каждой подзадачи в строгом порядке [17]. При этом для каждой из подзадач определен уникальный набор объектов, не повторяющихся в остальных подзадачах. Такой подход позволяет значительно сократить время работы алгоритмов, а также позволит сохранить лучший результат решения 1-й подзадачи, который остается статичным. Для реализации многоуровневого подхода авторы предлагают комбинированный биоинспирированный алгоритм рис. 2 [12, 18].

Рассмотрим более подробно этапы работы комбинированного биоинспирированного алгоритма трехмерной упаковки:

- ♦ на первом этапе лицо принимающее решение (ЛПР) вводит основные параметры: размеры области упаковки, размеры и количество объектов упаковки, параметры сортировки объектов в группы, вероятности применения оператора кроссинговера и операторов мутации, а также критерий остановки;

- ◆ на втором этапе происходит генерация начальной популяции. Сгенерированные блоки изменяют свою ориентацию в пространстве, если блок повернуть нельзя, то происходит регенерация с последующей проверкой;
- ◆ на третьем этапе оцениваются габариты каждого блока (длина, ширина, высота, объем);

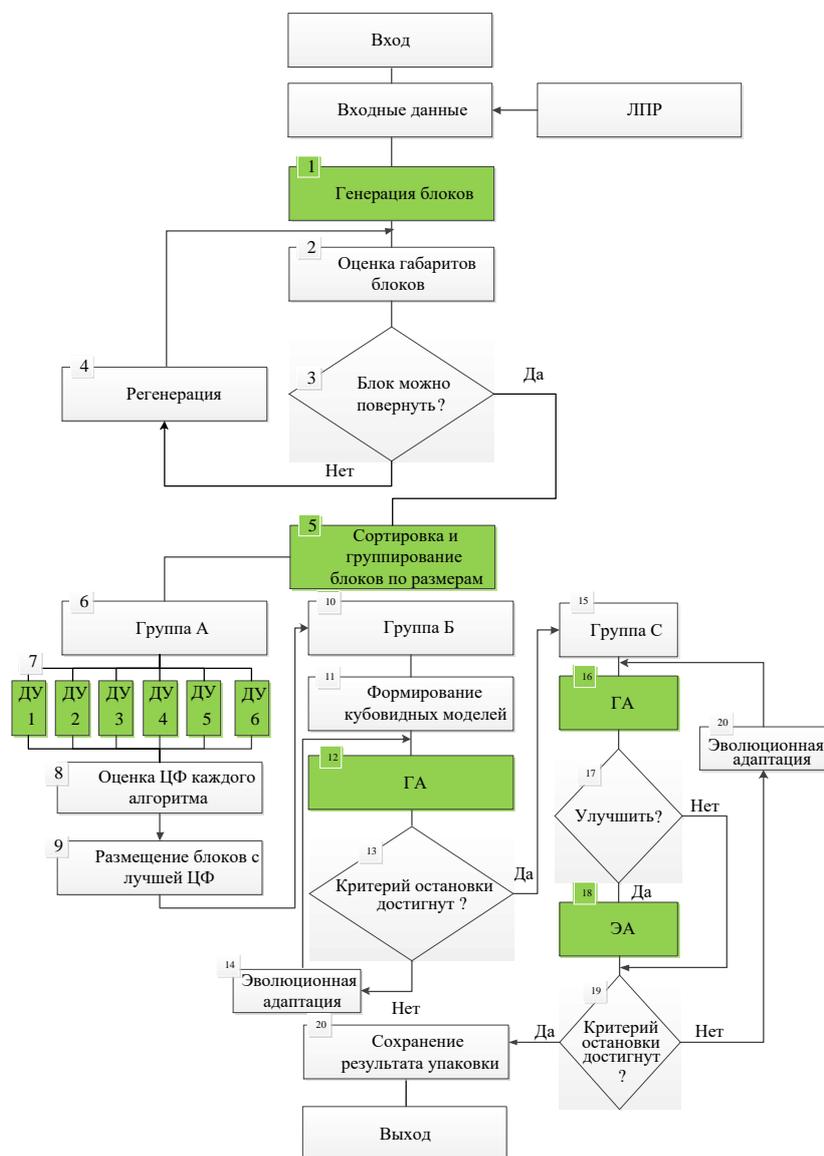


Рис. 2. Укрупненная схема комбинированного биоинспирированного алгоритма

- ◆ на четвертом этапе проводится сортировка блоков. Рассмотрим сортировку блоков более подробно:

1) Блоки одинаковых размеров объединяются в отдельные подгруппы ( $A_1, A_2, A_3, \dots, A_i$ ), которые помещаются в группу А. Блоки без пары помещаются в группу С.

2) Подгруппы группы А сортируются по объему. Подгруппы, которые содержат четное количество блоков и объем которых меньше  $Y\%$  (устанавливается ЛПР) помещаются в группу В. Подгруппы, которые содержат нечетное количество блоков и объем которых меньше  $Y\%$  (устанавливается ЛПР) помещаются в группу С.

◆ на пятом этапе проводится размещение блоков группы А. Размещение проводится вдоль левой стенки области упаковки. На данном этапе решается 6 отдельных задач двумерной упаковки по завершению работы которых, выбирается лучшее значение ЦФ. Данный этап повторяется для всех подгрупп группы А. На данном этапе происходит быстрое и эффективное размещение большого количества блоков за минимальное время. На рис. 3 представлен пример размещения подгрупп группы А.

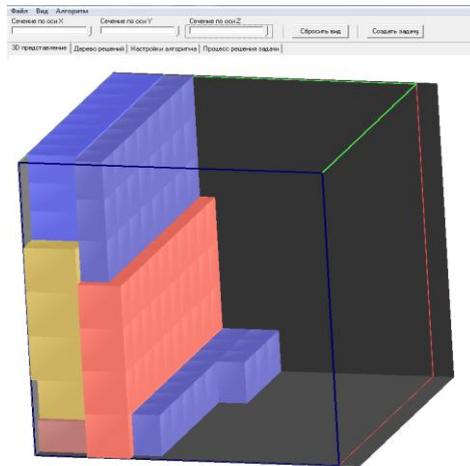


Рис. 3. Пример размещения подгрупп группы А

◆ на шестом этапе подгруппы группы В сортируются по объему. Далее блоки подгруппы В объединяются в кубовидные модели. Кубовидная модель содержит 2 блока, которые присоединяются друг к другу по самой длинной стороне. Данный подход позволяет уменьшить количество блоков, которое необходимо разместить, в 2 раза;

◆ на седьмом этапе сформированные кубовидные модели размещаются при помощи модифицированного генетического алгоритма. Процесс повторяется до тех пор, пока все блоки не будут размещены или критерий остановки не будет достигнут;

◆ на восьмом этапе все не размещенные блоки перемещаются в группу С, которая становится единственной. Далее блоки группы С сортируются по объему. Далее отсортированное количество блоков  $i$  группируется на  $k$  групп по объему, где  $i$  пропорционально  $k$ ;

◆ на девятом и десятом этапах отсортированные подгруппы группы С размещаются при помощи модифицированных генетического и эволюционного алгоритмов (ГА и ЭА) [19]. Размещение происходит с подгруппы блоков имеющих наибольший объем. В случае невозможности разместить блок осуществляется переход к блоку из этой же группы с шагом  $n$  ( $n$  – количество блоков, которое пропускается в выбранной группе при переходе к следующему блоку, при невозможности размещения предыдущего. Значение  $n$  определяет ЛПР), в случае если ни один из блоков группы невозможно разместить в области, осуществляется переход к следующей группе блоков. Процесс повторяется до тех пор, пока все блоки не будут размещены или критерий остановки не будет достигнут.

Применение предложенной схемы поиска имеет следующие преимущества: позволяет быстрее и эффективнее находить оптимальные решения, работать не с одним решением, а с множеством альтернативных решений, присутствует возможность рассматривать более перспективные и удалять заранее неперспективные решения.

**Вычислительный эксперимент.** Разработана программная среда для решения задачи трехмерной упаковки. При построении комплекса программ использовались пакеты Visual C++, Borland C++, Builder. Отладка и тестирование разработанных алгоритмов выполнялось на компьютере типа IBM PC с процессором *ryzen 5 3600x* с ОЗУ-16Гб. Проведен вычислительный эксперимент. Для определения эффективности разработанного комбинированного алгоритма были проведены исследования времени и качества решения для разного набора тестовых примеров (бенчмарок), различающихся количеством блоков [12, 20, 21]. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и 2, а также на рис. 4 и 5.

Таблица 1

## Сравнение качества решений разработанного алгоритма с аналогами

| Количество блоков | ЭА   | ГА   | Разработанный алгоритм | Тестовые примеры esicup № 1 | Тестовые примеры esicup № 2 |
|-------------------|------|------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 500               | 0,63 | 0,65 | 0,55                   | 0,62                        | 0,6                         |
| 1000              | 0,66 | 0,71 | 0,79                   | 0,81                        | 0,8                         |
| 1500              | 0,73 | 0,77 | 0,86                   | 0,83                        | 0,81                        |
| 2000              | 0,74 | 0,78 | 0,9                    | 0,88                        | 0,86                        |
| 2500              | 0,76 | 0,81 | 0,92                   | 0,9                         | 0,88                        |

Таблица 2

## Сравнение времени работы разработанного алгоритма с аналогами

| Количество блоков шт. | ЭА  | ГА  | Разработанный алгоритм | Тестовые примеры esicup № 1 | Тестовые примеры esicup № 2 |
|-----------------------|-----|-----|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 500                   | 15  | 22  | 28                     | 23                          | 25                          |
| 1000                  | 35  | 46  | 69                     | 60                          | 63                          |
| 1250                  | 64  | 81  | 105                    | 120                         | 125                         |
| 1500                  | 84  | 97  | 144                    | 149                         | 155                         |
| 1750                  | 176 | 218 | 261                    | 280                         | 310                         |
| 2000                  | 224 | 251 | 320                    | 370                         | 401                         |

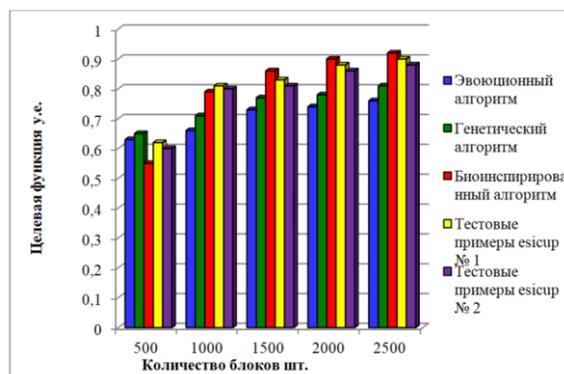


Рис. 4. Гистограмма сравнения значений целевой функции алгоритмов упаковки от числа блоков

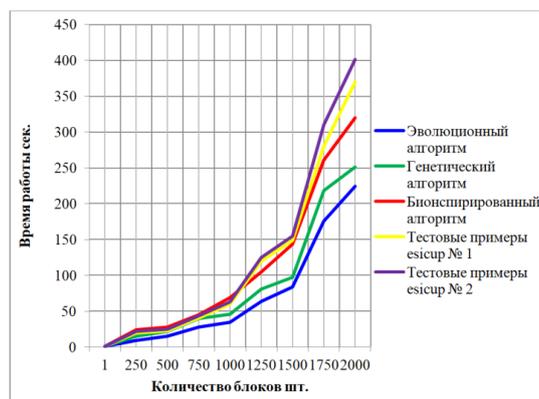


Рис. 5. Гистограмма сравнения времени работы алгоритмов упаковки от числа блоков

В результате анализа представленных таблиц и графиков зависимостей можно сделать вывод, что разработанный комбинированный бионспирированный алгоритм при упаковке небольшого числа блоков получает менее качественные решения, используя большее количество времени, чем известные алгоритмы, но при упаковке большого числа блоков 1500 и более, разработанный комбинированный бионспирированный алгоритм позволяет лучше производить упаковку блоков в среднем на 5 %, чем известные алгоритмы, затрачивая при этом меньше времени от 5 % до 20 % в зависимости от числа блоков, что говорит об эффективности предложенного подхода.

**Заключение.** Предложен многоуровневый подход для решения задачи трехмерной упаковки большой размерности. Отличительной особенностью данного подхода является разбиение задачи на несколько подзадач, с последовательным решением каждой задачи, при этом каждая подзадача имеет уникальный набор блоков для размещения. Для реализации этого подхода разработан комбинированный бионспирированный алгоритм, позволяющий получать наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время и частично решать проблему предварительной сходимости алгоритмов. Разработана программная среда на языке C++. Проведен вычислительный эксперимент. Проведенные экспериментальные исследования показали преимущество использования разработанного многоуровневого подхода для решения задач трехмерной упаковки большой размерности (свыше 1500 блоков), по сравнению с известными методами.

Качество упаковки, полученное, на основе разработанного комбинированного бионспирированного алгоритма, в среднем на 5 % превосходит результаты упаковки, полученные с использованием известных алгоритмов, а время решения меньше от 5 % до 20 %, что говорит об эффективности предложенного подхода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Koide S., Suzuki S., Degawa S. A Palletize-Planning System for Multiple Kinds of Loads using GA Search and Traditional Search // Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. IEEE. – 1995. – Vol. 3. – P. 510-515.
2. Мухачева Э.А., Мухачева А.С. Технология блочных структур локального поиска оптимума в задачах прямоугольной упаковки // Информационные технологии. – 2004. – № 5. Приложение. – С. 19-31.
3. Юдаков П.В. Задача о трехмерной упаковке и методы ее решения. Обзор // Инженерный вестник. – 2015. – № 06. – С. 552-581.

4. Луцан М.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с палетированием контейнеров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 196-204.
5. Нужнов Е.В., Барлит А.В. Трехмерная упаковка несвязных элементов на основе эвристических процедур. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – С. 23-28.
6. Псиола В.В. О приближенном решении 3-х мерной задачи об упаковке на основе эвристики // Интеллектуальные системы. – 2007. – № 11. – Вып. 1-4. – С. 83-101.
7. 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.
8. Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Скубриева Е.С. Решение задачи трехмерной упаковки разногабаритных объектов с использованием бионических методов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (144). – С. 35-41.
9. Тимофеева О.П., Соколова Э.С., Милов К.В. Генетический алгоритм в оптимизации упаковки контейнеров // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 4 (101). – С. 167-172.
10. Gehring H., Bortfeldt A. A genetic algorithm for solving the container loading problem // International Transactions in Operational Research. – 1997. – Vol. 4, Iss. 5-6. – P. 401-418.
11. Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю. Применение генетического алгоритма решения задачи трехмерной упаковки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 8-14.
12. Курейчик В.В., Глуценко А.Е., Орлов А.Н. Гибридный подход для решения задачи 3-х мерной упаковки // Известия ЮФУ Технические науки. – 2016. – № 6 (179). – С. 45-53.
13. Курейчик В.М., Курейчик Л.В. Комплексный метод упаковки блоков // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2015. – № 1 (21). – С. 17-26.
14. Chauny F.A. Bloc Heuristic for the Container Loading Problem // Grouped'études et de recherche en analyse des decisions, Montréal. – 2005. – P. 1-18.
15. Базилевич Р.П. Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного конструирования электронных устройств: монография. – Львов: Вишашкола, 1981. – 81 с.
16. Базилевич Р.П. Метод оптимального свертывания схемы – эффективный подход для качественного решения неполиномиальных комбинаторных задач большой и сверхбольшой размерности в автоматизированном конструировании РЭА // Сб. научных трудов «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем». – М.: ИПИМ РАН, 2005. – С. 94-100.
17. Chan F.T.S., Kumar N., Wong T.C. Three-Dimensional Air-Cargo Loading Problem: An Evolutionary Algorithm Based Approach // Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference. – 2006. – P. 758-765.
18. Курейчик В.В., Глуценко А.Е. Комбинированный подход для решения задачи 3-х мерной упаковки разногабаритных элементов // XII Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСА и У-2015). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 75-79.
19. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010.
20. Курейчик В.В., Глуценко А.Е., Курейчик Л.В. Программный комплекс комбинированного поиска для решения задачи трехмерной упаковки // Тр. II Всероссийской научно-технической конференции Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 216-220.
21. Жуков Л.А., Корчевская О.В. Метод плоскостей: численный эксперимент для задач двух и трехмерной ортогональной упаковки // Информационные технологии. – 2008. – № 11. – С. 41-45.

## REFERENCES

1. Koide S., Suzuki S., Degawa S. A Palletize-Planning System for Multiple Kinds of Loads using GA Search and Traditional Search, *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. IEEE*, 1995, Vol. 3, pp. 510-515.
2. Mukhacheva E.A., Mukhacheva A.S. Tekhnologiya blochnykh struktur lokal'nogo poiska optimuma v zadachakh pryamougol'noy upakovki [Technology of block structures for local optimal search in rectangular packing problems], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2004, No. 5. Appendix, pp. 19-31.

3. Yudakov P.V. Zadacha o trekhmernoy upakovke i metody ee resheniya. Obzor [The problem of three-dimensional packaging and methods of its solution. Review], *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2015, No. 06, pp. 552-581.
4. Lutsan M.V., Nuzhnov E.V. Reshenie zadachi trekhmernoy upakovki s paletirovaniem konteynerov [Solving the problem of three-dimensional packaging with container palletization], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 196-204.
5. Nuzhnov E.V., Barlit A.V. Trekhmernaya upakovka nesvyaznykh elementov na osnove evristicheskikh protsedur [Three-dimensional packaging of disconnected elements based on heuristic procedures]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2002, pp. 23-28.
6. Psiola B.V. O priblizhenom reshenii 3-kh mernoy zadachi ob upakovke na osnove evristik [Approximate solution of a 3-dimensional packaging problem based on heuristics], *Intellektual'nye sistemy* [Intelligent system], 2007, No. 11, Issue 1-4, pp. 83-101.
7. Bortfeldt A., Wascher G. Constraints in container loading: a state-of-the-art review, *European Journal of Operational Research*, 2013, Vol. 229, Issue 1, pp. 1-20.
8. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Skubrieva E.S. Reshenie zadachi trekhmernoy upakovki raznogabaritnykh ob'ektov s ispol'zovaniem bionicheskikh metodov [Solving the problem of three-dimensional packaging of multi-dimensional objects using bionic methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (144), pp. 35-41.
9. Timofeeva O.P., Sokolova E.S., Milov K.V. Geneticheskiy algoritm v optimizatsii upakovki konteynerov [Genetic algorithm for optimizing container packaging], *Tr. NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU named after R. E. Alekseev], 2012, No. 4 (101), pp. 167-172.
10. Gehring H., Bortfeldt A. A genetic algorithm for solving the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, 1997, Vol. 4, Issue 5-6, pp. 401-418.
11. Kureychik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu. Primenenie geneticheskogo algoritma resheniya zadachi trekhmernoy upakovki [Application of a genetic algorithm for solving the problem of three-dimensional packaging], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 8-14.
12. Kureychik V.V., Glushchenko A.E., Orlov A.N. Gibridnyy podkhod dlya resheniya zadachi 3-kh mernoy upakovki [Hybrid approach for solving the problem of 3-dimensional packaging], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 6 (179), pp. 45-53.
13. Kureychik V.M., Kureychik L.V. Kompleksnyy metod upakovki blokov [Complex method of packing blocks], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer science, computer engineering and engineering education], 2015, No. 1 (21), pp. 17-26.
14. Chauny F.A. Bloc Heuristic for the Container Loading Problem, *Grouped'études et de recherche en analyse des decisions, Montréal*, 2005, pp. 1-18.
15. Bazilevich R.P. Dekompozitsionnye i topologicheskie metody avtomatizirovannogo konstruirovaniya elektronnykh ustroystv: monografiya [Decomposition and topological methods of automated design of electronic devices: monograph]. L'vov: Vishchashkola, 1981, 81 p.
16. Bazilevich R.P. Metod optimal'nogo svertyvaniya skhemy – effektivnyy podkhod dlya kachestvennogo resheniya nepolinomial'nykh kombinatornykh zadach bol'shoy i sverkhbol'shoy razmernosti v avtomatizirovannom konstruirovanii REA [The method of optimal circuit folding is an effective approach for the qualitative solution of non-polynomial combinatorial problems of large and super-large dimensions in the automated design of REA], *Sb. nauchnykh trudov «Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem»* [Collection of scientific papers "Problems of development of perspective microelectronic systems"]. Moscow: IPPM RAN, 2005, pp. 94-100.
17. Chan F.T.S., Kumar N., Wong T.C. Three-Dimensional Air-Cargo Loading Problem: An Evolutionary Algorithm Based Approach, *Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*, 2006, pp. 758-765.
18. Kureychik V.V., Glushchenko A.E. Kombinirovanny podkhod dlya resheniya zadachi 3-kh mernoy upakovki raznogabaritnykh elementov [Combined approach for solving the problem of 3-dimensional packaging of different-sized elements], *XII Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie (ITSA i U-2015)* [XII all-Russian scientific conference of young scientists, postgraduates and students, information technologies, system analysis and management (ITSA and U-2015)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 75-79.

19. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithm]. Moscow: Fizmatlit, 2010.
20. Kureychik V.V., Glushchenko A.E., Kureychik L.V. Programmy kompleks kombinirovannogo poiska dlya resheniya zadachi trekhmernoy upakovki [Combined search software package for solving the problem of three-dimensional packaging] *Tr. II Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti* [Proceedings of the II all-Russian scientific and technical conference Fundamental and applied aspects of computer technologies and information security]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 216-220.
21. Zhukov L.A., Korchevskaya O.V. Metod ploskostey: chislennyy eksperiment dlya zadach dvukh i trekhmernoy ortogonal'noy upakovki [Method of planes: numerical experiment for two- and three-dimensional orthogonal packing problems], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2008, No. 11, pp. 41-45.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

**Курейчик Владимир Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой САПР; д.т.н.; профессор.

**Глушенко Александр Евгеньевич** – Таганрогская таможня; e-mail: alex-14-93@mail.ru; 347939, г. Таганрог, ул. Чучева, д. 46-2, кв. 29; тел.: 88634371651; Уполномоченный по особо важным делам отдела административных расследований.

**Kureichik Vladimir Victorovich** – Southern Federal University; e-mail: vkur@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; head of CAD department; dr. of eng. sc.; professor.

**Glushchenko Alexander Evgenyevich** – Taganrog customs; e-mail: alex-14-93@mail.ru; 46-2, Chucheva st., apt. 29<sup>th</sup>, Taganrog, 347939, Russia; phone: +78634371651; Commissioner for Special Cases, Division of Administrative Investigations.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2020-2-16-28

**Д.Ю. Кравченко, Ю.А. Кравченко, В.В. Марков**

## **ГИБРИДНЫЙ БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОТОБРАЖЕНИЯ ОНТОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ ИЗВЛЕЧЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ\***

*Статья посвящена решению задачи отображения онтологических моделей в процессах извлечения и управления знаниями. Актуальность и значимость данной задачи обусловлены необходимостью сохранения достоверности и исключения избыточности знаний при интеграции (объединении) структурированных информационных источников различного происхождения. Близость и непротиворечивость понятийной семантики объединенного ресурса при проводимом отображении является основным критерием эффективности предложенных решений. В статье рассмотрены проблемы выбора соответствующих задаче подходов решения, сохраняющих семантику при отображении концептов. Обоснована стратегия выбора биоинспирированного моделирования. Проанализированы аспекты эффективности применения различных децентрализованных биоинспирированных методов. Определены причины необходимости проведения гибридизации. Предложено решать задачу отображения онтологических моделей с применением биоинспирированного алгоритма, построенного на основе гибридизации оптимизационных механизмов алгоритмов бактериального и кукушкиного поиска. Проведенная гибридизация данных алгоритмов позволила объединить их основные преимущества: последовательный бактериальный поиск, обеспе-*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-07-00099 и 18-07-00050.