

М.В. Луцан, Е.В. Нужнов

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТРЕХМЕРНОЙ УПАКОВКИ С ПАЛЕТИРОВАНИЕМ КОНТЕЙНЕРОВ¹

Рассмотрен генетический подход к решению задачи трехмерной плотной упаковки блоков в контейнер, а также модифицированный генетический алгоритм (ГА) для загрузки контейнеров с использованием палет (поддонов). Проблема трехмерной упаковки разногабаритных элементов – задача, возникающая во многих областях промышленности, связана с такими задачами оптимального заполнения пустых объемов, как загрузка трюмов кораблей, товарных вагонов поездов, поддонов, транспортных самолетов, управление складами готовой продукции. Трехмерная упаковка является NP-полной задачей, не имеющей точных алгоритмов ее решения за полиномиальное время [1]. Для решения задач такого типа обычно применяются приближенные алгоритмы, которые дают оптимальные или близкие к ним решения. Помимо самой упаковки блоков важным этапом является определение правильной последовательности расположения упакованных элементов. Это актуально как при автоматизированной, так и неавтоматизированной погрузке-разгрузке контейнеров. Также очень важной для транспортных терминалов является задача палетирования – установки блоков на палеты с последующей загрузкой палет в контейнер.

Трехмерная упаковка; транспортный терминал; палета; палетирование; контейнерные терминалы.

M.V. Lutsan, E.V. Nuzhnov

SOLVING THREE-DIMENSION PACKING PROBLEM WITH PALLETIZING

Genetic approach of three-dimension packing problem in the container is being considered in the article and modified genetic algorithm (GA) for loading container using pallets and also modified genetic algorithm for container loading with palletizing. Three dimension packing problem of different-sized elements is a task which appears in many areas of industry and linked to tasks of optimal loading of space such as ship holds loading, train wagons, pallets, cargo planes, warehouse management. Three-dimension packing is NP-hard problem that does not have exact solution in polynomial time [1]. There are approximate algorithms to solve problems that kind which do optimal or close to optimal solutions. Besides packing itself, there is important stage to identify right sequence of locating packed blocks. This is actual for automated and not automated loading-unloading of containers. Also it is very important for transport terminals to solve palletizing task where blocks are packed on pallets and pallets are packed into containers.

Three-dimension packing; container terminal; pallet; palletizing.

Задача трехмерной упаковки блоков в контейнер. Управление поставками, погрузкой и логистика были определены в качестве основных областей, представляющих интерес для бизнес-аналитиков в современном глобальном конкурентном обществе. Задача трехмерной упаковки разногабаритных прямоугольных блоков обладает актуальностью и важностью и, в то же время, является сложной для решения [2, 3].

Имеется множество n размещаемых объектов (блоков), $i=1, 2, \dots, n$. Каждый i -й блок характеризуют три параметра – ширина (w_i), длина (l_i) и высота (h_i), также ориентация (поворот) в трехмерном пространстве (рис. 1). Также дана пустая область размещения (контейнер), имеющая форму параллелепипеда с заданной шириной (W), длиной (L) и высотой (H).

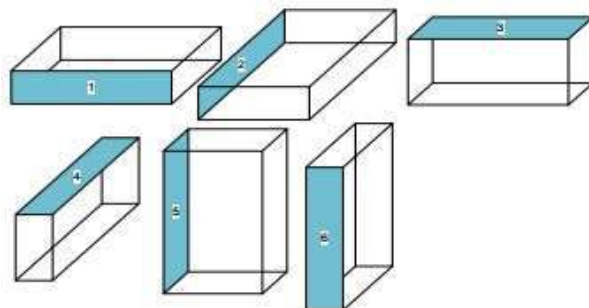


Рис. 1. Возможные ориентации в пространстве

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 13–07–00450).

Каждый упакованный блок характеризуется двумя координатами: $\langle x_1, y_1, z_1 \rangle$ и $\langle x_2, y_2, z_2 \rangle$, где первыми записаны координаты нижнего левого угла (наиболее близкого к началу координат $\langle 0, 0, 0 \rangle$), а вторыми – координаты с наибольшими значениями. Таким образом, решение задачи имеет вид $S = \{s_i = (\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$.

Целевая функция (ЦФ). В наибольшей степени специфику рассматриваемой задачи отражают следующий критерий оптимизации ЦФ [4, 5]:

$$\text{ЦФ} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V},$$

где v_i – объем i -го элемента, V – объем области упаковки [4]. Оценка критерия: следует стремиться к уменьшению суммарного объема пустот в описывающем параллелепипеде (ЦФ $\rightarrow 1$).

Но данная ЦФ не полностью учитывает все критерии задачи трехмерной упаковки контейнера. Поэтому в работе предлагается многокритериальная ЦФ:

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

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^3 – отношение объема блоков, размещенных на палетах, к числу палет; 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. Значения коэффициентов Q^1, Q^2, Q^3, Q^4 устанавливаются экспериментально. P^2 и P^3, P^4 вычисляются при расчёте ЦФ. Задача ГА – максимизация целевой функции: ЦФ $\rightarrow \max$.

Способы кодирования и декодирования хромосомы. Задача трехмерной упаковки представляет собой последовательное размещение трехмерных блоков в ограниченном пространстве. Поэтому для кодирования можно использовать векторную хромосому, ген которой представляет собой кортеж длиной 2: $\langle k_i, a_i \rangle$, где k_i – номер блока, a_i – ориентация блока в пространстве. Длина хромосомы определяется числом блоков, предназначенных для упаковки. Последовательность генов хромосомы декодируется в последовательность заполнения контейнера блоками. Для того, чтобы хромосома с решением всегда воспроизводила одинаковые решения по заполнению контейнера, используются эвристики по декодированию хромосом [6, 7]. Эвристика «нижнего левого угла» показана на рис. 2.

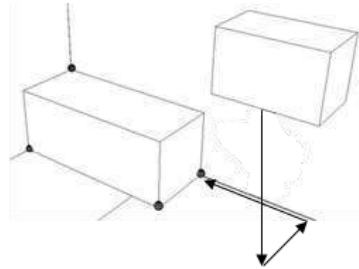


Рис. 2. Эвристика «нижнего левого угла»

При декодировании хромосомы каждый последующий блок имеет несколько вариантов расположения. Для первого блока единственным возможным положением является $(0,0,0)$. Точкой размещения блока является его угол с наименьшими координатами. После размещения первого блока из списка возможных положений следующего блока удаляется координата только что размещенного блока (для первого блока – $(0,0,0)$) и добавляется набор координат углов этого блока. На рисунке (см. рис. 2) они изображены черными точками. При размещении следующего блока все возможные точки упорядочиваются по возрастанию координат Z, Y, X и выбирается первая из них, удовлетворяющая указанным выше ограничениям. При выборе точки учитываются следующие условия [4, 5]:

1) Каждый блок лежит на дне контейнера или на верхней части другого блока. Для блоков, у которых координата высоты (Z) нижней стороны больше 0, проверяется, что блок не находится в «воздухе», все его 4 нижние угловые точки лежат на верхних сторонах других блоков:

$$(\forall x'_i, x'_i = (x_{2i}, y, z), i = \overline{0, n}) \exists R_j, x'_i \in R_j, j = \overline{0, n},$$

где x_i – координата x_i -го блока, W – его ширина, n – число блоков, R – прямоугольник, образованный верхней стороной j -го блока. Аналогичная проверка проводится для остальных 3 координат нижних углов блока.

2) Ни один блок не выходит за границы заданного объема:

$$x_{1i} \geq 0; y_{1i} \geq 0; z_{1i} \geq 0; \quad x_{2i} \leq W; y_{2i} \leq L; z_{2i} \leq H. \quad 3)$$

Суммарный объем блоков не превышает объема области упаковки:

$$\sum_{i=1}^n w_i \cdot l_i \cdot h_i \leq W \cdot L \cdot H.$$

4) Блоки не налагаются друг на друга в объеме:

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

5) Блоки располагаются параллельно стенкам контейнера.

Модификацией эвристики «нижнего левого угла» является предлагаемая в работе эвристика «нижней ближайшей точки» от начала координат. Согласно ей, блок размещается в той точке, где удаление от начала координат минимально, а если есть несколько точек с одинаковым удалением, то выбирается первая точка по эвристике левого нижнего угла. Суть этой эвристики иллюстрирует рис. 3. Здесь r – расстояние от блока до начала координат, а r^* – оптимальная точка, рассчитанная по данной эвристике, r' и r'' – альтернативные рассчитанные точки для двух других углов блока. Использование этой эвристики способствует возрастанию плотности упаковки [6].

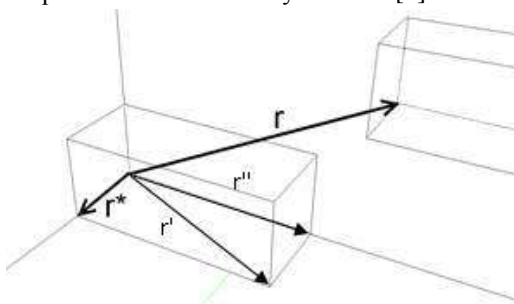


Рис. 3. Эвристика «нижней ближайшей точки»

В алгоритме используется линейное кодирование, в котором решение включает две хромосомы, первая из которых кодирует порядок расположения элементов, вторая – их возможную ориентацию (рис. 1).

Задача упаковки блоков в контейнер с использованием палет. Задача трехмерной упаковки контейнеров в частном случае также включает задачу палетирования блоков с товарами на паллетах заданного типа. Поддон или палета (англ. pallet) – транспортная тара, средство пакетирования, которое имеет жесткую площадку и место, достаточное для создания укрупненной грузовой единицы. Предназначен для хранения груза и удобства его перемещения с помощью механических средств. Товары, помещенные на палету, могут быть притянуты к ней ремнями (крепёжными лентами) или обернуты термоусадочными или стрейч плёнками.

Задача палетирования блоков также, как и задача трехмерной упаковки, является NP-полной, и до середины 90-х гг. XX века решалась вручную. Для задач такого типа эффективно применяется подход на основе генетических алгоритмов и эволюционного моделирования [7–9].

Палеты используются для транспортировки различных типов упаковок, которые включают в себя: коробки из гофрокартона (рис. 4,а); упаковки с использованием термоусадочных пленок (рис. 4,б), как с толстой пленкой, так и тонкой; лотки (поддоны) (рис. 4,в) и их комбинации (рис. 4,г) и др.

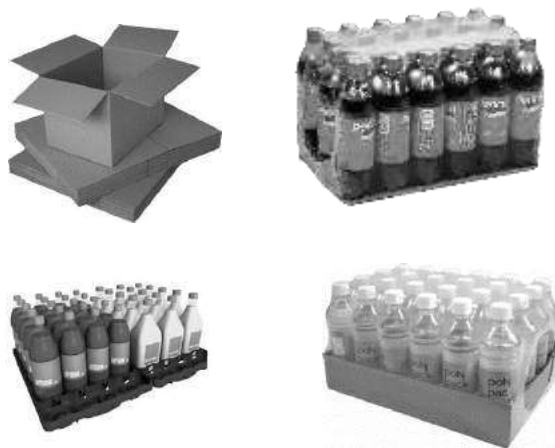


Рис. 4. Типы упаковок, использующихся при палетировании

Существует несколько трехмерных шаблонов, на основе которых может производиться упаковка палет.

1. Традиционная упаковка на основе сцепления рядов и на основе колонок. Эти шаблоны используются при упаковке прямоугольных блоков одного размера. В шаблоне на основе сцепления рядов каждый блок нового ряда повернут на 180° относительно предыдущего ряда (рис. 5,а). Такой подход позволяет создать устойчивую палету с блоками. Шаблоны на основе колонок применяются, если невозможно использовать сцепление (например, кубические блоки) (рис. 5,б). В некоторых случаях размеры палет и блоков не позволяют составить колонки или зацепление. Тогда применяется решение с добавлением пространства между блоками (рис. 5,в). Традиционная упаковка применяется только в том случае, когда упаковываются блоки одного размера.

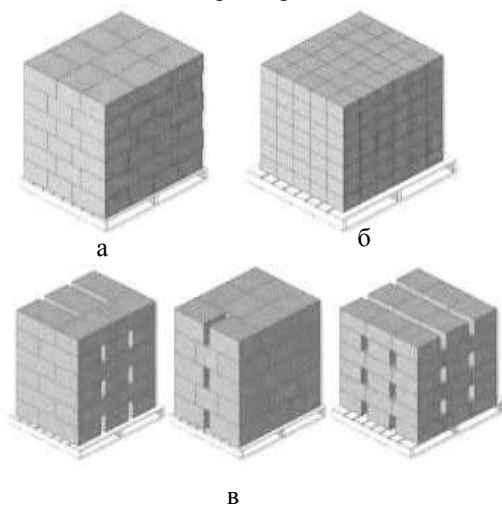


Рис. 5. Традиционные паттерны упаковки паллетов

2. Смешанная упаковка применяется, если требуется упаковать блоки разных размеров и типов. Популярность этого вида упаковки растет, начиная с начала 21 века. Это обусловлено тем, что конечные магазины стремятся работать с заказами небольшого объема с целью экономии своих площадей. Вторая причина состоит в том, что часто требуются паллеты, упакованные так, чтобы снизить трудовые затраты по его распаковке внутри магазина. Для удовлетворения этих потребностей используется несколько подходов к смешанной упаковке:
 - а) Послойная упаковка, в которой все блоки имеют один размер, но представляют разные типы товаров. Каждый слой (горизонтальный или вертикальный) представляет собой отдельный

тип блока (рис. 6,а). Такой подход используется, например, при упаковке напитков, где все блоки имеют один размер, но слои содержат напитки разных типов.

- б) Комбинированная послойная упаковка, в которой также, как и в предыдущем пункте, блоки имеют один размер, но каждый слой может содержать блоки разных типов (рис. 6,б).
- в) Полностью смешанная загрузка палеты, при использовании которой поддон содержит блоки разных типов с различающимися размерами. Например, полностью смешанная палета может содержать половину слоя напитков, слой шампуней, бумажных полотенец и минеральной воды (рис. 6,в).

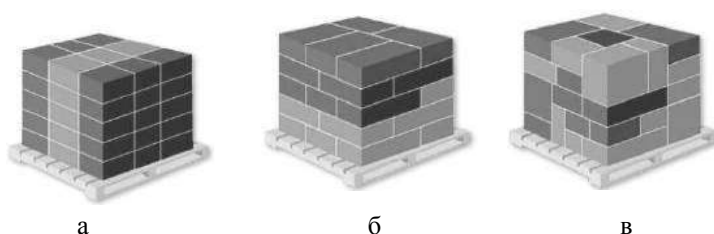


Рис. 6. Типы смешанной упаковки палеты

Палетирование представляет практический интерес в центрах распределения, где снижение числа палет, используемых для транспортировки, снижает транспортные затраты. Во многих работах рассматривается проблема оптимального палетирования блоков одного размера для одной палеты – *проблема упаковки палеты производителем*. В настоящей работе предлагается автоматизация центров распределения и кросс-доков, на которых возникает задача упаковки палет блоками разных типов и размеров – *проблема упаковки палет дистрибьютором*. Задача загрузки палет (англ. Multi-Pallet Loading Problem, MPLP) состоит в том, чтобы найти минимальное число палет, необходимых для загрузки всех блоков. Ее формулировка такова. Пусть L , W и H определяют максимальную длину, ширину и высоту блоков, загружаемых на одинаковые палеты. Пусть m – число разных типов блоков, а $I = \{1, \dots, m\}$ – множество этих типов. Длина, ширина и высота блока i , $i \in I$ характеризуются l_i , w_i , h_i , v_i . Вся партия блоков, подлежащая загрузке, характеризуется требованиями заказа b_i , $i \in I$, что означает, что необходимо загрузить b_i блоков типа i . Целью палетирования является нахождение минимального числа палет, необходимых для размещения всех блоков. Ориентация блоков только ортогональная. Ограничения и условия задачи упаковки палет:

1. Ограничения веса. Сумма весов всех блоков не может превышать заданный лимит.
2. Ограничения по положению блоков относительно палеты и других блоков, например, такие, как «блок типа i не может располагаться сверху блока типа j » или «блок типа i должен находиться внизу палеты».
3. Ограничение стабильности загрузки палеты. После того, как блоки упакованы на палеты, полученная структура должна быть достаточно устойчивой для перевозки в контейнерах.
4. Блоки одного типа должны располагаться рядом. При упаковке и распаковке палет это снижает трудовые и экономические затраты.

Трехмерная упаковка палет выполняется подобно трехмерной упаковке контейнеров. До трехмерной упаковки блоков на палеты производится двумерная упаковка палет в контейнер. Двумерная упаковка производится последовательно, начиная с «верхнего левого угла». После двумерной упаковки палет производится трехмерная упаковка блоков на них. Каждая палета рассматривается как отдельный контейнер, в который требуется упаковать блоки, со всеми своими ограничениями по ширине, длине и максимальной высоте упакованных блоков.

Программная реализация алгоритма упаковки блоков с палетированием. Разработанная программная реализация алгоритма трехмерной упаковки с возможностью палетирования блоков поддерживает полностью смешанный тип упаковки палет (рис. 6,в) [10]. Особенностью разработанной программы является возможность как использовать палетирование, так и производить расчет упаковки контейнера без использования палет. Пример упаковки 200 блоков с размерами 400*400*300 (длина*ширина*высота, мм) в контейнер УК-3 с внутренними размерами 1930*1225*2128 приведен на рис. 8.

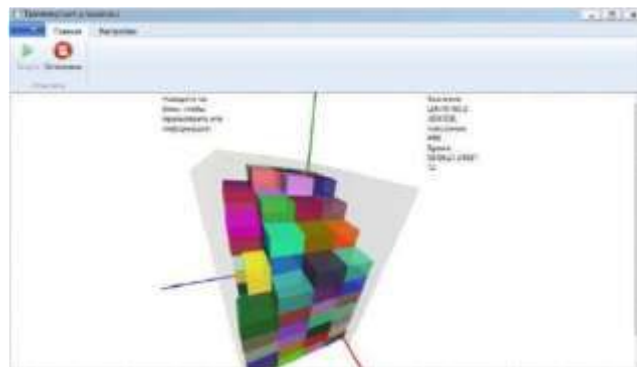


Рис. 8. Трехмерная упаковка блоков в контейнер без палетирования

При использовании палеты размером 800*1200 мм в контейнер УК-3 помещается только 2 палеты, поэтому на рис. 9 упаковано только 72 блока из 200. Для упаковки всех блоков необходимо использовать другой контейнер или несколько контейнеров. Разработанные алгоритмы и системы используются в системе поддержки деятельности грузового контейнерного терминала [11–13].

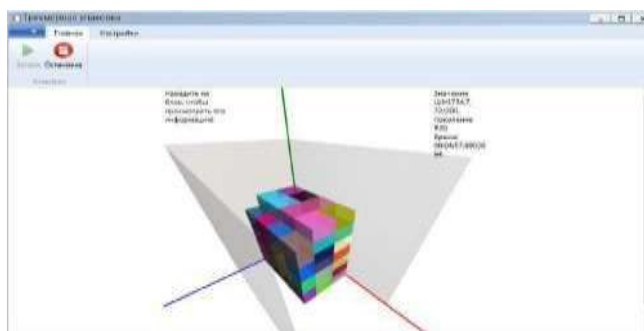


Рис. 9. Результат упаковки блоков в контейнер с палетированием

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кныш Д.С., Курейчик В.М. Параллельные генетические алгоритмы. Обзор и состояние проблемы // Известия РАН. Теория и Системы управления. – 2010. – № 4. – С. 72-82.
2. Барлит А.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с помощью параллельного генетического алгоритма // Труды Международных конференций «Искусственные интеллектуальные системы» (IEEE AIS'02) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2002). Научное издание. – М.: Физматлит, 2002. – С. 338-344.
3. Луцан М.В., Нужнов Е.В. Трехмерная упаковка прямоугольных объектов с определением последовательности их погрузки // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным системам «IS-IT'11». Научное издание в 4-х томах. Т. 3. – М.: Физматлит, 2011. – С. 285-291.
4. Нужнов Е.В., Барлит А.В. Трехмерная упаковка на основе эвристических процедур // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2002. – № 3. – С. 95-101.
5. Muntean O. An evolutionary approach for the 3D packing problem // Proceedings of the International Conference on Knowledge Engineering, Principles and Techniques, KEPT2007, 2007. – С. 193-200.
6. Луцан М.В., Нужнов Е.В. Разработка методов трехмерной упаковки // X Всероссийская научная конференция молодых ученых аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – Т. 1. – С. 95-97.
7. Bortfeldt A., Gehring H. A hybrid genetic algorithm for the container loading problem // European Journal of Operational Research. – 2001. – Vol. 131, № 1. – P. 143-161.
8. Курейчик В.М., Рокотянский А.А. Генетический алгоритм решения логистической задачи // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 245-251.
9. Seiji K., Shuntaro S. and Sadao D. 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'. – 1995. – Vol. 3. – P. 510-515.
10. Нужнов Е.В., Луцан М.В. Информационная среда поддержки автоматизированного грузового терминала на основе использования интеллектуальных агентов // Интеллектуальные системы. Коллективная монография. Вып. 6 / Под ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2013. – С. 227-242.