

Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-6-20

В.И. Данильченко, В.В. Бова, М.М. Семенова, С.В. Игнатьева, М.Б. Шайлиев **БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТРЕХМЕРНОЙ** **УПАКОВКИ**

Рассматривается одна из важных комбинаторных задач оптимизации – задача трехмерной упаковки. Оптимизация трехмерной упаковки снижает затраты и повышает эффективность логистики, что делает ее актуальной для промышленности. В работе проанализированы классические подходы, такие как жадные алгоритмы и динамическое программирование, а также широко применяемые методы, включая эволюционные алгоритмы и локальный поиск. Анализ существующих методов, включая жадный поиск, динамическое программирование, эволюционные алгоритмы и локальный поиск, позволил выявить их ключевые характеристики и определить подходящие области применения. В контексте данного анализа представлен обзор ключевых методов, доминировавших в определенные исторические периоды. Анализ включает рассмотрение условий применения различных методов, их эффективности для определенных типов задач, а также их преимуществ и ограничений. Представлен многоуровневый алгоритм поиска, который объединяет преимущества традиционных и современных методов оптимизации. Многоуровневый алгоритм позволяет улучшить точность решения задачи упаковки за счет динамической настройки параметров. Разработан программный комплекс для решения задачи оптимизации трехмерной упаковки с использованием биоинспирированных алгоритмов. Проведен вычислительный эксперимент на тестовых примерах (бенчмарках). Качество упаковки, полученное, на основе разработанного комбинированного биоинспирированного алгоритма, в среднем на 7 % превосходит результаты упаковки, полученные с использованием известных алгоритмов, а время решения меньше от 7% до 25%, 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; оптимизационные алгоритмы; эволюционные алгоритмы; многоуровневый алгоритм поиска; методы локального поиска.

V.I. Danilchenko, V.V. Bova, M.M. Semenova, S.V. Ignateva, M.B. Shailiev

A BIOINSPIRED APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF 3D PACKAGING

This article examines one of the most important combinatorial optimization problems – three-dimensional packaging. Optimizing three-dimensional packaging reduces costs and improves logistics efficiency, making it relevant for industry. This paper analyzes classical approaches such as greedy algorithms and dynamic programming, as well as widely used methods, including evolutionary algorithms and local search. An analysis of existing methods, including greedy search, dynamic programming, evolutionary algorithms, and local search, revealed their key characteristics and identified suitable areas of application. In the context of this analysis, an overview of the key methods that dominated during certain historical periods is presented. The analysis includes consideration of the application conditions of various methods, their effectiveness for specific types of problems, as well as their advantages and limitations. A multi-level search algorithm is presented that combines the advantages of traditional and modern optimization methods. This multi-level algorithm improves the accuracy of the packaging problem solution through dynamic parameter adjustment. A software package for solving the three-dimensional packaging optimization problem using bioinspired algorithms has been developed. A computational experiment was

conducted on test examples (benchmarks). The packing quality obtained using the developed combined bioinspired algorithm is, on average, 7% higher than the packing results obtained using known algorithms, while the solution time is 7% to 25% shorter, demonstrating the effectiveness of the proposed approach. A series of tests and experiments allowed us to refine theoretical estimates of the time complexity of packing algorithms. In the best case, the time complexity of the algorithms is $O(n^2)$, and in the worst case, $O(n^3)$.

Three-dimensional packing; optimization algorithms; evolutionary algorithms; multi-level search algorithm; local search methods.

Введение. Трехмерная упаковка минимизирует расходы и повышает эффективность использования производственных площадей. Однако их эффективность снижается с ростом объема данных и вычислительных требований.

Эволюционные алгоритмы предоставляют возможность нахождения глобально оптимальных решений, однако их реализация сопряжена с высокими вычислительными затратами, а также гибко адаптируются к различным задачам благодаря возможности настройки параметров и применения стохастических стратегий [1].

В данной статье представлен многоуровневый алгоритм поиска, который объединяет преимущества традиционных и современных методов оптимизации. Алгоритм позволяет улучшить точность решения задачи упаковки за счет динамической настройки параметров, что подтверждено результатами сравнительного анализа.

Актуальность проблемы трехмерной упаковки. Хотя задача оптимального размещения объектов в пространстве кажется простой, ее решение предполагает использование методов, таких как жадные алгоритмы, эволюционные стратегии и методы динамического программирования.

Основные аспекты проблемы:

- ◆ **Экономический аспект.** Оптимизация пространственного размещения объектов позволяет значительно сократить операционные расходы, включая затраты на логистику, хранение и производственные процессы. В производственных процессах рациональное распределение материалов минимизирует отходы и сокращает время сборки. Упаковка с высокой плотностью снижает количество транспортных единиц и ускоряет доставку.

- ◆ **Технический прогресс.** Современные технологии, особенно в микроэлектронике, предполагают интеграции большего числа компонентов на ограниченной площади, что делает стандарты трехмерной упаковки строгими.

- ◆ **Экологический аспект.** Оптимизация размещения объектов сокращает отходы упаковочных материалов и снижает негативное воздействие на окружающую среду.

- ◆ **Вычислительная сложность.** Задача трехмерной упаковки относится к NP-трудным задачам, что делает ее решение интеллектуально сложным и ресурсоемким. С увеличением числа элементов и их разнообразия возрастают вычислительные требования, стимулируя разработку новых методов.

Значимость трехмерной упаковки заключается в ее влиянии на ключевые показатели эффективности многих отраслей, включая производство, логистику и хранение [2]. В сфере микроэлектроники необходимость оптимального распределения компонентов возрастает с уменьшением размеров устройств.

Перспективными направлениями исследований являются разработка гибридных алгоритмов, которые объединяют методы локального поиска и эволюционные стратегии, а также применение искусственного интеллекта для автоматизации процесса оптимизации. Эти подходы обладают потенциалом для повышения точности и эффективности решений, а также расширения возможностей их применения в различных отраслях.

Постановка задачи. Основная проблема связана с необходимостью оптимизации процесса упаковки с учетом увеличения сложности и объема данных. На начальном этапе для тестирования алгоритма выбрана форма параллелепипеда, поскольку такой выбор минимизирует вычислительную сложность и стандартизирует условия экспериментов. В микроэлектронике параллелепипедная форма служит моделью для компонентов, таких как микросхемы и корпуса чипов, что способствует разработке алгоритмов их эффективного

размещения. Использование описанного подхода предоставляет возможность адаптации метода для работы с геометрически сложными объектами. Ключевые требования заключаются в разработке моделей и алгоритмов для оптимизации процесса упаковки, проведении оценки их эффективности и анализе возможностей их практического применения.

Исходными данными задачи упаковки являются область трехмерного пространства, список блоков и набор ограничений. Задача заключается в размещении блоков с учетом ограничений так, чтобы значение целевой функции стремилось к максимальному. Представленное количество блоков A , типов T , количеством N необходимо в соответствии с заданными ограничениями разместить в заданную трехмерную область, представленную в виде параллелепипеда M таким образом, чтобы значение целевой функции (ЦФ) стремилось к максимальному [3]. Результатом решения задачи трехмерной упаковки является план упаковки блоков, рассчитанное значение ЦФ, а также время, затраченное на решение задачи.

Критерий – это отношение суммарного объема упакованных блоков к объему трехмерной области упаковки.

Для записи параметров блока используется кортеж длиной 6 $\langle k_i, p_i, l_i, w_i, h_i, v_i \rangle$, где k_i – номер блока, p_i – ориентация (положение) блока в пространстве, l_i – длина блока, w_i – ширина блока, h_i – высота блока, v_i – объем блока [4].

Положение блока в трехмерном пространстве задается с помощью множества $S = \{s_i = (\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle) \mid i=1, 2, \dots, n\}$, где $\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle$ – координаты угла, расположенного ближе всего к началу осей, а $\langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle$ – координаты угла, расположенного дальше всего к началу осей [4].

Область трехмерного пространства представляется в следующем виде $M = \{L, W, H\}$, где L – длина области упаковки, W – ширина области упаковки, H – высота области упаковки. В дальнейшем данный подход подлежит расширению для применения к геометрическим формам повышенной сложности, где L – длина области упаковки, W – ширина области упаковки, H – высота области упаковки.

Для решения задачи трехмерной упаковки введем следующие ограничения: блоки размещаются исключительно внутри границ области трехмерной упаковки (формула 1) [4]:

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

2) общий объем V блоков не превышает объема V трехмерной 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) Блоки не пересекаются друг с другом (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) блоки должны опираться своим основанием на поверхность;

5) положение блока в пространстве допускается только перпендикулярным области упаковки.

Критерием задачи трехмерной упаковки является объем V , занимаемый упакованными блоками в трехмерном пространстве.

Для формулирования задачи и оценки ее результатов определим критерии и целевую функцию. Целевая функция представляется следующим образом (формула 5) [4]:

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

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

Целевая функция направлена на минимизацию пустот в упаковке, что способствует повышению плотности размещения и может снижать затраты на транспортировку и хранение. Максимальное значение функции, равное единице, соответствует полностью заполненному контейнеру [4]. Круг решения охватывает задачи, связанные с оптимизацией размещения объектов в контейнерах разного размера и формы, включая стандартные логистические контейнеры и специальные упаковочные модули. Предложенный метод может быть применим в логистике, производстве, микроэлектронике, а также в задачах проектирования, где требуется высокая плотность размещения. Предложенный подход может быть использован для решения задач различной сложности, от базовых случаев (параллелепипедные объекты) до высокотехнологичных сценариев.

Примером применения такой целевой функции является логистика, где минимизация пустот внутри транспортных контейнеров способствует сокращению количества рейсов, снижению затрат на топливо и повышению общей эффективности операций.

Данный подход предполагает минимизацию пустот в упаковочной области. Максимально эффективный результат решения задачи достигается, когда целевая функция (ЦФ) равна 1, что соответствует полному заполнению области упаковки.

Для решения задачи были введены следующие ограничения: блоки не выходят за пределы области упаковки, не пересекаются друг с другом, их объем не превышает объем области, а ориентация блоков остается перпендикулярной. В таблице представлены связи этих ограничений с ключевыми факторами

Таблица 1

Связи ограничений с ключевыми факторами

Ограничение	Связь с ключевыми факторами
Блоки размещаются исключительно внутри границ области трехмерной упаковки	Ограничение минимизирует вероятность ошибок при размещении, повышая точность логистических операций. Это связано с внедрением автоматизированных систем управления и использованием алгоритмов распознавания границ, что является примером технического прогресса.
Общий объем блоков не превышает объема упаковочной области	Поддерживает экологическую устойчивость за счет минимизации использования упаковочных материалов. Использование технологий перерасчета объема в реальном времени позволяет эффективно распределять ресурсы, что связано с экономическими и экологическими факторами
Блоки не пересекаются	Применение алгоритмов искусственного интеллекта, включая генетические и эвристические методы, исключает пересечения блоков, что способствует оптимизации размещения [5]. Эти технологии предотвращают ошибки и оптимизируют размещение блоков, что демонстрирует развитие автоматизации.
Блоки опираются на поверхность	Это ограничение увеличивает стабильность и качество упаковки, снижая риск повреждения продукции. Автоматическое распознавание опорных поверхностей улучшает логистические процессы и уменьшает количество брака, что положительно влияет на экономическую выгоду.
Положение блоков перпендикулярно	Упрощение расчетов и моделирования, достигаемое за счет перпендикулярного размещения блоков, снижает вычислительную сложность. Применение адаптивных алгоритмов обеспечивает эффективную интеграцию этого ограничения в автоматизированные системы, что способствует техническому прогрессу.

Методология исследования. Трехмерная упаковка является актуальной задачей для различных отраслей, учитывая ее сложность и важность.

В контексте данного анализа представлен обзор ключевых методов, доминировавших в определенные исторические периоды.

Анализ будет включать рассмотрение условий применения различных методов, их эффективности для определенных типов задач, а также их преимуществ и ограничений [6]. Такая аналитика позволяет получить представление о современном состоянии дисциплины в области трехмерной упаковки, а также выявить направления для последующих исследований:

а) Методы жадного поиска характеризуются высоким быстродействием, однако демонстрируют склонность к попаданию в локальные оптимумы.

б) Методы динамического программирования. Эти методы основаны на разбиении основной задачи на подзадачи. Для решения используются рекурсия и сохранение промежуточных результатов. Алгоритмы динамического программирования эффективны для определенных типов задач, но их сложность увеличивается пропорционально объему данных.

в) Эволюционные алгоритмы. Основаны на принципах естественной селекции и генетики. Через процессы мутации, кроссовера и селекции формируются новые поколения решений. Эволюционные методы позволяют искать глобальный оптимум, но требуют больше времени на вычисления.

г) Методы локального поиска, например 'имитация отжига', начинаются с произвольного решения и последовательно улучшают его за счет локальных модификаций. Алгоритмы локального поиска позволяют достичь баланса между вычислительной сложностью и качеством решения, однако их использование сопровождается риском нахождения локальных оптимумов.

В последние годы наблюдается тенденция к комбинированию различных методов с целью создания гибридных алгоритмов, которые пытаются объединить преимущества разных подходов и минимизировать их недостатки.

Для тестирования предложенных методов использовались параллелепипедные объекты с размерами, варьирующимися от $10 \times 10 \times 10$ до $100 \times 100 \times 100$ единиц. Выбранный диапазон размеров обеспечивает стандартизацию условий эксперимента.

Для симуляций использовались виртуальные параллелепипеды с плотностью и массой в диапазоне 0,5–2,5 кг. Эти значения были выбраны для отражения типичных характеристик грузов, используемых в промышленности и логистике, где диапазон массы и плотности объектов варьируется в зависимости от типа упаковки и условий хранения [7]. Такой подход способствует повышению реалистичности моделирования и проверке универсальности алгоритма. Предложенные алгоритмы тестировались в статических условиях, что позволило исключить воздействие температурных и внешних факторов, таких как перепады температуры, вибрации или воздействие влажности.

Разработан программный комплекс для решения задачи оптимизации трехмерной упаковки с использованием биоинспирированных алгоритмов. Основные функциональные возможности системы включают:

- ◆ Задание параметров задачи, таких как размеры и количество блоков, а также загрузка заранее подготовленных данных.
- ◆ Настройка параметров алгоритмов (рис. 1), включая:
 - параметры генетического алгоритма (размер популяции, число итераций, виды операторов и их вероятности);
 - параметры эволюционного алгоритма (оператор мутации, его вероятность, число итераций);
 - настройки сходимости и предельного времени выполнения

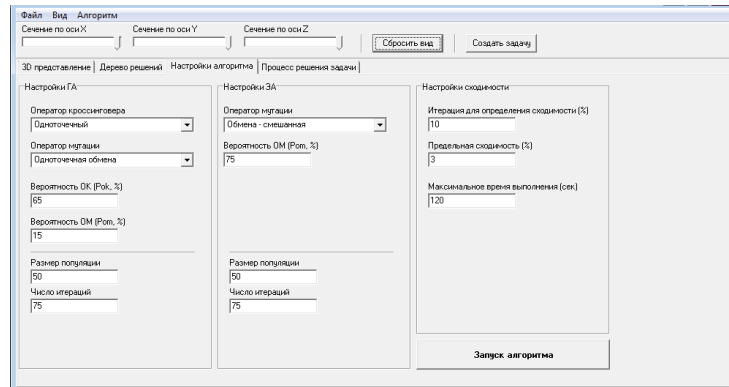


Рис. 1. Настройка параметров алгоритмов

- ◆ Визуализация процесса работы алгоритма в реальном времени с помощью:
 - графиков изменения целевой функции (рис. 2);
 - дерева решений, где отображаются промежуточные результаты (рис. 3).

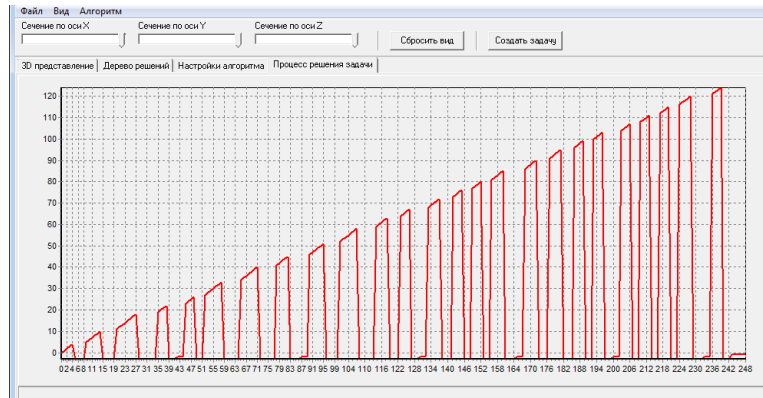


Рис. 2. График изменения целевой функции

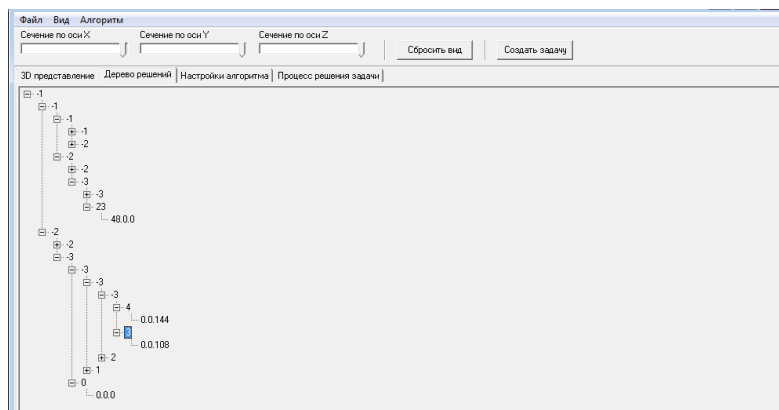


Рис. 3. Дерево решений

Разработанная программа формирует трехмерное представление оптимального размещения блоков, позволяющее оценить качество решения задачи (рис. 4). Дополнительно рассчитываются показатели эффективности упаковки, такие как плотность заполнения объема.

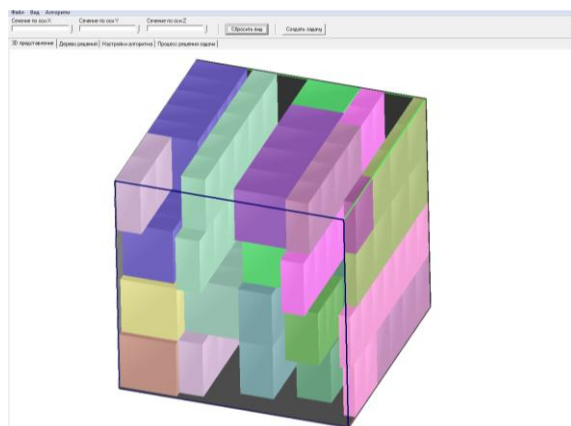


Рис. 4. Трехмерное представление результата упаковки блоков

Система предназначена для решения задач упаковки с минимизацией вычислительной сложности и адаптацией к различным условиям задачи. Эффективность разработанного подхода была проанализирована на основе результатов серии вычислительных экспериментов.

Каждый блок описывался с помощью шести параметров ($\langle k_i, p_i, l_i, w_i, h_i, v_i \rangle$), отражающих его геометрию и положение в пространстве. Критерием точности выступало отношение полноты упаковки к общему объему, а эксперименты выполнялись в 10 повторениях для каждой группы, что снижало влияние случайных факторов.

Методы расчета включали жадный поиск, локальный поиск и многоуровневый алгоритм [8]. Жадный поиск характеризуется высоким быстродействием, однако демонстрирует склонность к попаданию в локальные оптимумы. Многоуровневый алгоритм поиска представляет собой гибридный подход, сочетающий декомпозицию задачи и динамическую настройку операторов мутации и кроссинговера, что способствует адаптации к условиям задачи и достижению глобального оптимума.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V_{\text{контейнера}}} \quad (4)$$

где D – плотность упаковки; V_i – объем отдельного блока; V контейнера – объем упаковочной области

Значение D находится в пределах от 0 до 1, где 1 соответствует полностью заполненному контейнеру. Для частично заполненных контейнеров значение D рассчитывается как отношение объема упакованных блоков к объему контейнера с учетом оставшихся пустот.

Время выполнения алгоритмов оценивалось как среднее время выполнения для каждой конфигурации задач. Для минимизации случайных погрешностей выполнялось 10 запусков каждого алгоритма. Среднее время выполнения рассчитывалось по формуле (5), что позволяло объективно оценить эффективность:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k T_j \quad (5)$$

где $T_{\text{ср}}$ – среднее время выполнения; T_j – время выполнения алгоритма в j -м запуске; $j = 1$ – количество запусков.

Применение данных формул и методов было направлено на объективную оценку эффективности предложенного алгоритма, с учетом баланса между точностью и вычислительной сложностью.

Разработка многоуровневого алгоритма поиска. Исследование новых подходов к трехмерной упаковке продемонстрировало, что применение многоуровневых методов увеличивает эффективность алгоритмов оптимизации. В работе представлен адаптивный многоуровневый алгоритм поиска для оптимизации трехмерной упаковки [9].

Исследование сосредоточено на интеграции нескольких эвристических методов, что способствует улучшению качества оптимизации. Многоуровневый алгоритм включает инновационные элементы, такие как эвристика формирования начальных данных и динамическое управление генетическими операторами. Среди ключевых особенностей алгоритма: декомпозиция задачи на подзадачи для упрощения вычислений, динамическая настройка параметров для повышения адаптивности и эффективность сортировки на каждом уровне.

1. ЛПР осуществляет ввод параметров задачи, блоков, а также проводит настройку алгоритмов.
2. Генерация начальной популяции.
3. Проводится оценка созданных блоков (длина, ширина, высота, объем).
4. Осуществляется проверка блоков. Блоки, которые не удовлетворяют критериям, удаляются.
5. Сортировка и группирование блоков по группам.
6. Сортировка группы А. Блоки одинаковых размеров объединяются в отдельные подгруппы (A1, A2, A3, ..., Ai), которые помещаются в группу А. Блоки без пары помещаются в группу С.

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 [4].

7. Размещение блоков группы А с помощью 6-ти алгоритмов двухмерной упаковки.
8. Оценка целевой функции каждого из 6-ти решений, полученных в результате использования двухмерных алгоритмов.
9. Выбор лучшего решения, полученного в результате работы алгоритмов двухмерной упаковки.
10. Формирование группы В.
11. Формирование кубовидных моделей.
12. Размещение блоков группы В с помощью быстрого модифицированного эволюционного алгоритма.
13. Проверка на достижение одного из критериев остановки.
14. Если критерий остановки не достигнут, запускается блок эволюционной адаптации, выполняющий корректировку параметров мутации и кроссинговера для улучшения качества поиска.
15. По завершению размещения блоков группы В осуществляется формирование блоков в группу С.
16. Блоки группы С размещаются с помощью адаптированного генетического алгоритма.
17. Проверка качества полученного решения.
18. Если необходимо улучшить результат, то применяется модифицированный эволюционный алгоритм.
19. Проверка на достижение одного из критериев остановки.
20. Если критерий остановки не достигнут, то запускается блок эволюционной адаптации, в котором осуществляются настройки алгоритма.
21. После достижения одного из критериев остановки сохраняется лучшее решение.

Генетический и эволюционный алгоритмы, представленные в работе, прекратят свою работу, если одно из условий будет выполнено:

$$\Delta > \Delta Z, \quad (6)$$

где Δ – переменная, которая определяет сходимость ЦФ после каждой итерации; ΔZ – задается ЛПР.

Например, генетический алгоритм работает 300 итераций, $\Delta=10\%$ от количества итераций, а $\Delta Z=10\%$. Тогда $\Delta_x = 300 * 0,1 = 30$; $300 - 30 = 270$.

Оценка ЦФ на Δ_1 270-ой итерации = 0,65.

Оценка ЦФ на Δ_2 300-ой итерации = 0,63.

$\Delta = \Delta_2 / \Delta_1 = 0,63 / 0,65 = 3\%$ на этом этапе алгоритм прекратит свою работу, так как сходимость $\Delta = 3\% < \Delta Z = 10\%$.

$$t_{\text{вып}} < T_{\text{max}}, \quad (7)$$

где $t_{\text{вып}}$ – время, которое уже затрачено на выполнение алгоритма; T_{max} – максимально допустимое время решения алгоритма.

Этот метод определяет вероятности применения кроссинговера и мутации в генетических и эволюционных алгоритмах. Основной критерий – количество итераций, при которых параметр Δ остается меньше ΔZ . Для предотвращения ухудшения результата вероятность мутации уменьшается по мере приближения к оптимальному решению [10–12]. В то же время при приближении к локальному экстремуму уменьшается вероятность кроссинговера и увеличивается применение мутации.

После активации эволюционного алгоритма осуществляется проверка выполнения условий остановки: либо достижение определенного значения ЦФ, либо превышение заранее установленного временного лимита. В случае обнаружения нового, более эффективного решения и выполнения условий остановки, фиксируется наилучший результат. В случае невыполнения критериев остановки алгоритм корректируется посредством модуля эволюционной адаптации. Поиск продолжается до выполнения одного из условий остановки.

Сравнение разработанного алгоритма с классическими методами. Одним из ключевых этапов разработки алгоритмов является их сравнение с устоявшимися методами, широко применяемыми в области оптимизации.

Проблематика упаковки и определенного размещения объектов исторически занимает центральное место в дисциплине операционных исследований. Сравнительный анализ разработанного многоуровневого алгоритма и устоявшихся методов позволяет систематически оценить их преимущества, ограничения и области применения. Сравнительный анализ разработанного многоуровневого алгоритма и традиционных методов решения:

а) Временная эффективность решения.

Традиционные методы. Как правило, используют методы экспоненциального перебора или жадные стратегии, что приводит к увеличению временных затрат при росте размерности задачи [13].

Многоуровневый алгоритм. Использует комбинацию различных стратегий с адаптивными механизмами, что, обеспечивая сокращение временных затрат и достижение решений в полиномиальное время

б) Качественная характеристика решения.

Традиционные методы. Существует вероятность застревания в локальных экстремумах, особенно при решении сложных комбинаторных задач.

Многоуровневый алгоритм. Включает механизмы, которые способствуют преодолению локальных экстремумов, повышая вероятность достижения глобально оптимального решения.

в) Область применения.

Традиционные методы. Являются результатом строгих математических разработок и могут не всегда подходить для решения разнообразных задач.

Многоуровневый алгоритм. Гибкость и масштабируемость алгоритма позволяют использовать его для решения широкого спектра задач.

г) Сложность реализации.

Традиционные методы. В большинстве случаев характеризуются относительной простотой программной реализации, используя известные и проверенные методики [14].

Многоуровневый алгоритм. Реализация алгоритма требует глубокого понимания его составляющих стратегий, что увеличивает сложность, но в то же время позволяет обеспечить высокую точность и эффективность решений

д) Адаптивные характеристики.

Традиционные методы. Зачастую работают на основе заранее установленных правил, ограниченных в возможности адаптации.

Многоуровневый алгоритм. Оснащен механизмами динамической адаптации, которые позволяют лучше учитывать изменчивые параметры задачи.

Для оценки разработанных алгоритмов была проведена серия экспериментов, включающая генетические, эволюционные и биоинспирированные алгоритмы (ГА, ЭА и БА соответственно). В ходе исследований были установлены параметры, которые характеризуются оптимальными значениями для различных операций [15–20]. Например, для оператора кроссовера (ОК) вероятность в диапазоне 60–70% продемонстрировала наилучшие результаты, а для различных операторов мутации (ОМ-1, ОМ-2, ОМ-3) – 40–50%, 45% и 35% соответственно.

Первый эксперимент был направлен на исследование зависимости значения целевой функции (ЦФ) от количества элементов при фиксированном числе итераций (200) и размере начальной популяции (25 особей). Результаты приведены рис. 5

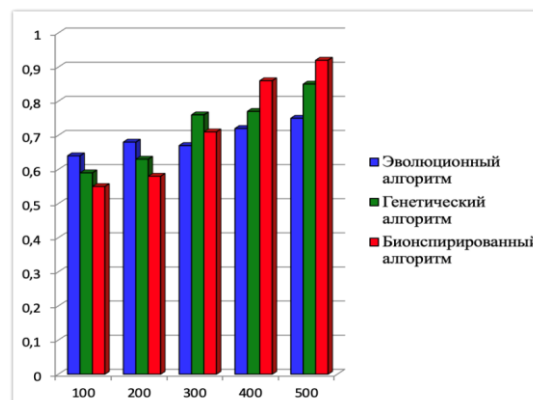


Рис. 5. График зависимости значения ЦФ от количества элементов для 200 итераций

На графике видно, что с увеличением количества блоков значение ЦФ возрастает для всех алгоритмов. Это указывает на их потенциал в решении задач с большим числом элементов. Однако даже при небольшом количестве блоков алгоритмы обеспечивают приемлемое качество решения.

Во втором эксперименте количество итераций было увеличено до 500, а размер начальной популяции – до 100 особей. Результаты представлены на рис. 6.

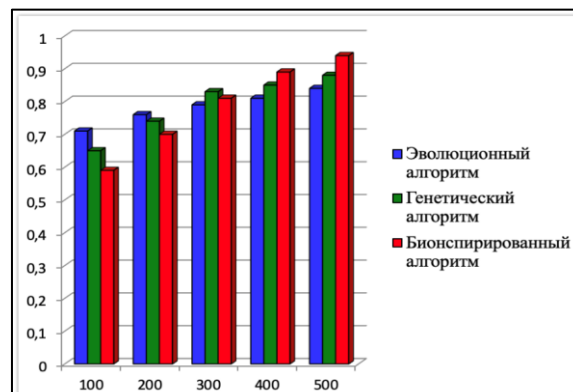


Рис. 6. График зависимости времени работы алгоритма от количества элементов для 500 итераций

С увеличением числа итераций наблюдается улучшение значений ЦФ для всех алгоритмов. Это свидетельствует о целесообразности увеличения числа итераций для повышения точности решений. Однако значительного улучшения при увеличении числа итераций не происходит, что объясняется достаточным размером начальной популяции.

Следующий эксперимент исследовал зависимость времени работы алгоритмов от числа элементов. Результаты на рис. 7.

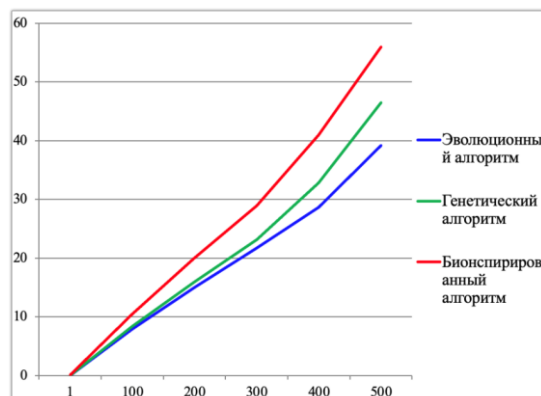


Рис. 7. График зависимости времени работы от количества элементов

Анализ графика показывает практически линейную зависимость времени работы от числа блоков. Экспериментальная временная сложность ($O(n^2)$ – $O(n^3)$) соответствует теоретическими предположениями. Наименьшее время работы показал эволюционный алгоритм, в то время как биоинспирированный алгоритм по времени близок к генетическому.

Для проверки эффективности разработанных генетических алгоритмов использовались тестовые данные из OR-Library – коллекции наборов для задач операционных исследований (OR). В табл. 2 приведено количество блоков и процент использованного пространства контейнера (%)

Таблица 2

Сравнение биоинспирированного алгоритма с аналогами

Количество блоков	Ngoi et al.	Bishoff и др.	Gehring и др.	Разработанный БА
шт.	%	%	%	%
100	62,4	62,6	62,2	63,1
200	69,1	67,3	68,1	68,9
300	75,4	74,3	76,3	78,6
400	81,8	83,9	82,8	84,9
500	88,7	89,5	91,1	92,7
Среднее значение	75,48	75,52	76,1	77,64

Сравнительный анализ разработанного многоуровневого алгоритма и традиционных методов подтвердил его преимущества в решении задач упаковки, включая увеличение плотности размещения объектов [2, 7]. Экспериментальные данные показывают, что плотность размещения объектов увеличивается в среднем на 2% по сравнению с аналогами, что эквивалентно улучшению эффективности использования пространства контейнера. Например, алгоритм может учитывать ограничения на доступное пространство, допустимую нагрузку и конфигурацию объектов. Это позволяет применять его для решения задач с различными условиями.

Преимущества и недостатки предложенного метода

Преимущества:

1. Оптимизационная эффективность. Разработанный многоуровневый алгоритм учитывает комплексность задач упаковки, предоставляя быстрый и эффективный способ решения, даже когда традиционные методы оказываются неэффективными.
2. Адаптивность к задачам. Благодаря механизмам динамической регуляции и принципам эволюционной адаптации алгоритм обладает возможностью модификации под конкретные задачи.
3. Ускорение процесса оптимизации. Многоуровневая структура в сочетании с интеграцией разнообразных методов сокращает время, необходимое для нахождения приближенных оптимальных решений.
4. Обход локальных экстремумов. Применение стратегий для преодоления локальных оптимумов способствует приближению решения к глобальному оптимальному значению.

Недостатки:

1. Техническая сложность. Интеграция многоуровневой структуры с оптимизационными методиками требует высокой квалификации и глубокого понимания алгоритмических основ, что усложняет освоение алгоритма исследователями с ограниченным опытом.
2. Затраты на вычислительные ресурсы. При определенных условиях, особенно при обработке объемных данных, алгоритм может требовать значительных вычислительных мощностей.
3. Риск переобучения, возникает при недостаточной настройке параметров и отсутствии эффективного контроля в процессе обучения модели.
4. Зависимость от исходных данных. Подготовка и предварительная обработка данных оказывают на эффективность и результаты алгоритма.

Разработанный многоуровневый алгоритм демонстрирует высокую вычислительную эффективность при решении задач оптимизации, несмотря на выявленные ограничения.

Заключение. В рамках исследования подробно изучена задача трехмерной упаковки, актуальность которой обусловлена необходимостью разработки более эффективных методик оптимизации. Анализ существующих методов, включая жадный поиск, динамическое программирование, эволюционные алгоритмы и локальный поиск, позволил выявить их ключевые характеристики и определить подходящие области применения.

На основе анализа традиционных методов был разработан многоуровневый алгоритм поиска. Данный алгоритм позволяет улучшить эффективность в сравнении с классическими методами по ряду параметров, включая скорость решения, качество решения, универсальность применения, сложность реализации и адаптивность. Разработан программный комплекс для решения задачи оптимизации трехмерной упаковки с использованием биоинспирированных алгоритмов. Проведен вычислительный эксперимент на тестовых примерах (бенчмарках). Качество упаковки, полученное, на основе разработанного комбинированного биоинспирированного алгоритма, в среднем на 7% превосходит результаты упаковки, полученные с использованием известных алгоритмов, а время решения меньше от 7% до 25%, 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 – $O(n^3)$. Результаты анализа предоставляют пользователям возможность обоснованного выбора оптимального метода для решения задач упаковки.

Таким образом, предложенный многоуровневый алгоритм способен повысить эффективность решения задач трехмерной упаковки. Его преимущества и новизна позволяют рассматривать его как полезный инструмент для специалистов.

Исследование выполнено за счет гранта Российско-го научного фонда № 24-71-00035, <https://rscf.ru/project/24-71-00035/> в Южном федеральном университете.

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. Курейчик В.В., Бялосова Ю.В., Бова В.В. Обзор и анализ методов трехмерной упаковки при морских грузоперевозках // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2024. – № 6. – С. 15-29.
3. Kang Z., Guan Y., Wang J., Chen P. Research on Genetic Algorithm Optimization with Fusion Tabu Search Strategy and Its Application in Solving Three-Dimensional Packing Problems // *Symmetry.* – 2024. – Vol. 16 (4). – P. 449.
4. Курейчик В.В., Глуценко А.Е. Многоуровневый подход для решения задачи трехмерной упаковки большой размерности // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2020. – № 2 (212). – С. 6-16.
5. 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.
6. 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.
7. Курейчик В.М., Курейчик Л.В. Комплексный метод упаковки блоков // *Информатика, вычислительная техника и инженерное образование.* – 2015. – № 1 (21). – С. 17-26.
8. Шайлиев М.Б., Гарягдыев А.М. Классификация и анализ существующих алгоритмов трехмерной упаковки разногабаритных объектов в блоки // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности.* – 2023. – С. 220-222.
9. Sridhar R., Chandrasekaran M., Page T. Multi-objective optimization of heterogeneous bin packing using adaptive genetic approach // *Indian Journal of Science and Technology.* – 2016. – Vol. 9, No. 48.
10. Yuan Y. et al. Three-dimensional atomic packing in amorphous solids with liquid-like structure // *Nature materials.* – 2022. – Vol. 21, No. 1. – P. 95-102.
11. Золотухин А.В., Маряшина Д.Н. Применение модифицированного генетического алгоритма как одного из эволюционных подходов к решению задачи трехмерной упаковки. – 2021.
12. Кравченко Д.Ю. и др. Биоинспирированный метод классификации распределенных вычислительных ресурсов для диспетчирования в grid-системах // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2021. – № 4 (221). – С. 31-41.
13. Заруба Д.В. Компоновка блоков ЭВА на основе биоинспирированных методов поиска // *Современные компьютерные технологии.* – 2020. – С. 4-9.
14. Ling X., Osotsi M.I., Zhang W., et al. Bioinspired Materials: From Distinct Dimensional Architecture to Thermal Regulation Properties // *J Bionic Eng.* – 2023. – Vol. 20. – P. 873-899.
15. Кравченко Д.Ю. и др. Биоинспирированный метод имитационного моделирования для диспетчеризации потоков параллельных заявок в grid-системах // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2020. – № 2 (212). – С. 79-88.
16. Курейчик В.В., Глуценко А.Е., Орлов А.Н. Hybrid genetic algorithm for cutting stock and packaging problems // *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2016).* Индексируется в Scopus. IEEE EWDTS 2016, Yerevan, October, 14-17, 2016. – С. 587-590.
17. Gzara F., Elhedhli S., Yildiz B.C. The pallet loading problem: Three-dimensional bin packing with practical constraints // *European Journal of Operational Research.* – 2020. – Vol. 287, No. 3. – P. 1062-1074.
18. Chen Y. et al. Recent advancements on three-dimensional electrospun nanofiber scaffolds for tissue engineering // *Advanced Fiber Materials.* – 2022. – Vol. 4, No. 5. – P. 959-986.
19. Nguyen T.H. et al. Bio-inspired approaches for smart energy management: State of the art and challenges // *Sustainability.* – 2020. – Vol. 12, No. 20. – P. 8495.
20. Jiang Y., Cao Z., Zhang J. Learning to solve 3-D bin packing problem via deep reinforcement learning and constraint programming // *IEEE transactions on cybernetics.* – 2021. – Vol. 53, No. 5. – P. 2864-2875.

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. Kureychik V.V., Balyasova Yu.V., Bova V.V. Obzor i analiz metodov trekhmernoy upakovki pri morskikh gruzoperevozkakh [Review and analysis of three-dimensional packing methods for sea freight transportation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6, pp. 15-29.

3. Kang Z., Guan Y., Wang J., Chen P. Research on Genetic Algorithm Optimization with Fusion Tabu Search Strategy and Its Application in Solving Three-Dimensional Packing Problems, *Symmetry*, 2024, Vol. 16 (4), pp. 449.
4. Kureychik V.V., Glushchenko A.E. Mnogourovnevyy podkhod dlya resheniya zadachi trekhmernoy upakovki bol'shoy razmernosti [Multilevel approach for solving the problem of large-scale three-dimensional packing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 6-16.
5. 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 packing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 6 (179), pp. 45-53.
6. Kureychik V.V., Glushchenko A.E. Kombinirovanny podkhod dlya resheniya zadachi 3-kh mernoy upakovki raznogabaritnykh elementov [A combined approach to solving the problem of 3-D packing 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 Technology, Systems Analysis, and Management (ITSAiU-2015)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 75-79.
7. Kureychik V.M., Kureychik L.V. Kompleksnyy metod upakovki blokov [An Integrated Block Packing Method], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer Science, Computer Engineering, and Engineering Education], 2015, No. 1 (21), pp. 17-26.
8. Shayliev M.B., Garyagdyev A.M. Klassifikatsiya i analiz sushchestvuyushchikh algoritmov trekhmernoy upakovki raznogabaritnykh ob"ektov v bloki [Classification and analysis of existing algorithms for three-dimensional packing of different-sized objects into blocks], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologii i informatsionnoy bezopasnosti* [Fundamental and Applied Aspects of Computer Technology and Information Security], 2023, pp. 220-222.
9. Sridhar R., Chandrasekaran M., Page T. Multi-objective optimization of heterogeneous bin packing using adaptive genetic approach, *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, Vol. 9, No. 48.
10. Yuan Y. et al. Three-dimensional atomic packing in amorphous solids with liquid-like structure, *Nature materials*, 2022, Vol. 21, No. 1, pp. 95-102.
11. Zolotukhin A.V., Maryashina D.N. Primenenie modifitsirovannogo geneticheskogo algoritma kak odnogo iz evolyutsionnykh podkhodov k resheniyu zadachi trekhmernoy upakovki [Application of a modified genetic algorithm as one of the evolutionary approaches to solving the three-dimensional packing problem], 2021.
12. Kravchenko D.Yu. i dr. Bioinspirirovanny metod klassifikatsii raspredelennykh vychisli-tel'nykh resursov dlya dispetchirovaniya v grid-sistemakh [Bioinspired method for classification of distributed computing resources for dispatching in grid systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 4 (221), pp. 31-41.
13. Zaruba D.V. Komponovka blokov EVA na osnove bioinspirirovannykh metodov poiska [Layout of EVA blocks based on bioinspired search methods], *Sovremennyye komp'yuternyye tekhnologii* [Modern Computer Technologies], 2020, pp. 4-9.
14. Ling X., Osotsi M.I., Zhang W., et al. Bioinspired Materials: From Distinct Dimensional Architecture to Thermal Regulation Properties, *J Bionic Eng.*, 2023, Vol. 20, pp. 873-899.
15. Kravchenko D.Yu. i dr. Bioinspirirovanny metod imitatsionnogo modelirovaniya dlya dispetcherizatsii potokov parallel'nykh zayavok v grid-sistemakh [Bioinspired simulation modeling method for dispatching parallel request flows in grid systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 79-88.
16. Kureychik V.V., Glushchenko A.E., Orlov A.N. Hybrid genetic algorithm for cutting stock and packaging problems [Hybrid genetic algorithm for cutting stock and packaging problems], *Proceedings of IEEE Ea st-West Design & Test Symposium (EWDTS 2016)* [Proceedings of IEEE Ea st-West Design & Test Symposium (EWDTS 2016)]. Indexed in Skopus. IEEE EWDTS 2016, Yerevan, October, 14-17, 2016, pp. 587-590.
17. Gzara F., Elhedhli S., Yildiz B.C. The pallet loading problem: Three-dimensional bin packing with practical constraints, *European Journal of Operational Research*, 2020, Vol. 287, No. 3, pp. 1062-1074.
18. Chen Y. et al. Recent advancements on three-dimensional electrospun nanofiber scaffolds for tissue engineering, *Advanced Fiber Materials*, 2022, Vol. 4, No. 5, pp. 959-986.
19. Nguyen T.H. et al. Bio-inspired approaches for smart energy management: State of the art and challenges, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, No. 20, pp. 8495.
20. Jiang Y., Cao Z., Zhang J. Learning to solve 3-D bin packing problem via deep reinforcement learning and constraint programming, *IEEE transactions on cybernetics*, 2021, Vol. 53, No. 5, pp. 2864-2875.

Данильченко Владислав Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: vdaniichenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; доцент.

Бова Виктория Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: vbova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; доцент.

Семенова Марина Максимовна – Южный федеральный университет; e-mail: bogomolova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; аспирант.

Игнатьева Сабина Валерьевна – Южный федеральный университет; e-mail: signateva@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; студент.

Шайлиев Марат Баталбиевич – Южный федеральный университет; e-mail: shayliev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; аспирант.

Daniilchenko Vladislav Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: vdaniichenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; associate professor.

Bova Victoria Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: vbova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; associate professor.

Semenova Marina Maksimovna – Southern Federal University; e-mail: bogomolova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; post-graduate student.

Ignateva Sabina Valerievna – Southern Federal University; e-mail: signateva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +788634371651; V.M. Kureichik Department of Computer-Aided Design Systems; student.

Shayliev Marat Batalbievich – Southern Federal University; Email: shayliev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +7 88634371651; V.M. Kureichik Department of Computer-Aided Design Systems; postgraduate student.

УДК 004.93

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-20-33

А.Р. Недвигин, Р.М. Синецкий**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ ДОСТУПНОСТИ ТОВАРОВ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

Представлена формализация задачи автоматизированного мониторинга наличия товаров на полках торговых объектов, и соответствия их расположения установленной планеграмме с применением методов компьютерного зрения и машинного обучения. Целью исследования является разработка алгоритмического обеспечения для автоматической оценки уровня доступности товаров в распределенных системах хранения с применением методов компьютерного зрения, что позволит разрешить проблему обеспечения оптимального и необходимого ассортимента за счет контроля размещения товаров и поддержки принятия управленческих решений. Предложен технологический процесс обработки визуальных данных, включающий этапы нормализации, сегментации, локализации и классификации объектов с применением сверточных нейронных сетей, в частности YOLO и U-Net. Разработан интегральный показатель доступности, учитывающий физическую, визуальную и информационную составляющие. Сформулирована оптимизационная задача повышения уровня доступности и реализован механизм адаптивного дообучения нейронных сетей, обеспечивающий рост точности распознавания и сегментации изображений и качества аналитических рекомендаций. Предложен алгоритм повышения доступности для системы поддержки принятия решения, основанный на построении маршрута мерчандайзера, который учитывает приоритетность товаров и минимизирует временные затраты. Задача построения