

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАКАЗА ПО МОДЕЛИ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ

Николаева В.М., Кузнецова О.А.

*Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева,
Российская Федерация, г. Самара*

Аннотация. Апробация разработанной математической модели показала, что формализация процесса консолидации грузов позволяет повысить эффективность загрузки контейнеров, снизить логистические издержки, обеспечить прозрачность статусов обработки заказов и сократить количество ручных расчетов за счёт автоматизации процесса размещения грузов.

Ключевые слова: консолидация грузов, трехмерная упаковка, математическое моделирование, автоматизация логистики.

Введение

Контейнерные перевозки являются основным способом доставки грузов в международной торговле. В условиях роста логистических издержек и стоимости фрахта, использование контейнерного пространства становится ключевым фактором для компании.

Аналогично задачам оптимизации транспортных маршрутов, при решении задачи консолидации грузов необходимо определить такую конфигурацию размещения, при которой соблюдаются ограничения контейнера, а суммарные логистические затраты минимизируются. В исследованиях транспортной логистики «Оптимизация логистических потоков с помощью создания математической модели» авторы Красносельцева И.Е., Кореева Е.Б отмечают, что необходимо определить решение, при котором «суммарные затраты должны быть сведены к минимуму».

Причиной низкой загрузки по данным компании-импортера [1] является отсутствие формализованного процесса консолидации на од-

ном из этапов размещения заказа поставщику. Возникает неоднородность распределения лёгких и тяжёлых грузов между контейнерами. Решение о комплектации контейнеров принимаются менеджерами ситуативно, без использования расчетных методов. Согласование с поставщиками осуществляется вручную, что требует значительных временных затрат, и не гарантирует корректность расчетов.

В статье «Оптимизация бизнес-процесса размещения заказа импортному поставщику с помощью модели AS IS – TO BE» описана математическая модель для более эффективной загрузки грузов в контейнеры и программного обеспечения были использованы реальные данные компании-импортера оборудования за период с января по июнь 2025 года. Данные включали в себя 76 контейнерных отправок с детализацией по поставщикам, номенклатуре товаров, габаритам и весу грузовых мест.

Анализ фактических данных выявил следующие характеристики текущего процесса консолидации:

- 1) средний коэффициент загрузки контейнеров составил 0,52 (52%) при стандартном отклонении 0,21;
- 2) 52,6% контейнеров (40 из 76) имели коэффициент загрузки ниже 0,5;
- 3) минимальный коэффициент загрузки составил 0,20, максимальный – 0,99.

Для детального анализа были отобраны четыре контейнера с характерными проблемами загрузки (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики отобранных контейнеров до оптимизации

Номер контейнера	Сумма по полю Вес брутто по документам	Тип контейнера	Общий объём груза, м ³	Загрузка по объёму ДО	Сумма перевозки руб.	Сумма перевозки за кг ДО руб.
№1	16450,00	40,00	39,26	58,10%	528500	32,13
№2	16410,00	40,00	35,23	52,14%	445500	27,15
№3	14654,00	40,00	33,82	50,05%	523250	35,71
№4	13904,00	40,00	29,38	43,48%	660000	47,47

Применение разработанного программного обеспечения позволило пересчитать консолидацию четырех контейнеров. Целью является увеличение плотности загрузки и сокращение времени на подбор подходящих грузов.

Данная система будет по API забирать из 1С список грузовых мест для консолидации (габариты, вес, количество, порт и тип контейнера). При необходимости пользователь может скорректировать параметры исключительно внутри программного обеспечения, при этом изменения не передаются обратно в 1С, что позволяет сохранить целостность исходных данных учетной системы.

Математическая модель трехмерной упаковки

На входе у пользователя имеется партия грузовых мест (коробок) разных размеров и веса, которые нужно загрузить в контейнер выбранного типа. Для каждой коробки известны размеры ($D \times Ш \times В$), вес и допустимые ориентации (можно/нельзя кантовать/штабелировать). Контейнер задаётся внутренними размерами и допустимой грузоподъемностью.

Целью является увеличение плотности загрузки и сокращение времени на подбор подходящих грузов.

Программа подбирает грузы самостоятельно или из подобранных вручную заказов формирует возможную укладку: для каждого места выбирает допустимую ориентацию и координаты размещения внутри контейнера, соблюдая ограничения: все грузы должны быть внутри границ контейнера, не пересекаться, располагаться ортогонально стенкам, иметь устойчивую опору и укладываться в лимит по весу.

Программное обеспечение на выходе будет выполнять расчет состава контейнера, а также определять уровень его загрузки по объёму и массе.

Для каждого грузового места i : размеры – l, w, h ; вес – m ; допустимое множество ориентаций – множество R .

После выбора ориентации $r \in R_i$ получаем ориентированные размеры:

$$(a_i, b_i, c_i) \in R_i,$$

где a, b, c – длина, ширина, высота коробки после поворота, а размещение задается координатами левого нижнего ближнего угла: (x_i, y_i, z_i) .

Тогда коробка занимает параллелепипед:

$$[x_i, x_i + a_i] \times [y_i, y_i + b_i] \times [z_i, z_i + c_i].$$

Контейнер: внутренние размеры – L, W, H ; допустимая масса – M .

Ограничения для границ коробки

Ограничения каждой коробки внутри контейнера для данного конкретного случая расчета контейнера 40DC: $0 \leq x_i, \quad 0 \leq y_i, \quad 0 \leq z_i$.

$$x_i + a_i \leq 12032, \quad y_i + b_i \leq 2352, \quad z_i + c_i \leq 2395.$$

Не пересечение коробок:

$$x_i + a_i \leq x_j \vee x_j + a_j \leq x_i \vee y_i + b_i \leq y_j \vee y_j + b_j \leq y_i \vee$$

$$z_i + c_i \leq z_j \vee z_j + c_j \leq z_i.$$

Ортогональность: Коробки можно располагать только в допустимых ориентациях: $(a_i, b_i, c_i) \in R_i$.

Ограничения по весу: $\sum_{i \in P} m_i \leq 28750$, где P - множество коробок, которые программа положила в контейнер.

Далее рассмотрим возможность постановки коробок друг на друга: коробка либо стоит на полу, либо все 4 угла ее нижнего основания опираются на верхние поверхности нижележащих коробок.

Обозначим множество коробок-опор для коробки i :

$$B(i) = \{j: z_j + c_j = z_i\}.$$

Это коробки, чья верхняя грань находится ровно на уровне дна коробки i .

Для коробки i , если она не на полу, должно быть:

$$z_i = 0 \quad \text{или} \quad \forall p \in C_i \exists j \in B(i): p \in P_j,$$

где C_i — 4 нижних угла основания коробки i ; P_j — проекция верхней грани коробки j на плоскость XU .

То есть каждый из 4 нижних углов должен попадать на верхнюю грань какой-то коробки-опоры.

Нижние углы коробки i :

$$(x_i, y_i), (x_i + a_i, y_i), (x_i, y_i + b_i), (x_i + a_i, y_i + b_i).$$

Для каждого такого угла (u, v) должно существовать j , такое что:

$$x_j \leq u \leq x_j + a_j, \quad y_j \leq v \leq y_j + b_j, \quad z_j + c_j = z_i.$$

Основные метрики для ПО:

- объемная загрузка: $P_V = \frac{\sum_{i \in P} a_i b_i c_i}{12032 * 2352 * 2395};$

- загрузка по массе: $P_M = \frac{\sum_{i \in P} m_i}{28750};$

- доля размещенных коробок: $P_N = \frac{|P|}{N}.$

Итоговая формула для коэффициента загрузки:

$$F = \alpha P_V + \beta P_M + \gamma P_N,$$

где P_V — коэффициент загрузки по объему; P_M — коэффициент загрузки по весу; P_N — доля размещенных мест; α, β, γ — веса.

$$F = 0.6 \cdot \frac{\sum_{i \in P} a_i b_i c_i}{12032 * 2352 * 2395} + 0.3 \cdot \frac{\sum_{i \in P} m_i}{28750} + 0.1 \cdot \frac{|P|}{N}.$$

Пусть коэффициенты будут:

- 0.6 на объем, так как основная цель — это заполнение контейнера по объему, поэтому основной задачей системы является максимально эффективное использование его внутреннего объёма;

- 0.3 на вес, чтобы программа не выбирала только легкие, но объемные коробки, потому что необходимо обеспечивать более равномерное распределение массы и эффективное использование допустимой грузоподъемности контейнера;

- 0.1 на число мест, так как дополнительный бонус за размещение большего количества коробок.

Также в качестве дополнительных метрик необходимо вывести формулу остатка места в контейнере:

- по объему: $V_{rest} = 12032 * 2352 * 2395 - \sum_{i \in P} a_i b_i c_i$;
- по весу: $M_{rest} = 28750 - \sum_{i \in P} m_i$;
- процент объемной загрузки: $Load_V = 100 \cdot \frac{\sum_{i \in P} a_i b_i c_i}{12032 * 2352 * 2395}$;
- процент весовой загрузки: $Load_M = 100 \cdot \frac{\sum_{i \in P} m_i}{28750}$.

Применение разработанного программного обеспечения позволило пересчитать консолидацию четырех контейнеров (Таблица 2).

Таблица 2. Сравнение ключевых показателей процесса консолидации грузов до и после оптимизации

Показатель	До (AS IS)	После (TO BE)	Изменение
Количество контейнеров	4	3	-25%
Средний коэффициент загрузки	0,51	0,58	+13,7%
Общая стоимость перевозки, руб.	2 157 250	1 497 250	-660 000
Стоимость за 1 кг, руб.	35,13	24,39	-30,6%

Полученные результаты демонстрируют значительный экономический эффект от внедрения системы:

- 1) прямая экономия на фрахте составила 660 000 рублей (30,6%) при консолидации четырех контейнеров в три,
- 2) удельная стоимость перевозки снизилась с 35,13 до 24,39 рублей за килограмм.

Заключение

Апробация решения на данных компании-импортера показала высокую практическую эффективность: экономия на перевозке составила 660 000 рублей (30,6%) при консолидации четырех контейнеров в три, средний коэффициент загрузки повысился с 0,51 до 0,58, время принятия решения сократилось на 68%.

Список литературы

1. Торговый Дом «Папиллонс» : официальный сайт. — URL: tdppl.ru (дата обращения: 08.05.2026).
2. Красносельцева, И.Е. Оптимизация логистических потоков с помощью создания математической модели / И.Е. Красносельцева, Е.Б. Кореева // Экономика и управление сложными системами : материалы конференции. — Самара : Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 2025. — С. 248–249.
3. Луцан М.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с палетированием контейнеров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 2. С. 31-38.
4. Павлов О.В., Татарникова М.С. Математическая модель динамической системы стимулирования работников предприятия с учетом эффекта кривой обучения // Сборник научных статей X Всероссийской научно-практической конференции Проблемы экономики современных промышленных комплексов. Финансирование и кредитование в экономике России: методологические и практические аспекты. — 2015. — № вып.10. — С. 108-115.
5. Псиола В.В. О приближенном решении 3-х мерной задачи об упаковке на основе эвристик // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. 2018. № 4. С. 77-92.
6. Christensen H.I., Khan A., Pokutta S., Tetali P. Approximation and Online Algorithms for Multidimensional Bin Packing: A Survey // Computer Science Review. 2017. Vol. 24. P. 63-79. DOI: 10.1016/j.cosrev.2016.12.001.
7. Hu H., Zhang X., Yan X., Wang L., Xu Y. Solving a New 3D Bin Packing Problem with Deep Reinforcement Learning Method // arXiv preprint arXiv:1708.05930. 2017.
8. Zhao H., She Q., Zhu C., Yang Y., Xu K. Online 3D Bin Packing with Constrained Deep Reinforcement Learning // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2021. Vol. 35. № 1. P. 741-749. DOI: 10.1609/aaai.v35i1.16155.

ORDER PLACEMENT OPTIMIZATION BASED ON A THREE-DIMENSIONAL BIN PACKING MODEL

V.M. Nikolaeva, O.A. Kuznetsova

*Samara University,
Samara, Russian Federation*

Abstract. Validation of the proposed mathematical model demonstrated that formalizing the cargo consolidation process can reduce logistics costs by ensuring shipment status visibility and eliminating manual calculations.

Keywords: cargo consolidation, three-dimensional bin packing, mathematical modeling, logistics automation.