

Модели построения оптимального плана контейнерных грузоперевозок для сложных логистических систем

А.Д.Степченко, Ю.А.Шаталова

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж

Аннотация: В статье рассматриваются современные проблемы и перспективы оптимизации контейнерных грузоперевозок в условиях децентрализованных и быстро меняющихся логистических систем. Особое внимание уделено проблеме перевозки пустых контейнеров, которая существенно влияет на эффективность и затраты отрасли. Предлагается модифицированная математическая модель построения оптимального плана перевозок, учитывающая типы контейнеров, степень их заполнения, а также особенности тарифообразования. В модели используются методы графов, линейного и динамического программирования, а также модифицированный метод потенциалов для многомерных транспортных задач. Разработана имитационная модель и программное приложение для автоматизации расчёта оптимальных маршрутов и планов перевозки. Полученные результаты могут быть применены для повышения эффективности логистических операций и снижения затрат на перевозку контейнерных грузов.

Ключевые слова: логистика, транспортная задача, контейнерные грузоперевозки, имитационное моделирование, оптимальный план.

Введение

Логистическая отрасль активно трансформируется под влиянием цифровых технологий и новых бизнес-моделей. К 2025 году ключевыми направлениями станут интеграция искусственного интеллекта в традиционные системы управления логистическими процессами [1], автоматизация процессов и внедрение инновационных решений для повышения гибкости цепочек поставок [2].

Одной из проблем логистики является проблема перевозки пустых контейнеров [3]. Рассмотрим данную проблему подробнее и сделаем акцент на задачах построения оптимальных планов перевозок для новых инфраструктурных проектов, связанных с тем, что грузы перевозятся различными видами транспорта в контейнерах [4].

Рынок самостоятельной логистики (3PL) в 2024 году превысил 1,5 триллиона долларов [5], при этом крупнейшие игроки, такие как DHL и

Kuehne + Nagel [6,7], занимают около 10% рынка, а всего в отрасли действуют тысячи компаний разного масштаба по всему миру [8-10].

Существующие математические модели построения оптимальных планов перевозки не учитывают параметры логистических моделей в условиях контейнерной грузоперевозки [11,12].

Постановка задачи на моделирование оптимальных контейнерных перевозок

Рассмотрим математическую модель в условиях, отличных от стандартных моделей оптимизации для транспортной задачи. Стандартные модели поиска оптимальных решений транспортной задачи рассмотрены в [13,14].

В статье представлен модифицированный подход для трехмерной реализации модели транспортной задачи с учетом перевозки в условиях распределения груза по контейнерам. Введем следующие обозначения, представленные в таблице №1.

Так как, X - множество однотипных грузов, которые можно перемещать по транспортной сети от i -го пункта отправки в j – пункт приемки в k -ого типа контейнере, то стоимость перевозки груза из пункта отправки в пункт доставки обозначим как

$$C^1 = \{c_{ij}^1\}$$

где c_{ij}^1 с верхним индексом «1» - стоимость перевозки груза из i -го пункта отправки в j – пункт приемки

$$C^2 = \{c_k^2\}$$

стоимость перемещения в k -ого типа контейнере.

Тогда суммарная цена перевозки представляет сумму всех перемещений при размещении грузов в контейнерах и c_{ijk} – стоимость

перевозки груза из пункта отправки в пункт назначения зависит от его размещения в конкретном контейнере.

Таблица №1

Параметры математической модели

Обозначение	Описание	Индексы
A	Множество центров поставки	$i = 1, 2, \dots, N $
B	Множество складов	$j = 1, 2, \dots, M $
D	Множество типов контейнеров	$k = 1, 2, \dots, H $
X	План перевозок	x_{ijk} $i = 1, 2, \dots, N $ $j = 1, 2, \dots, M $ $k = 1, 2, \dots, H $ $x = (x_{ijk}) \ (i = \overline{1, N}, \ j = \overline{1, M}, k = \overline{1, H})$
C	тарифы (стоимости) перевозки единицы груза из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения в k -ого типа контейнере	$C = (c_{ijk}) \ (i = \overline{1, N}, \ j = \overline{1, M}, k = \overline{1, H})$

Модель оптимизации будет представлена в виде формулы (1) вида:

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l c_{ijk} x_{ijk} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где F – целевая функция. При необходимости перемещения всех грузов в контейнерах минимизация целевой функции возможна за счет поиска минимальной цены перевозки, но в условиях учета вместимости контейнеров поиск усложняется, поскольку учитывается факт того, что необходимое количество груза может не заполнить один из контейнеров полностью, а также учитывать количество контейнеров в сцепке, т.е. возможна ситуация, когда контейнеры не заполняются, но их обслуживание и перемещение также имеет стоимость. Стоимость перевозки варьируется, что необходимо учитывать при построении оптимального плана. Таким образом, система ограничений в модели оптимизации усложняется и дополняется условиями изменения стоимости.

Учтем следующие ограничения модели:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j = \overline{1, n}) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = a_i \quad (j = \overline{1, m}) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^d x_{ijk} = d_k \quad (k = \overline{1, d}) \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}) \quad (5)$$

где уравнение (2) представляет условие перевозки грузов по потребностям в пункты доставки, уравнение (3) обеспечивает условие удовлетворения доставки из пунктов назначения, уравнение (4) описывает условие соблюдения объема перевозок в контейнерах, неравенство (5) обеспечивает условие того, что определенные маршруты перевозок могут быть не заполнены, что гарантирует поиск оптимального маршрута среди всех допустимых вариантов.

Представим модификацию метода потенциалов для закрытой транспортной задачи при неопределенных условиях, влияющих на стоимость перевозки грузов в условиях децентрализованной поставки для контейнерной перевозки.

Суть метода потенциалов заключается в определении стоимости перевозки, как суммы вклада участников логистики: поставщиков и получателей, а также стоимости контейнера. При этом выбирается оптимальный вариант при минимизации целевой функции, учитывающей снижение стоимости.

В классическом методе потенциалов вклад любой стороны в сумму не важен и перерасчет ведется, исходя из предположения, что первый элемент в матрице суммарных потенциалов для одной из сторон приравнивается к нулю, а вклад второй стороны в суммарный потенциал – максимален. Но, исходя из выдвинутого ранее предположения, что

итоговый потенциал состоит из трех составляющих, сформулируем математическую модель следующим образом.

Если для всех вариантов матрицы стоимостей (C_{ijk}) при $x_{ijk} > 0$ вклад участников распределения примет вид:

$$\alpha_i + \beta_j + \mu_k = \tilde{C}_{ijk} = C_{ijk}, \quad (6)$$

где α_i - вклад в стоимость перевозки от поставщика (пункт отправления), β_j - вклад от получателя (пункт назначения), μ_k - вклад учета стоимости контейнера, а для $(x_{ijk}=0)$:

$$\alpha_i + \beta_j + \mu_k = \tilde{C}_{ijk} \leq C_{ijk}, \quad (7)$$

Формула (7) определяет условие оптимального плана.

Особенность данной модели состоит в методе определения стоимости перевозки единицы груза из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения в k -ого типа контейнере с учетом степени заполнения контейнера. Тип контейнера различается объемом заполнения, следовательно, возможны ситуации, когда контейнер пуст, заполнен полностью и заполнен частично. Стоимость перевозки будет зависеть от степени заполнения контейнера. Регулирование стоимости предлагается за счет коэффициента γ , $0 \leq \gamma \leq 1$, тогда стоимость перевозки для формулы (8).

$$C^2 = \gamma * c_k^2 \quad (8)$$

Для пустого контейнера стоимость перевозки максимальная, а для полностью заполненного равна базовой стоимости перевозки груза c_{ij} – тариф перевозки из пункта отправления в пункт назначения. Предложенный подход позволяет найти оптимальный план перевозки с учетом контейнерного типа перевозок. В качестве метода решения

предлагается применять метод потенциалов, суть которого в учете вклада в стоимость перевозок отправителя, получателя, а для предложенного метода учета вместимости (типа) контейнера. Использование данного подхода позволяет построить оптимальный план с учетом максимальной заполненности контейнеров.

Для апробирования модели разработано клиент-серверное приложение, реализующее имитационную модель оптимальных грузоперевозок.

В заключение отметим, что представленная модель может быть расширена для ситуации, когда учитывается тип контейнера (для сыпучих грузов, для однотипных несыпучих грузов, для разнотипных несыпучих грузов, для жидких грузов, для газообразных грузов и т.д.), тип транспорта, перевозящего контейнеры, состояние контейнера (готов к транспортировке, не готов к транспортировке, загружен полностью, загружен частично), способ перевозки (в составе поезда, самостоятельный маршрут). Такая модель имеет сложное многомерное пространство состояний. Автоматизация расчета оптимального плана перевозки и построение маршрутов требует применения машинных методов поиска оптимальных решений и инструментальных библиотек, с помощью которых можно подготовить данные, обработать данные и представить результат в виде маршрута и плана перевозки для каждого расчетного периода в заданный момент времени.

Литература

1. Ковалёв А. И., Мельникова И. В. Интеллектуальные логистические системы: теория и практика управления. М.: Инфра-М, 2021. 312 с.
2. Сергеева Е. В. Управление цифровыми логистическими цепями в условиях развития индустрии 4.0 // Логистика сегодня. 2023. №5. С. 45–52.

3. Петров П. П. Применение искусственного интеллекта в управлении складскими процессами // Вестник транспортной логистики. – 2022. Т. 18, № 2. С. 101–110.
4. Контейнерные перевозки // Официальный сайт FESCO. URL: fesco.ru/ru/clients/container/.
5. «Рускон» – мультимодальный интегратор услуг группы компаний «Дело». URL: ruscon.ru/ (дата обращения: 06.02.2025).
6. Международные контейнерные перевозки – Альдетранс. URL: aldetrans.ru/types/kontejnerye-perevozki (дата обращения: 06.04.2025).
7. Рынок сторонней логистики (3PL): размер и доля, 2025–2034 гг. URL: gminsights.com/ru/industry-analysis/third-party-logistics-3pl-market-size (дата обращения: 07.05.2025).
8. Пустые крупнотоннажные контейнеры – беда международных перевозок // Логист.Today. URL: logist.today/ru/dnevnik_logista/2018-10-31/pustye-krupnotonnazhnye-kontejnery-beda-mezhdunarodnyh-perevozok/ (дата обращения: 07.05.2025).
9. Контейнерные перевозки: восстановление баланса // MarineLink URL: marinelink.com/news/ (дата обращения: 07.05.2025).
10. TransRussia 2025: как меняется логистический рынок // DSCS.pro URL: dscs.pro/news/transrussia-2025 (дата обращения: 07.04.2025).
11. Karagül K. Comparative analysis of optimization methods for grey fuzzy transportation problems in logistics // Alphanumeric Journal. 2024. Vol. 12, N 3. P. 1–20.
12. Ibrahim A.A., Lonardi A., De Bacco C. Optimal transport in multilayer networks for traffic flow optimization // Algorithms. 2024. Vol. 14, N 7. P. 189.
13. Wang Y. Optimizing freight rate of spot market containers with uncertain demand and ship capacity // Transportation Research Part E: Logistics

and Transportation Review. 2021. Vol. 146. Article 102180. URL: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261521000382/.

14. Kuhlemann S., Tierney K., Tierney D. The stochastic liner shipping fleet repositioning problem with uncertain container demands and travel times // European Journal of Transport and Infrastructure Research. 2021. Vol. 21, № 2. C. 1–23. URL: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2192437621000224/.

References

1. Kovalyov A. I., Mel'nikova I. V. Intel'lektual'nye logisticheskie sistemy: teoriya i praktika upravleniya [Intelligent Logistics Systems: Theory and Practice of Management]. M.: Infra-M, 2021. 312 p.
2. Sergeeva E. V. Logistika segodnya. 2023. No.5. pp. 45–52.
3. Petrov P. P. Vestnik transportnoy logistiki. 2022. T. 18, No. 2. pp. 101–110.
4. Ofitsial'nyy sayt FESCO. URL: fesco.ru/ru/clients/container
5. «Ruskon» – mul'timodal'nyy integrator uslug gruppy kompaniy «Delo». [“Ruscon - multimodal integrator of services of Delo Group of Companies]. URL: ruscon.ru/ (accessed: 06/02/2025).
6. Mezhdunarodnye konteynerye perevozki [International Container Transportation]. Aldetrans. URL: aldetrans.ru/types/kontejnerye-perevozki (accessed: 06/02/2025).
7. Rynok storonney logistiki (3PL): razmer i dolya, 2025–2034 gg. [Third-Party Logistics (3PL) Market: Size and Share, 2025–2034] URL: gminsights.com/ru/industry-analysis/third-party-logistics-3pl-market-size (accessed: 07/02/2025).
8. Pustye krupnotonnazhnye konteynery – beda mezhdunarodnykh perevozok [Empty Large-Tonnage Containers – the Scourge of International Transportation]. Logist.Today. URL: logist.today/ru/dnevnik_logista/2018-10-

31/pustye-krupnotonnazhnye-kontejnery-beda-mezhdunarodnyh-perevozok/
(accessed: 06/02/2025).

9. Konteynerye perevozki: vosstanovlenie balansa [Container Transportation: Restoring the Balance]. URL: marinelink.com/news/ (accessed: 9/02/2025)

10. TransRussia 2025: kak menyayetsya logisticheskiy rynok [TransRussia 2025: How the Logistics Market is Changing]. DSCS.pro URL: dscs.pro/news/transrussia-2025 (accessed: 07/02/2025).

11. Karagül K. Alphanumeric Journal. 2024. Vol. 12, N 3. pp. 1–20.

12. Ibrahim A.A., Lonardi A., De Bacco C. Algorithms. 2024. Vol. 14, N 7. P. 189.

13. Wang Y. Logistics and Transportation Review. 2021. Vol. 146. Article 102180. URL: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261521000382/.

14. Kuhlemann S., Tierney K., Tierney D. European Journal of Transport and Infrastructure Research. 2021. Vol. 21, No. 2. pp. 1–23. URL: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2192437621000224/.

Дата поступления: 16.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025