



Методика оптимального размещения контейнеров в поездах при наличии грузовых операций в пути следования

**Дарья КОЧНЕВА****Сергей СИЗЫЙ****Хао ЧАН**

Кочнева Дарья Ивановна – Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия.

Сизый Сергей Викторович – Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

Чан Хао – Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург/Аньян (провинция Хэнань), Россия/КНР*.

Рассматривается новый подход к организации маршрутных контейнерных поездов на основе принципов пассажирского сообщения. Технология предполагает движение контейнерного поезда по расписанию с продажей грузовых мест в поезде. Состав формируется на станции отправления и следует по установленному маршруту с остановками на промежуточных контейнерных терминалах или станциях, где осуществляется снятие контейнера назначением в данный пункт и установка на освободившееся место контейнера назначением в последующие пункты маршрута.

Цель настоящего исследования – разработка методики оптимального размещения контейнеров в маршрутном поезде с попутными грузовыми операциями. Методика предполагает итеративный поиск такого по-

рядка размещения грузовых мест, чтобы контейнеры назначением в каждый промежуточный пункт находились максимально близко друг к другу. Методика представляет собой авторский алгоритм, основанный на методах комбинаторной оптимизации.

Практическая реализация предложенного алгоритма позволяет сократить излишний пробег погрузчика в промежуточных пунктах и, следовательно, повысить скорость грузовых операций при перестановке контейнеров, а также сократить эксплуатационные затраты использования погрузочных механизмов контейнерного терминала.

По сравнению с методом полного перебора предложенный математический алгоритм позволяет существенно сократить число итераций поиска решения и имеет возможность программной реализации.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, контейнерный поезд, контейнерные перевозки, контейнеропоток, маршрутизация, комбинаторная оптимизация.

*Информация об авторах:

Кочнева Дарья Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры мировой экономики и логистики Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия, ✉ dana_rich@mail.ru.

Сизый Сергей Викторович – кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, профессор кафедры алгебры и фундаментальной информатики Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, s5125@e1.ru.

Чан Хао – аспирант кафедры мировой экономики и логистики Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия / Аньян, провинция Хэнань, КНР, changhao001@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.12.2020, принята к публикации 26.02.2021.

For the English text of the article please see p. 184.

ВВЕДЕНИЕ

Переключение грузов на контейнерные перевозки с других видов транспорта и повышение уровня контейнеризации – одна из задач, способствующих достижению целей устойчивого развития, позволяющая уменьшить углеродный след автомобильных перевозок.

Для России – это также одна из приоритетных задач экономического развития, предусмотренная национальными целями и стратегическими задачами¹, реализация которой должна привести к увеличению к 2024 г. объёма транзитных железнодорожных контейнерных перевозок в четыре раза.

Китай является основным мировым экспортёром грузов в контейнерах [1]. Анализ статистических данных о погрузке, выгрузке контейнеров, предоставленных ОАО «РЖД», показал, что на долю КНР приходится 66 % всех импортных железнодорожных контейнерных перевозок в Россию. При этом 52 % перевозок из Китая осуществляется по железной дороге через морские порты Приморского края².

В транзитном железнодорожном сообщении Китай–Европа–Китай через территорию России в 2020 году перевезено 3,6 млн тонн грузов (прирост в 1,9 раза) [2]. Однако доля морских перевозок из Китая в Европу через Суэцкий канал по-прежнему очень высока и составляет около 90 % всего китайско-европейского товарооборота [3].

Для расширения спектра конкурентоспособных предложений в части альтернативного пути контейнерных перевозок по сравнению с морскими маршрутами необходимо разрабатывать технологии увеличения скорости доставки, совершенствовать тарифную политику и повышать уровень обслуживания грузовладельцев.

В настоящее время существуют некоторые отечественные [4–9] и зарубежные [10–15] исследования, направленные на совершенствование организации контей-

нерных перевозок. Например, в работе [6] предложено формировать двухуровневую региональную структуру контейнерной транспортной системы: во-первых, сеть контейнерных терминалов, осуществляющих накопление грузов от отправителей, во-вторых, сеть контейнерных накопительно-распределительных центров, которые собирают региональные контейнерные потоки и обеспечивают формирование контейнерных поездов. Такой подход позволяет массово внедрять маршрутные контейнерные поезда, однако по-прежнему предполагается сбор и накопление контейнеров в крупных узлах, что увеличивает время начально-конечных операций. В зарубежной литературе эта технология обозначается термином «hub and spoke», её реализация в сфере контейнерных перевозок исследована в работах [10–12].

Ещё один вариант повышения конкурентоспособности железнодорожных контейнерных перевозок рассмотрен в исследовании [9] и предполагает применение дифференцированных длин контейнерных блок-поездов. Такой подход позволяет сокращать общее время доставки в контейнерах, но приводит к увеличению себестоимости перевозок и, соответственно, росту транспортного тарифа.

Все обозначенные отечественные и зарубежные исследования построены в соответствии с традиционной системой грузового движения.

В настоящей статье рассматривается новый подход к организации маршрутных контейнерных поездов, ранее в литературе не представленный.

Цель исследования – разработка методики оптимального размещения контейнеров в маршрутном поезде с попутными грузовыми операциями. Методика предполагает итеративный поиск такого порядка размещения грузовых мест, чтобы контейнеры назначением в каждый промежуточный пункт находились максимально близко друг к другу. Методика представляет собой авторский алгоритм, основанный на *методах* комбинаторной оптимизации.

В основе рассматриваемой технологии лежит принцип организации пассажирского сообщения: движение осуществляется по расписанию с продажей отдельных мест

¹ Указ Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Электронный ресурс]: <http://kremlin.ru/events/president/news/57425>. Доступ 20.12.2020.

² Расчёты авторов на основе статистики ОАО «РЖД».



в контейнерном поезде. Предполагается формирование поездов постоянной составности из фитинговых платформ с контейнерами, предназначенными для отправки по заданному маршруту движения. Остановки поезда планируются на промежуточных станциях, оборудованных для погрузки и выгрузки контейнеров. Во время стоянки поезда выполняется снятие погрузчиком с платформы контейнера назначением в данный промежуточный пункт и установка на освободившееся место контейнера, предназначенного для отправки на одну из следующих станций маршрута, а также необходимые технологические операции (смена локомотива и локомотивной бригады).

Реализация данной технологии позволит сократить время доставки контейнеров за счёт исключения сортировочных и маневровых операций в пути следования, упростить процедуру отправки грузов в контейнерах для грузовладельцев. При этом исключается необходимость накопления на терминале партии контейнеров на полный маршрут и соблюдается условие нормативной длины поезда. Перспективы такой концепции организации контейнерных перевозок рассматриваются в ОАО «РЖД» [16].

Новый подход к организации контейнерных перевозок требует множества исследований и решения ряда научных задач. В частности, в [17] разработана модель определения оптимальных маршрутов контейнерных поездов, станций их формирования и расформирования таким образом, чтобы обеспечивались минимальное время следования и максимальная загрузка состава с учётом потребностей регионов в контейнерных перевозках и ограничений региональной инфраструктуры.

Настоящая работа является продолжением исследований авторов [17] и представляет методику оптимальной расстановки контейнеров в поезде.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика оптимальной расстановки контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями

Размещение контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями должно осуществляться обоснованно. Их произ-

вольное размещение в начальном пункте отправления может привести к избыточному пробегу погрузчика в промежуточных пунктах при выполнении грузовых операций. То есть возникает задача оптимального размещения грузовых мест в поезде таким образом, чтобы контейнеры назначением в каждый промежуточный пункт находились максимально близко друг к другу.

Задача о размещении относится к классу задач комбинаторной оптимизации. Методы решения сводятся к перебору вариантов для получения оптимального или близкого к оптимальному значению. Осуществление метода полного перебора зачастую невозможно, так как при наличии n объектов, которые необходимо оптимально разместить в некотором пространстве, возникает $n!$ вариантов расстановки. Например, если необходимо оптимально разместить только десять контейнеров в поезде, то для поиска оптимальной расстановки потребуется перебрать $10! = 3628\ 800$ вариантов. В связи с этим разработаны различные математические алгоритмы частичного перебора, позволяющие найти решение близкое к оптимальному: метод ветвей границ, метод имитации отжига, муравьиный алгоритм, генетический алгоритм и другие [18–20].

Ввиду специфики поставленной задачи для её решения разработан специальный авторский алгоритм с опорой на существующие математические методы.

Алгоритм предполагает выполнение двух этапов.

На первом этапе определяются групповые места для контейнеров, следующих от одного места погрузки до одного места их выгрузки, и формируется исходная матрица расстановки.

На втором этапе исходная матрица подлежит многократной транспозиции (перестановке местами пары столбцов) до получения наилучшего значения критерия оптимальности. Критерием оптимальности выступает условное расстояние между контейнерами, подлежащими выгрузке в каждом промежуточном пункте.

Приведём описание алгоритма.

Занумеруем пункты (терминалы) погрузки/выгрузки контейнеров по маршруту следования поезда натуральными числами от 1 до N .



Рис. 1. Нумерация пунктов погрузки/выгрузки контейнеров по маршруту следования для целей формализации алгоритма (разработано авторами).

Для поезда, следующего по данному маршруту, задана матрица корреспонденций $[q(i, j)]$ размера $N \times N$, где $q(i, j)$ означает количество контейнеров, направляемых из пункта i в пункт j . Матрица корреспонденций удовлетворяет следующим ограничениям:

1. $q(i, j) = 0$, при $j \leq i$ – контейнеры не могут быть отгружены и направлены из пункта i в предыдущие пункты следования поезда.

2. $\sum_{i=1}^p q(i, p) = \sum_{j=p}^N q(p, j)$ – в каждом промежуточном пункте $p = 2, 3, \dots, N-1$ в поезд загружается столько контейнеров $\sum_{j=p}^N q(p, j)$, сколько в этом пункте было выгружено $\sum_{i=1}^p q(i, p)$.

Такая матрица может быть сформирована на основе алгоритма поиска оптимального маршрута поезда на заданной сети, разработанного в [17].

Обозначим через I_j число источников контейнеропотока назначением в пункт j , а через S_j – число стоков (назначений) контейнеропотока, отправлением из пункта i .

Считаем, что в каждом пункте погрузки $p = 1, 2, \dots, N-1$ контейнеры, направляемые в конкретный пункт $j > p$, загружаются на свободные грузовые места рядом друг с другом, образуя грузовые группы. Таким образом, группа грузовых мест Γ_{pj} – это совокупность грузовых мест, расположенных рядом без промежутков, на которых помещаются контейнеры, направленные из данного пункта p в данный пункт назначения j . Отметим, что в поезде, на всём его протяжении, могут возникнуть несколько различных групп Γ_{pj} контейнеров одного и того же пункта отправления p и назначения j .

Общее количество групп грузовых мест K зададим следующей формулой:

$$K = 1 + \sum_{i=2}^{N-1} S_i. \quad (1)$$

В этой формуле первое слагаемое (единица) соответствует грузовой группе Γ_{pN} контейнеров, направляемых из пункта формирования поезда $i = 1$ в последний пункт маршрута $i = N$. Эта группа содержит $q(1, N)$ контейнеров, она не изменяется при прохождении поездом промежуточных пунктов погрузки-выгрузки, поскольку контейнеры этой группы не затрагиваются в промежуточных пунктах маршрута. Таким образом, общее количество групп грузовых мест в поезде K определяется числом пар грузовых операций (погрузка-выгрузка) на маршруте. На начальном и конечном пункте в общей сложности осуществляется одна операция (только погрузка в начальном пункте и только выгрузка в конечном). В каждом промежуточном пункте осуществляется и погрузка, и выгрузка контейнеров. Следовательно, необходимое количество грузовых мест будет определяться числом назначения потока отправлением из каждого пункта i , то есть слагаемым $\sum_{i=2}^{N-1} S_i$.

Договоримся группы грузовых мест нумеровать натуральными числами от 1 до K , например, от локомотива к хвосту поезда.

Далее, на первом этапе формируется исходная ($\chi = 0$) матрица расстановки контейнеров в поезде $[\alpha_{ik}]$ размера $(N-1) \times K$. Элементы α_{ik} матрицы расстановки будут означать количество $q(i, j, k)$ контейнеров, погруженных в пункте i с назначением в пункт j , которые занимают k -е групповое место в контейнерном поезде.

Опишем алгоритм формирования матрицы расстановки $[\alpha_{ik}]$.

Элементы α_{ik} первой строки матрицы расстановки вычисляются по матрице корреспонденций $[q(i, j)]$ следующим образом.

Просматривая слева направо строки матрицы корреспонденций $[q(i, j)]$ начиная со второй, выберем из них все ненулевые элементы и расположим их в последовательность (S_i – число стоков контейнеро-



потока, отправленного из пункта i , т.е. количество ненулевых элементов в i -й строке):

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_{11} &= q(2, j_{21}), \tilde{\alpha}_{12} = q(2, j_{22}), \dots, \\ \tilde{\alpha}_{1,s_2} &= q(2, j_{2,s_2}); \tilde{\alpha}_{1,s_2+1} = q(3, j_{31}), \\ \tilde{\alpha}_{1,s_2+2} &= q(3, j_{32}), \dots, \tilde{\alpha}_{1,s_2+s_3} = q(3, j_{3,s_3}); \\ \dots; \tilde{\alpha}_{1,K-1} &= q(N-1, N) \end{aligned}$$

по определению количества групп грузовых мест (формула (1)), эта последовательность содержит в точности $K-1$ элемент.

Двигаясь по полученной последовательности ненулевых элементов слева направо, заполняем первую строчку матрицы расстановки по следующему правилу:

Если $\tilde{\alpha}_{ik} = q(i, j) \leq q(l, i)$, то $\alpha_{ik} = \tilde{\alpha}_{ik}$. Это означает, что если k -й элемент $\tilde{\alpha}_{ik}$ последовательности, равный, разумеется, некоторому ненулевому элементу $q(i, j)$ из i -й строки матрицы корреспонденций, не превосходит верхнего элемента i -го столбца, то его и записываем в k -ю позицию первой строки матрицы расстановки, присваивая ему обозначение $q(i, j, k)$.

Иначе, если $\tilde{\alpha}_{ik} = q(i, j) > q(l, i)$, то

$$\alpha_{ik} = q(i, j) - \sum_{s=2}^j q(s, i).$$

Это означает, что в противном случае, когда количество контейнеров $q(i, j)$ не помещается в освободившуюся после разгрузки группу из $q(1, i)$ грузовых мест, из элемента $q(i, j)$ необходимо вычесть сумму всех элементов i -го столбца матрицы корреспонденций, стоящих ниже первого верхнего. Оставшиеся контейнеры $\sum_{s=2}^j q(s, i)$

распределяются на места, освободившиеся после выгрузки контейнеров, следовавших из пунктов $s > 1$ до пункта i .

Последний элемент первой строки матрицы расстановки полагаем равным $\alpha_{1K} = q(1, N)$, и он получает обозначение $q(1, N, K)$.

Для последующих строк матрицы расстановки $l = 2, \dots, N-1$ числовые значения α_{lk} переписываются следующим образом. Значению α_{lk} присваиваются индексы p и j в соответствии с матрицей корреспонденций. Если в промежуточном пункте p происходит выгрузка контейнеров, следующих из i в p и погрузка на освободившееся место контейнеров назначением из p в j , то соответствующему значению α_{lk} присваиваются индексы p и j , при этом одновременно

выполняются условия: $p = l$ и $p = j_{l-1}$. В случае если смены контейнеров в пункте p на грузовом месте не происходит (контейнеры проследовали через пункт p транзитом), то переписываются индексы предыдущей строки, то есть $p = p_{l-1}$ и $j = j_{l-1}$.

Для каждой строки l матрицы $[\alpha_{lk}]$ вычисляется условное расстояние между контейнерами $r(l)$ (расстояние непроизводительного пробега погрузчика), подлежащими погрузке в p -м пункте отправления, как сумма элементов $\alpha_{lk}(p, j)$ с индексами p , меньшими, чем номер этой строки l в границах отрезка $[k_{\min}; k_{\max}]$, то есть:

$$r(l) = \sum_{k_{\min}(l)}^{k_{\max}(l)} \alpha_{lk}(p, j), \text{ при } p < l, \quad (2)$$

где $k_{\min}(l)$ – номер крайнего левого столбца строки l , где записано значение $\alpha_{lk}(p, j)$ с индексом $p = l$;

$k_{\max}(l)$ – номер крайнего правого столбца строки l , где записано значение $\alpha_{lk}(p, j)$ с индексом $p = l$.

Тогда критерий оптимальности каждого варианта решения χ определяется выражением:

$$R(\chi) = \sum_{l=1}^{N-1} r(l). \quad (3)$$

Задача состоит в поиске такой матрицы расстановки χ , для которой $R(\chi)$ принимает наименьшее значение.

Суть предлагаемого алгоритма оптимизации состоит в последовательных транспозициях (перестановках некоторых пар) столбцов матрицы χ по установленным правилам и исключении на каждом шаге решений с минимальным значением критерия оптимальности $R(\chi)$. Идея такого подхода основана на принципе генетического алгоритма.

Последовательность операций алгоритма оптимизации размещения контейнеров в поезде следующая:

Первый шаг. В матрице расстановки χ вычисляется значение $R(\chi)$. Среди значений матрицы $\alpha_{lk}(p, j)$ в отрезке $[(k_{\min}(l); k_{\max}(l))]$ выбираем наибольший элемент, то есть величину, которая более всего влияет на критерий $R(\chi)$.

Второй шаг. Выполняем транспозицию (перестановку двух столбцов) в матрице χ : k -й столбец, в котором расположен выбранный на первом шаге элемент $\alpha_{lk}(p, j)_{\max}$, меняем местами со столбцом, где в строке

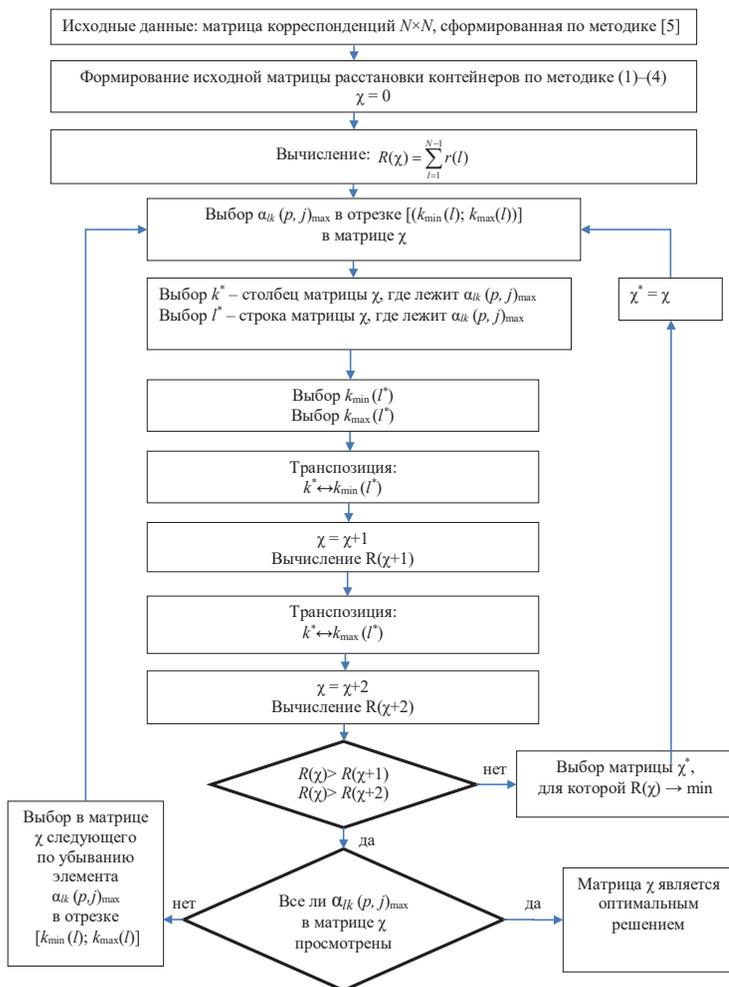


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска оптимального размещения контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями (разработано авторами).

l расположен $\alpha_{ik_{\min}}(p, j)$. Получаем матрицу $\chi+1$, вычисляем значение $R(\chi+1)$.

Третий шаг. Выполняем транспозицию в матрице χ : k -й столбец, в котором расположен элемент $\alpha_{ik}(p, j)_{\max}$, меняем местами со столбцом, где в строке l расположен элемент $\alpha_{lk_{\max}}(p, j)$. Получаем матрицу $\chi+2$, вычисляем значение $R(\chi+2)$.

Четвёртый шаг. Если $R(\chi) < R(\chi+1)$ и $R(\chi) < R(\chi+2)$, то выполненные на шагах 2 и 3 перестановки не позволили улучшить решение, переходим к шагу 5. В противном случае из матриц $\chi+1$ и $\chi+2$ выбираем ту, для которой $R(\chi)$ принимает наименьшее значение, прочие исключаются из рассмотрения, переходим к шагу 6.

Пятый шаг. В матрице расстановки χ находим следующий по убыванию величины элемент $\alpha_{ik}(p, j)_{\max 1}$ в интервале $(k_{\min}(l);$

$k_{\max}(l))$, элементы $\alpha_{ik}(p, j)_{\max}$, выбираемые ранее, из рассмотрения исключаются. Переходим к шагу 2.

Шестой шаг. Для выбранной матрицы повторяем шаги 1–4 до тех пор, пока не рассмотрены все столбцы со значениями $\alpha_{ik}(p, j)_{\max}$, которые увеличивают расстояние между контейнерами одного назначения и не использованы способы их перестановки.

Блок-схема алгоритма поиска оптимального размещения контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями представлена на рис. 2.

Апробация методики оптимальной расстановки контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями

Рассмотрим конкретный пример реализации предложенного алгоритма. Пусть



Таблица 1

Матрица корреспонденций контейнерного поезда с попутными грузовыми операциями, ДФЭ (разработано авторами на основе методики [17])

Пункт отправления контейнеров	Пункт назначения контейнеров					
	Приморский край	Иркутская область	Красноярский край	Свердловская область	Пермский край	Санкт-Петербург
Приморский край	0	23	36	54	4	9
Иркутская область	0	0	0	3	2	18
Красноярский край	0	0	0	12	6	18
Свердловская область	0	0	0	0	2	67
Пермский край	0	0	0	0	0	14
Санкт-Петербург	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

Исходная матрица расстановки контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями, $\alpha_{jk}(p, j)$ (ДФЭ) (разработано авторами)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$r(i)$
3 _(1,2)	2 _(1,2)	18 _(1,2)	12 _(1,3)	6 _(1,3)	18 _(1,3)	2 _(1,4)	52 _(1,4)	4 _(1,5)	9 _(1,6)	0
3 _(2,4)	2 _(2,5)	18 _(2,6)	12 _(1,3)	6 _(1,3)	18 _(1,3)	2 _(1,4)	52 _(1,4)	4 _(1,5)	9 _(1,6)	0
3 _(2,4)	2 _(2,5)	18 _(2,6)	12 _(3,4)	6 _(3,5)	18 _(3,6)	2 _(1,4)	52 _(1,4)	4 _(1,5)	9 _(1,6)	0
3 _(4,6)	2 _(2,5)	18 _(2,6)	12 _(4,6)	6 _(3,5)	18 _(3,6)	2 _(4,5)	52 _(4,6)	4 _(1,5)	9 _(1,6)	44
3 _(4,6)	2 _(5,6)	18 _(2,6)	12 _(4,6)	6 _(5,6)	18 _(3,6)	2 _(5,6)	52 _(4,6)	4 _(5,6)	9 _(1,6)	100

Таблица 3

Результат апробации алгоритма поиска оптимального размещения контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями (разработано авторами)

Вариант решения	Выборанный наибольший элемент	Выборанный столбец	Выборанная строка	Транспозиция	Критерий $R(\chi)$	Выбор решения
χ	$\alpha_{jk}(p, j)_{\max}$	k^*	l			
0				—	144	
1	52	8	5	8↔2	150	$R(\chi)_{\min} = 96$ $\chi = 2$
2				8↔9	96	
3	18	3	4	3↔1	61	$R(\chi)_{\min} = 61$ $\chi = 3$
4				3↔8	202	
5	18	6	4	6↔1	79	$R(\chi)_{\min} = 61$ $\chi = 3$
6				6↔8	131	
7	18	6	5	6↔2	51	$R(\chi)_{\min} = 49$ $\chi = 8$
8				6↔9	49	
9	12	4	5	4↔2	53	$R(\chi)_{\min} = 35$ $\chi = 10$
10				4↔7	35	
11	6	5	4	5↔1	42	$R(\chi)_{\min} = 35$ $\chi = 10$
12				5↔8	89	
13	4	9	3	9↔5	31	$R(\chi)_{\min} = 31$ $\chi = 13$
14				9↔6	61	
15	4	9	4	9↔1	33	$R(\chi)_{\min} = 31$ $\chi = 13$
16				9↔8	91	
17	3	1	5	1↔2	30	$R(\chi)_{\min} = 30$ $\chi = 17$
18				1↔5	43	
19	2	2	4	2↔1	31	$R(\chi)_{\min} = 30$ $\chi = 17$
20				2↔8	134	

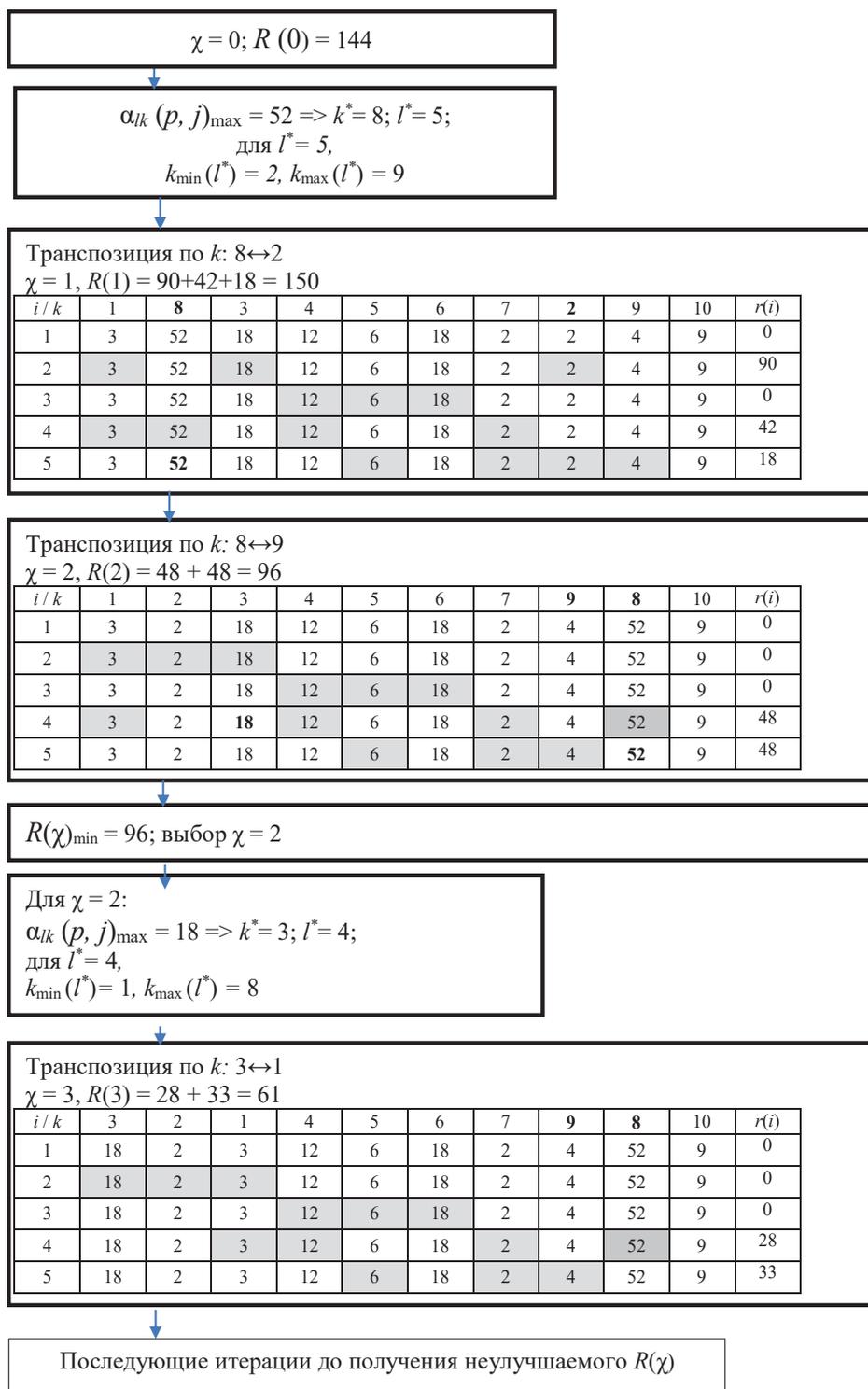


Рис. 3. Апробация алгоритма поиска оптимального размещения контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями (фрагмент) (разработано авторами).

сформирована матрица корреспонденций для маршрута контейнерного поезда с попутными грузовыми операциями: Примор-

ский край, Иркутская область, Красноярский край, Свердловская область, Пермский край, Санкт-Петербург (табл. 1).



Оптимальная матрица размещения контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями (разработано авторами)

3	1	2	7	9	5	4	6	8	10	$r(i)$
18(1,2)	3(1,2)	2(1,2)	2(1,4)	4(1,5)	6(1,3)	12(1,3)	18(1,3)	52(1,4)	9(1,6)	0
18(2,6)	3(2,4)	2(2,5)	2(1,4)	4(1,5)	6(1,3)	12(1,3)	18(1,3)	52(1,4)	9(1,6)	0
18(2,6)	3(2,4)	2(2,5)	2(1,4)	4(1,5)	6(3,5)	12(3,4)	18(3,6)	52(1,4)	9(1,6)	0
18(2,6)	3(4,6)	2(2,5)	2(4,5)	4(1,5)	6(3,5)	12(4,6)	18(3,6)	52(4,6)	9(1,6)	30
18(2,6)	3(4,6)	2(5,6)	2(5,6)	4(5,6)	6(5,6)	12(4,6)	18(3,6)	52(4,6)	9(1,6)	0

Данный маршрут сформирован на основе авторского алгоритма, представленного в работе [17].

Сформируем исходную матрицу расстановки контейнеров.

Определим число групповых мест в поезде: $K = 9 + 1 = 10$ мест. Следовательно, получим матрицу расстановки размером 5×10 . По разработанной методике рассчитаем значения $\alpha_{jk}(p, j)$ – число контейнеров, погруженных в пункте i назначением в пункт j , которые занимают k -е групповое место в контейнерном поезде – и сформируем матрицу расстановки контейнеров (табл. 2).

Цветовым фоном в матрице выделены ячейки, в которых указан контейнеропоток, подлежащий выгрузке в пункте, соответствующем номеру строки.

Вычислим значение критерия оптимальности $R(\chi)$ для исходной матрицы:

$$R(0) = 44 + 100 = 144 \text{ ДФЭ.}$$

На практике полученное значение $R(\chi)$ означает, что при осуществлении грузовых операций с контейнерами на промежуточных станциях погрузчик выполняет излишний пробег $144 \times 6,1 = 878,4$ метра.

На основе предложенного алгоритма выполним многократные транспозиции столбцов матрицы расстановки. Фрагмент работы алгоритма приведён на рис. 3.

Результат выполнения шагов алгоритма приведён в табл. 3.

В результате 17 итераций получена матрица расстановки контейнеров в поезде с попутными грузовыми операциями (табл. 4), дальнейшие итерации не приводят к умень-

шению значения целевой функции $R(17)_{\min} = 30 \text{ ДФЭ.}$

В результате получаем следующую матрицу оптимального размещения контейнеров (табл. 4).

Таким образом, при заданных условиях оптимизация размещения контейнеров в поезде позволяет сократить излишний пробег погрузчика в промежуточных пунктах с $144 \times 6,1 = 878,4$ метра до $30 \times 6,1 = 183$ метра, то есть в 4,8 раза. Это позволит повысить скорость грузовых операций при перестановке контейнеров и сократить эксплуатационные затраты использования погрузочных механизмов контейнерного терминала.

Предложенный алгоритм позволяет существенно сократить число итераций поиска решения по сравнению с методом полного перебора и имеет возможность программной реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе подход к организации маршрутных контейнерных поездов предполагает организацию движения по принципу пассажирского сообщения: состав формируется на станции отправления и следует по расписанию и установленному маршруту с остановками на промежуточных контейнерных терминалах, где осуществляется снятие контейнера назначением на данную станцию и установка на свободное место контейнера назначением на следующие станции маршрута. Реализация предложенной технологии позволит повысить конкурентоспособность железнодорожных контейнерных перевозок как во внутреннем, так

и в транзитном сообщении, создаст условия для контейнеризации дополнительного грузопотока за счёт сокращения сроков доставки и повышения качества транспортного обслуживания.

В работе представлена авторская методика оптимальной расстановки контейнеров в поезде в рамках реализации предложенной технологии организации движения. Произвольное размещение контейнеров в начальном пункте отправления может привести к избыточному пробегу погрузчика в промежуточных пунктах при выполнении грузовых операций. Предложенная методика позволяет разместить грузовые места в поезде таким образом, чтобы контейнеры назначением в каждый промежуточный пункт находились максимально близко друг к другу. По сравнению с методом полного перебора алгоритм существенно сокращает число итераций поиска решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Song Chunhui. Research on Transportation Development of Container Port Starts. *International Core Journal of Engineering*, 2020, Vol. 6, Iss. 9, pp. 292–300. DOI: 10.6919/ICJE.202009_6(9).0037. Доступ 20.12.2020.
2. Транзит грузов в контейнерах в сообщении Китай–Европа–Китай по сети РЖД удвоился в январе–ноябре // РЖД партнер.ру. [Электронный ресурс]: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/tranzit-gruzov-v-konteynerakh-v-soobshchenii-kitay-evropa-kitay-po-seti-oao-rzhd-udvoilsya-v-yanvare/>. Доступ 20.12.2020.
3. Китай–Европа: сухопутный контейнерный прорыв вопреки «экономиксу». TELS Эксперт. 29.01.2019. [Электронный ресурс]: https://telsgroup.ru/media_center/tels_in_the_press/4691.html. Доступ 20.12.2020.
4. Сай В. М., Кочнева Д. И. Моделирование оценки потребности региона в контейнерных перевозках // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 4. – С. 160–178. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1500>. Доступ 20.12.2020.
5. Kochneva, D., Say, V., Sizi, S. Economic and Mathematical Evaluation Model of Interaction Between Container Transportation System and Russian Regions. *International Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2019, pp. 782–790. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_77. Доступ 20.12.2020.
6. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Никонов Ю. С. К вопросу консолидации и доставки одиночных и групповых контейнерных отправок в составе контейнерных поездов // Транспорт Урала. – 2014. – № 2. – С. 15–18. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/transport-urala-2014-02-41-_219e37113a7.html. Доступ 20.12.2020.
7. Резер С. М., Резер А. В., Лёвин С. Б., Носырев И. И. Математическое моделирование перевозок грузов в спецконтейнерах // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 5. – С. 3–10. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37820325>. Доступ 20.12.2020.
8. Кириллова А. Г. Актуальные аспекты развития международных транспортных коридоров на территории России // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2018. – № 2 (75). – С. 51–54. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-aspekty-razvitiya-mezhdunarodnyh-transportnyh-koridorov-na-territorii-rossii/pdf>. Доступ 20.12.2020.
9. Басыров И. М., Биленко Г. М., Басыров М. А. Укороченные контейнерные блок-поезда в мультимодальных перевозках // Бюллетень транспортной информации. – 2020. – № 1. – С. 4–9. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41804989>. Доступ 20.12.2020.
10. Sun, Yan; Li, Xinya. Fuzzy programming approaches for modeling a customer-centred freight routing problem in the road-rail intermodal hub-and-spoke network with fuzzy soft time windows and multiple sources of time uncertainty. *Mathematics*, 2019, Vol. 7, Iss. 8, p. 739. DOI: 10.3390/math7080739. Доступ 20.12.2020.
11. Sholihah, S. A. [et al]. Coordination model in hinterland chain of hub-and-spoke export trade logistics. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2018, Vol. 11, Iss. 4, pp. 776–793. DOI: 10.3926/jiem.2538. Доступ 20.12.2020.
12. Zhao, Yiran; Yang, Zhongzhen; Haralambides, H. Optimizing the transport of export containers along China's coronary artery: The Yangtze River. *Journal of Transport Geography*, 2019, Vol. 77, pp. 11–25. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.04.005. Доступ 20.12.2020.
13. Mantovani, S., Gianluca, M. [et al]. The load planning problem for double-stack intermodal trains. *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 267, Iss. 1, pp. 107–119. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.11.016. Доступ 20.12.2020.
14. Fomin, O. [et al]. Research of stability of containers in the combined trains during transportation by railroad ferry. *MM Science Journal*, 2020, Vol. 1, pp. 3728–3733. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_03_2019043. Доступ 20.12.2020.
15. Morganti, G. [et al]. Block planning for intermodal rail: Methodology and case study. *Transportation Research Procedia*, 2020, Vol. 47, pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.068. Доступ 20.12.2020.
16. Виноградов С. А. Контейнеру продадут билет как пассажиру // Интернет-издание «Гудок», 20.07.2020. [Электронный ресурс]: https://gudok.ru/content/first_person/1528250/. Доступ 01.10.2020.
17. Кочнева Д. И., Чан Хао. Модель планирования маршрутных контейнерных поездов с грузовыми операциями в пути следования // Вестник УрГУПС. – 2020. – № 4. – С. 46–56. [Электронный ресурс]: https://www.usurt.ru/vestnik/arxiv/vestnik_UrGUPS_4_2020.pdf. Доступ 01.10.2020.
18. Чернышев Ю. О., Кубил В. Н. Обзор динамических задач маршрутизации транспорта // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – № 3. – С. 491–501. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-dinamicheskikh-zadach-marshrutizatsii-transporta/pdf>. Доступ 01.10.2020.
19. Максимов П. А., Симаков В. К., Говоров В. Р. Многовершинные графы: поиск оптимального решения транспортных проблем // Транспортное дело России. – 2020. – № 2. – С. 94–96. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43022651_46125466.pdf. Доступ 01.10.2020.
20. Савельев М. В. О сложности одной задачи комбинаторной оптимизации // Математические машины и системы. – 2016. – № 4. – С. 106–110. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-slozhnosti-odnoy-zadachi-kombinatornoy-optimizatsii/pdf>. Доступ 01.10.2020.

